



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA
(DICEA)

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

***Analisi statistica della lavorabilità di miscele bituminose tramite sensori
intelligenti***

Statistical analysis of asphalt mixtures workability using particle-size sensors

Relatore:

Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di laurea di:

Luca Di Filippo

Correlatore:

Ing. Omar Guazzaroni

Indice

INTRODUZIONE	6
2. Stato dell'arte	10
2.1 Storia delle pavimentazioni stradali	10
2.1.1 Genesi dell'infrastruttura viaria.....	10
2.1.2 Passaggio dall'Antica Roma alle pavimentazioni moderne	11
2.1.3 L'avvento delle pavimentazioni moderne	13
2.2 Struttura e materiali delle moderne pavimentazioni flessibili.....	14
2.2.1 Sottostruttura e sottofondo	15
2.2.2 Sovrastruttura stradale	16
2.3 Leganti bituminosi	19
2.3.1 Caratteristiche reologiche	20
2.3.2 Caratteristiche chimiche	21
2.3.3 Processo di produzione del bitume.....	23
2.4 Bitumi modificati	25
2.4.1 Bitumi modificati con polimeri	26
2.5 Aggregati per pavimentazioni stradali	28
2.5.1 Origine litologica.....	28
2.5.2 Cicli di produzione	29
2.5.3 Dimensioni e granulometria	32
2.5.4 Distribuzione granulometrica	33
2.5.5 Analisi granulometrica mediante setacciatura.....	33
2.5.6 Analisi granulometrica per sedimentazione	37
2.5.7 Curva granulometrica	38
2.6 Conglomerato bituminoso.....	40

2.6.1 Processo di produzione del conglomerato bituminoso	41
2.6.2 Impianti di tipo discontinuo.....	42
2.6.3 Impianti di tipo continuo	44
2.7 Processo di compattazione in sito	46
2.8 Metodi di compattazione in laboratorio	48
2.9 Utilizzo di inerti intelligenti per la valutazione della compattazione	50
2.9.1 Esperienze in laboratorio	50
2.9.2 Esperienze in sito.....	51
2.10 Realizzazione di strati in conglomerato bituminoso con spessori maggiori ..	53
3. Aggregato intelligente e compattazione giratoria	56
3.1 Aggregato intelligente	56
3.2 Sensore interno.....	58
3.2.1 Angoli di Eulero	62
3.3 Procedura di settaggio e calibrazione del sensore	63
3.3.1 Procedura per la registrazione ed estrapolazione dei dati	72
3.4 Pressa giratoria	75
3.4.1 Settaggio della macchina e avvio della prova	77
4. Parametri di lavorabilità.....	79
4.1 Relative Rotation – RR	79
4.2 Relative Rotation Capacity – RRC	80
4.3 Compaction Energy Index – CEI	81
4.4 Mold-Sensor Relative Rotation Capacity – M-S RRC	82
4.5 Contenuto di vuoti.....	83
5. Materiali.....	85
6. Programma sperimentale	90
6.1 Obiettivi.....	90

6.2 Struttura della sperimentazione	91
6.3 Calcolo delle masse dei provini	95
6.4 Protocolli della sperimentazione	97
6.4.1 Realizzazione e compattazione dei provini con sensore esterno	98
6.4.2 Realizzazione e compattazione dei provini con sensore interno	109
7. Analisi dei risultati	117
7.1 Rotazioni relative della fustella	118
7.1.1 RR - provini 115_out	118
7.1.2 RR - provini 150_out	120
7.1.3 RRC - provini 180_out	121
7.1.4 Analisi dei risultati - RRx-y con sensore esterno	123
7.2 Determinazione del Mold-Sensor Relative Rotation Capacity (M-S RRC) ..	123
7.2.1 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 115_mid	124
7.2.2 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 150_mid	125
7.2.3 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 180_mid	127
7.2.4 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 180_bottom	128
7.2.5 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 180_top	130
7.2.6 Riepilogo parametro M-S RRC	132
7.2.7 Analisi dei risultati - valori M-S RRC	133
7.3 Compaction Energy Index (CEI)	134
7.3.1 CEI - provini con sensore esterno	135
7.3.2 CEI - provini con sensore interno	135
7.3.3 Analisi dei risultati - CEI	138
7.4 Analisi volumetrica	139
7.4.1 Risultati dell'analisi volumetrica	140
7.5 CEI vs. M-S RRC	143

8. Conclusioni e sviluppi futuri.....	145
9. Bibliografia	148

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, l'evoluzione delle esigenze di traffico, l'aumento dei carichi veicolari e la crescente attenzione alla sostenibilità hanno posto nuove sfide alla progettazione, costruzione e manutenzione delle infrastrutture stradali. In particolare, l'attenzione si è progressivamente spostata verso la durabilità delle pavimentazioni e l'ottimizzazione dei materiali, con l'obiettivo di garantire prestazioni elevate nel lungo periodo e ridurre i costi di gestione e gli interventi manutentivi.

In tale contesto si inserisce il ruolo fondamentale della fase di compattazione del conglomerato bituminoso durante la realizzazione di una nuova pavimentazione stradale, in quanto essa ha una grande influenza sulla durabilità e sulle prestazioni a lungo termine delle pavimentazioni flessibili.

La compattazione è cronologicamente l'ultimo processo che deve essere effettuato nella realizzazione di una nuova pavimentazione stradale in conglomerato bituminoso. Tale processo ha lo scopo di ottenere un manto uniforme e il più possibile aderente e di collegare saldamente fra di loro, in modo duraturo, i singoli strati di conglomerato bituminoso in modo da ottenere una struttura che abbia un'elevata stabilità e resistenza all'usura, nonché una planarità durevole.

La realizzazione di uno strato in conglomerato bituminoso richiede che esso venga adeguatamente compattato in modo da ottenere un idoneo volume dei vuoti finali. Diversi fattori influenzano il processo di compattazione, alcuni di tipo estrinseco, quali ad esempio le condizioni ambientali, altri legati alle caratteristiche intrinseche del materiale. L'attitudine a essere messo in opera al fine di raggiungere un predefinito livello di addensamento costituisce una proprietà specifica delle miscele bituminose detta lavorabilità. Questa è legata alla resistenza opposta nei riguardi dell'azione compattante, che in cantiere viene effettuata tramite rulli.

Nonostante la rilevanza di tale fase costruttiva, al girono d'oggi non vi sono a disposizione metodi per il controllo diretto, continuo ed in tempo reale delle condizioni di compattazione durante la posa in opera del conglomerato bituminoso.

In laboratorio vengono utilizzati diversi macchinari per lo studio della fase di compattazione, tuttavia, le proprietà finali della miscela, pur dipendendo in teoria

soltanto dalla sua composizione e dalla volumetria, nella pratica risentono fortemente dalle condizioni e dal metodo di compattazione adottato, tale aspetto rende l'analisi del processo di densificazione particolarmente complessa.

Nella realizzazione di una pavimentazione stradale, lo spessore dei singoli strati è legato, oltre alla prestazione meccanica che deve sviluppare nel tempo la pavimentazione, anche dalla difficoltà che si riscontra nella compattazione di strati con uno spessore troppo elevato.

Per ottenere informazioni riguardo il processo di compattazione, sono stati recentemente introdotti e normati dei sensori granulometrici definiti “inerti intelligenti” o “SmartRock”, i quali vengono utilizzati per studiare come gli effetti della compattazione agiscano sugli inerti di dimensioni maggiori e come essi si dispongono all'interno della miscela per ottenere in massimo grado di aggregazione.

In questo contesto si inserisce la presente tesi, che si propone di esplorare l'impiego di sensori intelligenti come possibile soluzione innovativa per la valutazione del processo di compattazione delle miscele bituminose.

In particolare, l'obiettivo principale del presente studio consiste nell'analisi statistica, mediante l'impiego di “inerti intelligenti”, della possibilità di realizzare in situ strati di conglomerato bituminoso caratterizzati da spessori superiori rispetto a quelli comunemente adottati, senza compromettere le prestazioni meccaniche e la durabilità del materiale. L'adozione di strati a maggiore spessore comporterebbe significativi benefici sia in termini economici sia di riduzione dei tempi di esecuzione, in quanto renderebbe possibile diminuire il numero di passaggi operativi e delle fasi di stesa e compattazione, ottimizzando così l'intero processo costruttivo e riducendo i costi complessivi di intervento.

La presente ricerca si colloca in una fase iniziale del percorso di sviluppo e sperimentazione degli “inerti intelligenti”, condotto dal Dipartimento di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche. In tale contesto, l'elaborato di tesi tra fondamento da una campagna sperimentale realizzata presso i laboratori del medesimo Dipartimento, nell'ambito della quale sono state condotte specifiche prove al fine di valutare le prestazioni ottenibili da strati di conglomerato bituminoso

realizzati con spessori superiori rispetto a quelli comunemente adottati nelle applicazioni in situ.

Per l'esecuzione delle prove di compattazione in laboratorio è stato impiegato un Compattatore Giratorio (o Pressa Giratoria), operando in conformità alle condizioni di prova standard previste dalla norma EN 12697-31.

Al fine di disporre di un quadro comparativo completo, orientato al confronto diretto tra gli spessori degli strati comunemente realizzati in situ e quelli caratterizzati da spessori maggiori, sono state condotte prove su tre differenti tipologie di provini, aventi altezze variabili. Tale approccio ha consentito di analizzare e confrontare i dati acquisiti dai sensori, permettendo una valutazione più approfondita del comportamento dei materiali al variare dello spessore. Tutti i provini sono stati realizzati con il medesimo materiale, una miscela bituminosa destinata alla realizzazione dello strato di base della pavimentazione stradale.

2. Stato dell'arte

2.1 Storia delle pavimentazioni stradali

2.1.1 Genesi dell'infrastruttura viaria

Nella civiltà contemporanea, le infrastrutture stradali rivestono un ruolo imprescindibile, costituendo uno degli elementi cardine per il funzionamento dei sistemi economici, sociali e produttivi. Esse garantiscono la mobilità di persone e merci, favoriscono lo sviluppo territoriale e rappresentano un presupposto fondamentale per l'integrazione e la connessione tra aree urbane e rurali. Tuttavia, l'importanza delle strade non è un fenomeno esclusivamente moderno, ma affonda le proprie radici in epoche remote, trovando una delle prime espressioni organiche e sistematiche nell'ingegneria dell'antica Roma, la cui rete viaria costituisce uno dei modelli più avanzati e duraturi dell'ingegneria antica.

Già a partire dal IV secolo a.C., i Romani iniziarono a sviluppare una rete stradale capillare, inizialmente con finalità militari, al fine di facilitare il rapido spostamento delle legioni. Successivamente, tali infrastrutture assunsero anche una funzione economica e amministrativa, favorendo gli scambi commerciali e l'integrazione dei territori conquistati. Le strade romane, come la celebre Via Appia, erano caratterizzate da una notevole qualità costruttiva: venivano realizzate attraverso una struttura stratificata composta da più livelli di materiali, progettata per garantire resistenza, drenaggio e durabilità nel tempo.

Il tracciato delle strade romane era molto diverso da quelle attuali (lunghissimi rettifili, assenza di curve, pendenze elevate nei tratti montagnosi), mentre è ancora attualissima la tecnica con cui veniva realizzato il manufatto della sovra-struttura, organizzata in strati di materiale litoide le cui dimensioni andavano diminuendo negli strati superiori. Essa era realizzata ricavando un piano di posa livellato a mezzo di uno scavo sul terreno, attualmente chiamato cassonetto, che conteneva i seguenti strati (Figura 2.1):

- I. **Statumen:** strato inferiore costituito da grosse pietre opportunamente posate sul fondo dello scavo per uno spessore indicativo di 30-50 cm;

- II. **Uderatio o Rudus:** primo strato intermedio costituito da ciottoli con dimensioni medie e con spessore indicativo di 10-20 cm;
- III. **Nucleus:** secondo strato intermedio di spessore variabile, costituito da ciottoli di piccola pezzatura compattati con pesanti cilindri;
- IV. **Pavimentum o Summa Crusta:** strato superiore della sovrastruttura costituita da materiale arido minuto, miscelato a sabbia, talvolta completato da una pavimentazione, costituita da un lastricato di roccia (in latino “via strata” cioè via lastricata, da cui la derivazione etimologica del termine «strada») [1].

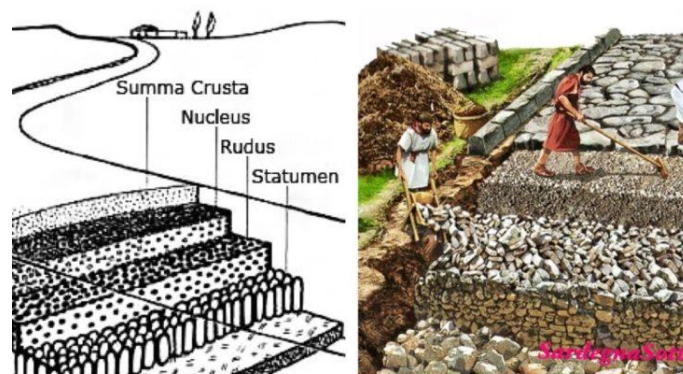


Figura 2.1: Dettaglio stratigrafico di una strada dell'antica Roma

2.1.2 Passaggio dall'Antica Roma alle pavimentazioni moderne

Con la caduta dell'Impero Romano d'Occidente nel V secolo d.C., molte infrastrutture viarie entrarono in una fase di progressivo degrado. Durante il Medioevo, infatti, la manutenzione della rete stradale risultò discontinua e spesso insufficiente, anche a causa della frammentazione politica e della riduzione degli scambi commerciali su lunga distanza. Le vie romane continuarono comunque a essere utilizzate, sebbene in condizioni peggiori, e vennero affiancate da percorsi secondari meno strutturati. In questo periodo, le strade avevano prevalentemente una funzione locale e commerciale, spesso legata ai percorsi dei pellegrinaggi, come la Via Francigena. Questo era il periodo in cui prosperavano le città portuali e marittime in quanto il commercio avveniva prevalentemente via mare e via fiume.

Soltanto a partire dal Settecento, dopo un lungo letargo durato quindici secoli, in corrispondenza del rifiorire dei commerci, e più tardi con lo sviluppo delle prime industrie, parallelamente ai trasporti marittimi, ricominciarono a crescere e ad estendersi anche i trasporti terrestri, e con loro riprese vigore l'esigenza di fornire i popoli di una adeguata rete stradale. Tra il XVI e il XVIII secolo, in diversi Paesi europei vennero avviati programmi di miglioramento e costruzione delle strade, con l'introduzione di tecniche più razionali e criteri ingegneristici più avanzati.

A quel punto il problema da risolvere era quello di adottare tecniche costruttive che contenessero i costi che la sovrastruttura della strada romana richiedeva. In genere si cercavano tecniche costruttive con le quali ridurre l'entità dello scavo e dello spessore della sovrastruttura stessa.

Il primo a teorizzare una nuova tecnica per realizzare la sovrastruttura fu il francese Pierre Trésaguet nella seconda metà del '700. La sua tecnica fu poi adottata e sviluppata dall'ingegnere scozzese Thomas Telford (1757-1834). Il principio era quello di ridurre gli spessori, dunque le masse, predisponendo con molta cura una base (la fondazione) di pietrame spaccato e lavorato, spesso disposto ad arco, a cui seguivano uno o due strati di pietrisco, con aggregati di dimensioni minori rispetto a quelli della base, che doveva saturare gli spazi vuoti lasciati nello strato inferiore e rendere la sovrastruttura stabile. Con questa tecnica gli spessori complessivi della sovrastruttura vennero ridotti a 30-40 cm.

Nello stesso periodo, il connazionale Loudon MacAdam (1756-1836) concepì un sistema di costruzione della sovrastruttura stradale (denominata poi *macadam*) praticamente priva di fondazione e di pavimentazione, che divenne celebre per la sua praticità ed economicità nella fase di costruzione, essendo il materiale ghiaioso semplicemente steso e non lavorato (Figura 2.2).

La tecnica sviluppata da MacAdam consisteva nel preparare la massicciata con una miscela di ghiaietto e pietrisco frantumato con aggregati di diverse dimensioni (più grandi in basso, più piccoli in sommità), compattato con mezzi pesanti, le cui polveri fungevano da legante, e che, sotto l'azione degli agenti atmosferici e del traffico, auto-cementavano l'intera massicciata.

Lo spessore della sovrastruttura di MacAdam era maggiore di quella teorizzata da Telford, ma la minor mano d'opera richiesta per la realizzazione ne riduceva in modo

rilevante i costi, pur richiedendo, successivamente, assidue e periodiche manutenzioni.
[1]

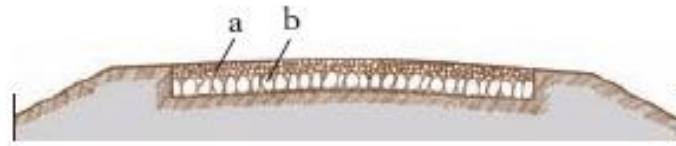


Figura 2.2: Dettaglio stratigrafico di una sovrastruttura stradale macadam.

Strato inferiore con aggregati di dimensioni maggiori (b).

Strato superiore con aggregati di dimensioni inferiori (a)

2.1.3 L'avvento delle pavimentazioni moderne

In pratica la soluzione proposta da MacAdam venne utilizzata per oltre un secolo (l'Ottocento). Tuttavia, come già accennato, essa aveva l'inconveniente di richiedere continue manutenzioni al piano di scorrimento, inoltre, le pavimentazioni non trattate evidenziarono in tempi brevi i propri limiti, manifestando significative criticità sotto il profilo igienico, funzionale e strutturale. In particolare, la polvere sollevata dal traffico veicolare determinava condizioni ambientali sfavorevoli.

Altresì, sulla superficie di tali pavimentazioni si manifestava con frequenza la formazione di avvallamenti che, oltre a compromettere il comfort e la sicurezza della circolazione, determinavano, in presenza di precipitazioni, condizioni di impraticabilità della sede stradale a causa dei persistenti ristagni d'acqua.

Questi inconvenienti non ostacolavano in modo significativo i veicoli a bassa velocità, come ad esempio i carri, che utilizzavano in origine queste strade. Tuttavia, divennero incompatibili con un traffico costituito da veicoli con velocità e portate decisamente superiori (nel nostro paese, ciò si verificò tra gli anni '20 e '50 del secolo scorso).

L'adozione degli pneumatici nei veicoli rese progressivamente imprescindibile la realizzazione di un piano di scorrimento stradale regolare e duraturo, in grado di limitare il fenomeno del sollevamento delle polveri; in tale contesto si colloca la

comparsa della pavimentazione stradale realizzata mediante l'utilizzo di leganti bituminosi, elemento distintivo delle infrastrutture viarie moderne. L'adozione dei leganti bituminosi consentì di superare tali problematiche, migliorando sensibilmente le condizioni di esercizio delle infrastrutture stradali.

In una fase iniziale, la pavimentazione stradale veniva realizzata mediante la semplice stesa di uno strato di bitume e pietrischetto direttamente sulla sovrastruttura di MacAdam. In seguito, si è assistito a un progressivo perfezionamento delle tecniche costruttive, che ha coinvolto sia la natura dei materiali impiegati nella sovrastruttura sia la definizione dei relativi spessori. Con l'avanzamento tecnologico nel settore delle infrastrutture viarie, le pavimentazioni hanno iniziato a essere realizzate mediante conglomerati bituminosi, posti in opera mediante apposite macchine vibrofinitrici e successivamente sottoposti a compattazione mediante rulli meccanici.

In conclusione, dall'ingegneria avanzata delle strade romane fino alle innovazioni dell'età moderna, la storia delle infrastrutture viarie evidenzia un progressivo affinamento delle tecniche costruttive e una crescente consapevolezza dell'importanza della mobilità per lo sviluppo economico e sociale.

2.2 Struttura e materiali delle moderne pavimentazioni flessibili

L'avvento delle strade moderne rappresenta una tappa fondamentale nell'evoluzione delle infrastrutture di trasporto, segnando il passaggio da tecniche costruttive prevalentemente empiriche a un approccio sempre più scientifico e ingegnerizzato. Tale trasformazione fu determinata dalle crescenti esigenze di mobilità e dallo sviluppo economico e industriale, che resero necessario disporre di reti viarie più efficienti, durevoli e in grado di sopportare volumi di traffico progressivamente maggiori. In questo contesto, l'innovazione dei materiali e delle tecnologie costruttive, unitamente al perfezionamento dei criteri progettuali, ha portato alla definizione delle pavimentazioni stradali moderne, caratterizzate da elevate prestazioni meccaniche e funzionali.

2.2.1 Sottostruttura e sottofondo

Nell'ambito dell'ingegneria stradale contemporanea, il corpo stradale è concepito come un sistema multilayer costituito da diversi strati funzionali, ciascuno dei quali contribuisce in modo specifico al comportamento complessivo della pavimentazione. La progettazione di tale sistema richiede un'accurata definizione delle proprietà meccaniche e funzionali di ogni singolo strato, nonché un'attenta analisi delle interazioni reciproche tra gli stessi, al fine di garantire adeguati livelli di prestazione e durabilità nel tempo.

È opportuno evidenziare come gli strati in conglomerato bituminoso non costituiscano l'unico elemento della struttura stradale, ma si inseriscano all'interno di un sistema più ampio che comprende anche la sottostruttura - ovvero l'insieme delle opere di terra come i rilevati o gli scavi, che formano la base complessiva della strada - la quale riveste un ruolo di pari importanza. Quest'ultima, infatti, contribuisce in maniera determinante alla capacità portante complessiva dell'infrastruttura e alla corretta trasmissione dei carichi al terreno di fondazione, rendendo imprescindibile una progettazione integrata dell'intero corpo stradale.

Lo strato più superficiale della sottostruttura è il sottofondo. Per sottofondo di una pavimentazione stradale si intende la parte della sottostruttura su cui poggia la pavimentazione a all'interno della quale si avvertono in misura apprezzabile le azioni dei carichi veicolari trasmesse dalla pavimentazione. Esso costituisce, a tal punto, un'interfaccia tra la sovrastruttura (omogenea) e il terreno (eterogeneo).

Per quanto riguarda il sottofondo, le sue prestazioni meccaniche vengono espresse in termini di *portanza*, intesa come il carico che in condizioni di sollecitazioni note, provoca in cedimento prefissato, in termini di *rigidezza*, legato alle deformazioni reversibili, e in termini di *resistenza al danno*, legata alle deformazioni irreversibili.

Il sottofondo della pavimentazione deve possedere prestazioni più elevate rispetto a quanto viene normalmente richiesto agli strati di rilevato in termini di:

- **resistenza alle azioni meccaniche** (load bearing capacity), per esigenze connesse sia alla fase di costruzione sia a quella di esercizio;
- **regolarità geometrica** della superficie finita, ovvero del piano di posa della pavimentazione, per assicurare uniformità di spessore ai vari strati della sovrastruttura e regolarità dei profili finali della superficie viabile;
- **stabilità nel tempo delle proprietà meccaniche** che devono risultare poco sensibili alle variazioni del contenuto d'acqua e agli effetti del gelo.

Un'elevata rigidezza del sottofondo è richiesta sia in fase di costruzione della pavimentazione sia in esercizio. Essa è infatti indispensabile per ottenere una migliore compattazione degli strati sovrastanti (effetto incudine) e per limitare la deformazione dovuta ai carichi veicolari. Quest'ultimo effetto, unitamente alla capacità del sottofondo di resistere all'accumulo delle deformazioni permanenti, contribuisce al prolungamento della vita utile della sovrastruttura [2].

2.2.2 Sovrastruttura stradale

Nel contesto della trattazione generale della struttura di una strada, un ruolo centrale è rivestito dalla sovrastruttura viaria (o *pavimentazione flessibile*), la quale costituisce l'insieme degli strati superiori direttamente deputati a sostenere i carichi derivanti dal traffico e a garantire adeguate condizioni di esercizio. Essa si configura come un sistema stratificato progettato per distribuire progressivamente le sollecitazioni verso gli strati sottostanti, assicurando al contempo requisiti di resistenza meccanica, regolarità superficiale e durabilità. La definizione delle sue caratteristiche e della sua composizione risulta pertanto strettamente connessa sia alle esigenze funzionali della strada sia alle proprietà della sottostruttura, nell'ambito di un approccio integrato alla progettazione dell'intero corpo stradale.

Analizzando nel dettaglio, la sovrastruttura flessibile si compone generalmente di tre principali strati in conglomerato bituminoso: *strato di usura*, *strato di collegamento* o *binder* e *strato di base* (Figura 2.3), ciascuno dei quali assolve a specifiche funzioni e presenta caratteristiche meccaniche e tecnologiche differenziate.

STRATO	FUNZIONE
Usura	Aderenza e Regolarità
Binder	Collegamento
Base	Ripartizione strutturale dei carichi
Fondazione	Trasmissione dei carichi al Sottofondo
Sottofondo	Dissipazione ed assorbimento dei carichi

Figura 2.3: Stratigrafia tipica di una pavimentazione stradale con funzione dei singoli strati

Lo **strato di base**, con spessore variabile indicativamente tra 8 e 30 cm, rappresenta l'elemento strutturale principale della pavimentazione flessibile. La sua funzione consiste nell'assorbire e distribuire le azioni flessionali e le tensioni verticali generate dai carichi di traffico, riducendo le sollecitazioni trasmesse agli strati inferiori. Il dimensionamento di tale strato dipende da molteplici fattori, tra cui le condizioni climatiche, le caratteristiche meccaniche del sottofondo e l'intensità di traffico prevista in fase di progetto. Esso è solitamente realizzato in conglomerato bituminoso posato a caldo che, in base alle necessità della pavimentazione stradale, può essere confezionato sia con bitume tradizionale che con bitume modificato. Per la realizzazione di questo strato è ammesso l'impiego di RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), comunemente chiamato *fresato*, ovvero conglomerato di riciclo proveniente dalla rimozione di altre pavimentazioni stradali in quantità non superiore al 30% in peso rispetto agli aggregati. Superiormente allo strato di base si colloca lo **strato di collegamento**, comunemente denominato *binder*, con uno spessore tipicamente compreso tra 6 e 8 cm. Tale strato svolge una funzione di transizione tra lo strato di usura e lo strato di base, garantendo

la continuità strutturale della pavimentazione. Tale strato svolge essenzialmente una funzione di regolarizzazione dello strato di **base** per poter garantire una adeguata pendenza e planarità, per rendere più semplice la stesa del sovrastante **manto di usura**. Esso contribuisce, inoltre, alla distribuzione dei carichi veicolari e alla riduzione delle sollecitazioni flessionali indotte dal traffico, limitando l'insorgenza di fenomeni di fessurazione. Anche in questo caso il conglomerato bituminoso che costituisce lo strato viene posato a caldo e in base alle necessità può essere confezionato con bitume tradizionale o modificato. Similmente allo strato di **base**, per la posa della miscela di binder è consentito l'impiego di materiale fresato in quantità non superiore al 25% in peso della complessiva miscela.

La struttura della pavimentazione stradale è completata dallo **strato di usura**, o tappeto, caratterizzato da uno spessore generalmente compreso tra 3 e 6 cm. Esso è direttamente esposto all'azione del traffico veicolare e degli agenti atmosferici ed è dotato di una longevità sufficientemente lunga, almeno 10 anni. Tale strato garantisce primariamente la regolarità del piano viabile, così da limitare le vibrazioni e l'usura dei veicoli e una adeguata aderenza tra pneumatico e pavimentazione stradale in modo tale da assicurare il transito dei veicoli in condizioni ottimali di sicurezza e comfort. Tali requisiti devono essere soddisfatti sia in caso di pavimentazione stradale asciutta che pavimentazione bagnata, riducendo il rischio di slittamento e di fenomeni di aquaplaning.

Al fine di garantire il più alto livello di aderenza tra pneumatico e pavimentazione stradale, durante la creazione del conglomerato bituminoso per il manto di usura, vengono impiegati gli aggregati lapidei più pregiati.

2.3 Leganti bituminosi

Nel contesto delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso, il bitume riveste un ruolo fondamentale quale materiale legante, responsabile della coesione tra gli aggregati e, conseguentemente, delle prestazioni meccaniche e funzionali dell'intero sistema. Esso consente di trasformare un insieme granulare sciolto in un materiale continuo e compatto, capace di resistere alle sollecitazioni indotte dal traffico e dagli agenti atmosferici.

La sua presenza all'interno del conglomerato non si limita a svolgere una funzione adesiva, ma influisce in maniera determinante su proprietà quali la resistenza alla deformazione permanente, la durabilità, la suscettibilità termica e il comportamento viscoelastico della miscela. Per tali ragioni, lo studio del bitume, sia in termini di composizione chimico-fisica sia di comportamento reologico, rappresenta un aspetto centrale nella progettazione e nell'ottimizzazione delle pavimentazioni stradali moderne.

Con legante bituminoso si intende un composto di natura organica derivato dal petrolio greggio, in grado di conferire coesione ad un ammasso sciolto (terra granulare, aggregati lapidei) in modo da creare un materiale continuo e compatto, capace di resistere alle sollecitazioni indotte dal traffico e dagli agenti atmosferici. Esso è un materiale non volatile, adesivo ed impermeabile; è altamente viscoso, quasi solido alla temperatura dell'aria e solubile quasi completamente in toluene [3].

La categoria dei leganti bituminosi comprende sia i bitumi propriamente detti, originati cioè attraverso le comuni lavorazioni di raffinaria, sia altre tipologie di materiali, sempre a base bituminosa ma prodotti con particolari processi tecnologici in grado di conferire loro delle proprietà specifiche. Appartengono a quest'ultima categoria i bitumi modificati con polimeri, ai quali si aggiungono i bitumi *multigrade*, gli *asphalt rubber* contenenti polverino di gomma derivato da pneumatici fuori uso e altre tipologie di bitumi meno utilizzati.

2.3.1 Caratteristiche reologiche

I leganti bituminosi sono materiali visco-elastici e termo-dipendenti, dunque il loro comportamento varia in funzione di:

- temperatura;
- modalità e tempo di carico;
- invecchiamento, in quanto le proprietà dei leganti bituminosi si modificano nel tempo.

Tali leganti manifestano un comportamento meccanico estremamente vario che spazia da quello tipico di un solido elastico per bassi valori di temperatura a quello di un fluido viscoso di tipo Newtoniano per alti valori di temperatura. Tali condizioni limite comprendono stadi intermedi di tipo visco-elastico, caratterizzati cioè dalla copresenza di componenti elastiche e viscosi. Queste ultime (legate a fenomeni dissipativi) sono responsabili della dipendenza dal tempo della risposta del materiale e, come si avrà modo di osservare, gli effetti correlati alle due grandezze possono essere riprodotti reciprocamente secondo un principio detto di sovrapposizione (o equivalenza) tempo-temperatura [2].

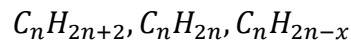
Da un punto di vista funzionale, il bitume deve presentare una viscosità sufficientemente ridotta alle alte temperature ($\approx 160^{\circ}\text{C}$) al fine di garantire adeguate condizioni di pompabilità e lavorabilità, consentendo così un efficace e omogeneo rivestimento degli aggregati. Al contempo, esso deve possedere una rigidità adeguata alle elevate temperature di esercizio ($\approx 60^{\circ}\text{C}$), tale da resistere alle sollecitazioni indotte dal traffico, e, parallelamente, manifestare un comportamento sufficientemente deformabile ed elastico alle basse temperature, in modo da limitare l'insorgenza di fenomeni di fessurazione termica.

Tuttavia, il soddisfacimento simultaneo di tali requisiti risulta difficilmente conseguibile mediante l'impiego di bitumi convenzionali non modificati. Inoltre, in presenza di condizioni di esercizio particolarmente gravose o di crescenti esigenze prestazionali, tali materiali possono rivelarsi inadeguati sotto il profilo delle proprietà meccaniche. Per tale ragione, al fine di migliorare le prestazioni del bitume tale quale, sono stati progressivamente introdotti diversi additivi e modificatori, tra cui polimeri,

agenti chimici specifici, ossidanti e additivi anti-stripping, in grado di ottimizzarne il comportamento reologico e la durabilità.[4]

2.3.2 Caratteristiche chimiche

Il bitume è un sistema multifase costituito da miscele di idrocarburi paraffinici, aromatici e loro derivati, che si differenziano per struttura molecolare e composizione. Gli idrocarburi variano a seconda del greggio di provenienza e dei processi di distillazione utilizzati; in genere, presentano una struttura chimica del tipo:



dove n può variare nell'intervallo 2-30.

Oltre al carbonio e all'idrogeno (presenti in quantità superiori al 90% in peso rispetto al totale), altri elementi costituenti sono lo zolfo, l'ossigeno e l'azoto (detti eteroatomi) che possono presentarsi isolatamente o sotto forma di gruppi funzionali.[2]

Nel corso degli anni sono stati proposti diversi modelli che descrivessero la struttura del bitume. Attualmente per descrivere la struttura chimica del bitume si fa riferimento al modello colloidale proposto da Rosinger (1914)-Errera-Nellesteyn (1923) [5].

Secondo tale modello, il bitume può essere rappresentato come un sistema colloidale costituito da una dispersione di micelle solide, detti *asfalteni*, in un mezzo oleoso di base, chiamato *matrice maltenica* o semplicemente *malteni*. Questi ultimi a loro volta sono costituiti da altre componenti (aromatici e saturi) (Figura 2.4) [5].

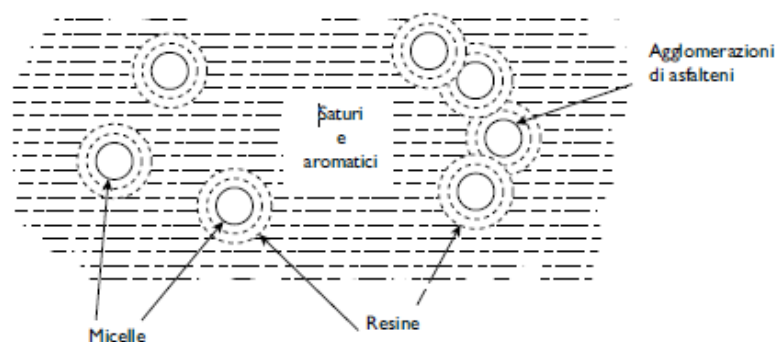


Figura 2.4 - Modello chimico del bitume - Rosinger (1914)-Errera-Nellesteyn (1923)

Sempre con riferimento al modello colloidale, il comportamento del bitume può variare tra quello di un sistema “sol” prettamente Newtoniano e quello di un “gel” non-Newtoniano a carattere tissotropico e pseudoplastico (Figura 2.5).

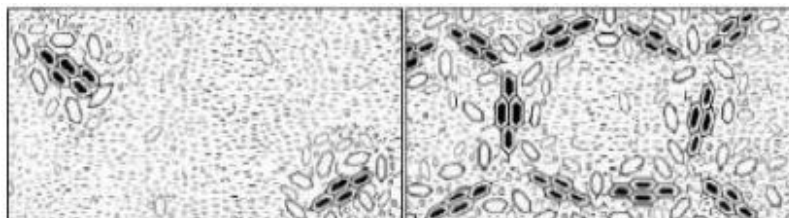


Figura 2.5 – Struttura “sol” (sinistra) e struttura “gel” (destra)

Nel caso *sol* le resine, che fungono da agente peptizzante, sono presenti in quantità tali da mantenere gli asfalteni in uno stato altamente disperso nella fase oleosa cosicché il materiale può considerarsi, schematicamente, come una dispersione di sfere indeformabili in un liquido perfettamente viscoso. Poiché le interazioni tra le agglomerazioni micellari sono ridotte, ne consegue una risposta di tipo lineare sia alle basse sia alle alte temperature.

Una struttura di tipo *gel* si presenta invece quando le resine non sono del tutto efficaci nella peptizzazione degli asfalteni, ragion per cui questi ultimi tendono a reticolare fra loro con conseguente separazione delle fasi (disperdente e dispersa). Normalmente ciò si può rappresentare mediante un insieme di sfere indeformabili collegate tra loro con delle molle e la risposta che ne consegue diventa di tipo non-Newtoniana.

In realtà, il modello interpretativo più attendibile prevede la coesistenza dei due schemi strutturali (Figura 2.6). Alle basse e medie temperature, le proprietà reologiche del bitume risultano principalmente influenzate dalla concentrazione di asfalteni: a parità di temperatura, un incremento della loro quantità comporta un aumento della viscosità del materiale.

Le più recenti interpretazioni concordano nel ritenere che tutti i bitumi condividano una medesima struttura fondamentale; le differenze tra comportamento di tipo sol e gel sono attribuibili essenzialmente alla frazione volumetrica della fase dispersa solida, ovvero alla quantità di asfalteni presenti nel sistema.

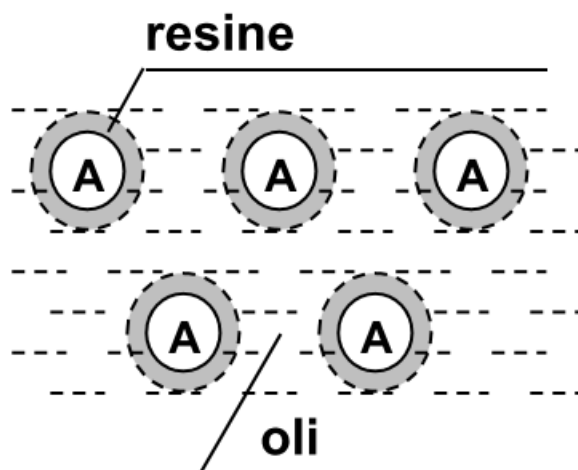


Figura 2.6 – Modello chimico del bitume secondo l'ipotesi attuale

2.3.3 Processo di produzione del bitume

I sistemi di produzione dei bitumi tradizionali si basano essenzialmente sulla distillazione frazionata del greggio di petrolio (Figura 2.7). Il principio generale consiste nel separare le varie componenti del greggio, caratterizzate ciascuna da un diverso punto di ebollizione, all'interno di torri di frazionamento.

In particolare, si possono distinguere due fasi principali, ovvero, un primo processo caratterizzato da una distillazione a pressione atmosferica, nel corso della quale vengono separate le parti più leggere, come ad esempio gas, benzine, cherosene e gasoli (con temperatura di ebollizione fino a un massimo di 350-400 °C). Il residuo di tale operazione, costituito da componenti con alta temperatura di ebollizione, rappresenta la materia prima per la produzione del bitume. La seconda fase di produzione del legante consiste nella distillazione sottovuoto eseguita sul residuo di lavorazione della prima torre. Questa fase risulta fondamentale in quanto consente di evitare fenomeni di degradazione termica del materiale. In condizioni di pressione ridotta, infatti, è possibile separare ulteriormente le frazioni più pesanti senza raggiungere temperature eccessivamente elevate. Il prodotto finale di questa fase è il cosiddetto **residuo di vacuum**, che costituisce la base per la produzione dei bitumi stradali. Il prodotto ottenuto alla fine di questa fase può essere utilizzato direttamente

come bitume stradale, altrimenti, a seconda delle caratteristiche richieste, il residuo può essere ulteriormente trattato mediante specifici processi industriali.

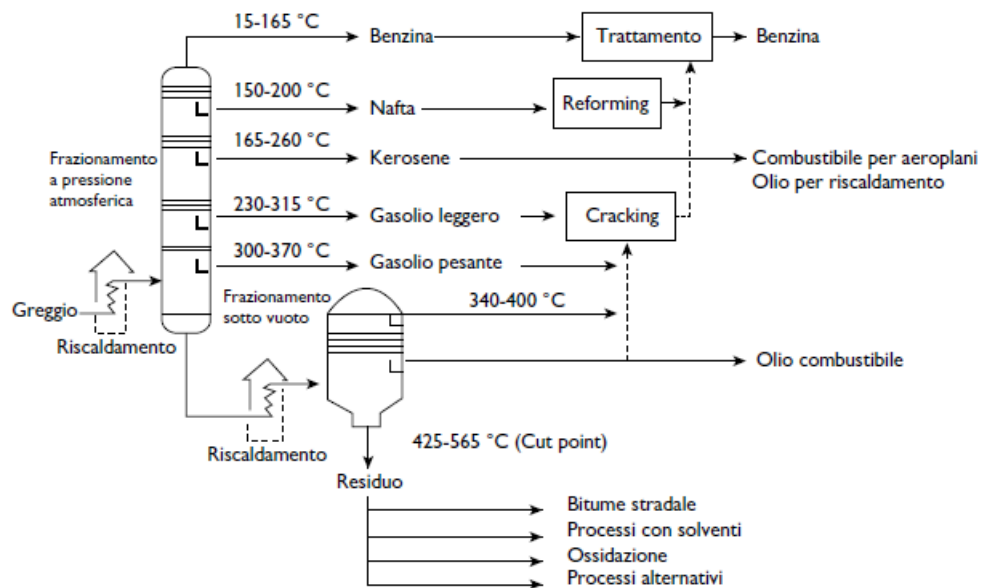


Figura 2.7 – Processo di frazionamento del greggio di petrolio

Tra questi trattamenti che possono essere effettuati sul materiale di risulta del processo di raffinazione, si distinguono principalmente:

- **ossidazione a caldo**, che avviene mediante getti d'aria a temperature dell'ordine di 200°C (*airblowing*), ottenendo i cosiddetti bitumi ossidati o soffiati. Tale processo si applica quando è necessario aumentare la viscosità del residuo e migliorarne la suscettività termica. Un campo di impiego tipico è quello delle coperture e delle impermeabilizzazioni;
- **diluizione con solventi** (*cut-back*), ottenendo i cosiddetti bitumi liquidi. Si applica per abbassare la viscosità del bitume al fine di renderlo lavorabile a basse temperature. A seconda del tipo di solvente tali prodotti si distinguono ulteriormente in bitumi liquidi a lento indurimento (*slow curing*), contenenti un diluente pesante e poco volatile (gasolio), a medio indurimento (*medium curing*) contenenti un diluente di media volatilità (kerosene) e infine a rapido indurimento (*rapid curing*) contenenti un diluente leggero e molto volatile (benzina o nafta).

2.4 Bitumi modificati

I bitumi modificati rappresentano una soluzione tecnologicamente avanzata, sviluppata per rispondere alle crescenti esigenze prestazionali imposte dall'aumento dei carichi di traffico e dalle condizioni ambientali sempre più severe. Essi sono ottenuti dall'unione di un bitume tradizionale e di particolari composti chimici, detti agenti modificanti, nella gran parte materiali polimerici di varia natura e composizione. È importante osservare che il bitume modificato costituisce un prodotto sostanzialmente diverso da quello di origine, in quanto il polimero non funge da semplice additivo ma determina una modificazione chimico-fisica di tipo irreversibile unita a un miglioramento complessivo delle caratteristiche prestazionali. La produzione avviene in impianti appositamente allestiti per la modifica.

Le prime pubblicazioni scientifiche riguardanti i bitumi modificati risalgono al 1938 e i primi impieghi si hanno nel settore delle impermeabilizzazioni a partire dagli anni 70 del 900, per produrre isolanti in grado di assorbire contrazioni ed espansioni termiche. La ricerca dei diversi metodi di produzione e dei processi di formazione delle modifiche, oltre alle caratteristiche e proprietà delle stesse, si è avuta soltanto a partire dal 1980. Successivamente il loro utilizzo è approdato nel campo delle infrastrutture stradali per migliorare le prestazioni dei conglomerati bituminosi in termini di adesione e proprietà meccaniche, adeguandole alle esigenze determinate dall'aumento del traffico (soprattutto pesante) e dalle condizioni climatiche.

Le principali motivazioni che giustificano l'impiego di bitumi modificati risiedono nella loro capacità di migliorare significativamente il comportamento meccanico delle pavimentazioni. In particolare, essi consentono di incrementare la resistenza alle deformazioni permanenti (ormaiamento) alle elevate temperature di esercizio e, al contempo, di ridurre la suscettibilità alla fessurazione termica alle basse temperature. Inoltre, con specifico riferimento agli strati di base, oggetto di interesse della presente sperimentazione, l'utilizzo di bitumi modificati comporta un sensibile miglioramento della resistenza a fatica, contribuendo a incrementare la durabilità complessiva della sovrastruttura stradale.

2.4.1 Bitumi modificati con polimeri

I polimeri sono macromolecole in cui gruppi di atomi, molecole o gruppi di molecole (detti monomeri) vengono ripetuti per un gran numero di volte (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Composizione schematizzata di un polimero

La sequenza e la struttura chimica del monomero determinano le proprietà fisiche del polimero, e vista la grande varietà di polimeri a disposizione sul mercato è possibile il miglioramento mirato di specifiche prestazioni del bitume.

I polimeri si classificano in termoindurenti (non utilizzati in campo stradale) e termoplastici. Questi ultimi, se riscaldati, fluidificano e diventano reversibilmente malleabili e vengono inglobati nei bitumi ad alta temperatura, con il risultato di una miscela paragonabile ad un liquido viscoso. Essi a livello molecolare sono, nella maggior parte dei casi, costituiti da catene macromolecolari lineari, ma raramente possono essere anche ramificate. I polimeri termoplastici si dividono a loro volta in *elastomeri* e *plastomeri*.

I polimeri termoplastici elastomerici sono caratterizzati da una deformazione prevalentemente elastica, migliorano il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici. I più utilizzati nei bitumi modificati sono i polimeri termoplastici elastomerici stirenici che danno vita ai "bitumi elastomerizzati".

Le principali tipologie di polimeri termoplastici elastomerici sono SBS (stirene-butadiene-stirene), SIS (stirene-isopropene-stirene), SB (stirene-butadiene) e SBR (stirene-butadiene-rubber).

I polimeri termoplastici plastomerici sono caratterizzati da una struttura reticolare rigida e resistente e dunque, non modificano in maniera significativa la risposta elastica del bitume ma ne determinano un sostanziale incremento della resistenza a rottura.

Le principali tipologie che si possono trovare in commercio sono EVA (etilene-vinilacetato), EMA (etilene-metilacrilato), EBA (etilene-butilacrilato), PIB (polisobutylene), EPDM (etilene-propilene diene), PE (polietilene) e PP (polipropilene).

In base alla percentuale di polimeri che viene impiegata per il confezionamento del legante bituminoso, in Italia, possiamo distinguere tre tipologie di bitume, ovvero, bitume modificato soft, bitume modificato medium e bitume modificato hard.

La classificazione dei bitumi modificati con polimeri segue la UNI EN 14023 (Tabella 2.1). Pertanto, la designazione di un bitume modificato viene fatta indicando l'intervallo di penetrazione e il valore del punto di rammollimento della corrispondente classe.

PROPERTY		TEST METHOD	UNIT	Classes for all polymer modified bitumens										
				2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Penetration at 25 °C		EN 1426	0,1 mm	10-40	25-55	45-80	40-100	65-105	75-130	90-150	120-200	200-300		
Softening Point		EN 1427	°C	≥ 80	≥ 75	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 55	≥ 50	≥ 45	≥ 40		
Cohesion ^a	Force ductility ^a (50 mm/min traction) or	EN 13589 followed by EN 13703	J/cm ²	≥ 3 at 5 °C	≥ 2 at 5 °C	≥ 1 at 5 °C	≥ 2 at 0 °C	≥ 2 at 10 °C	≥ 3 at 10 °C	≥ 0,5 at 15 °C	≥ 2 at 15 °C	≥ 0,5 at 20 °C	≥ 0,5 at 25 °C	
	Tensile test ^a (100 mm/min traction) or	EN 13587 followed by EN 13703	J/cm ²	≥ 3 at 5 °C	≥ 2 at 5 °C	≥ 1 at 5 °C	≥ 3 at 0 °C	≥ 3 at 10 °C						
	Vialit pendulum ^a (Impact test)	EN 13588	J/cm ²	≥ 0,7										
Resistance to hardening ^b	Retained Penetration	EN 12607-1	%	≥ 35						≥ 40	≥ 45	≥ 50	≥ 55	≥ 60
	Increase in Softening point		°C	≤ 8	≤ 10	≤ 12								
	Change of mass ^c		%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 0,8				≤ 1,0				
Flash Point		EN ISO 2592	°C	≥ 250	≥ 235	≥ 220								

PROPERTY		TEST METHOD	UNIT	Classes for regional requirements										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fraass Breaking Point		EN 12593	°C	NR ^a	TBR ^b	≤ 0	≤ - 5	≤ - 7	≤ - 10	≤ - 12	≤ - 15	≤ - 18	≤ - 20	≤ - 22
Elastic recovery	25 °C or ^c	EN 13398	%	NR ^a	TBR ^b	≥ 80	≥ 70	≥ 60	≥ 50					
	10 °C	EN 13398	%	NR ^a	TBR ^b	≥ 75	≥ 50							

Tabella 2.1 – Classificazione dei bitumi modificati con polimeri (UNI EN 14023)

2.5 Aggregati per pavimentazioni stradali

Nel confezionamento del conglomerato bituminoso, la scelta e la qualità degli aggregati rappresentano un fattore determinante per garantire le prestazioni meccaniche, la durabilità e la sicurezza della pavimentazione stradale. Gli aggregati, naturali o di origine artificiale, costituiscono infatti la componente prevalente della miscela e devono possedere specifiche caratteristiche fisiche, meccaniche e petrografiche. Granulometria adeguata, resistenza all'usura, forma e pulizia sono requisiti essenziali affinché si realizzi una struttura compatta, stabile e durevole nel tempo. La corretta selezione degli aggregati contribuisce non solo alla resistenza ai carichi e all'azione degli agenti atmosferici, ma anche alla lavorabilità del conglomerato durante la posa, influenzandone direttamente la qualità finale e il comportamento in esercizio.

Gli aggregati lapidei sono particelle granulari di origine minerale che trovano largo impiego nelle costruzioni stradali, sia in forma sciolta sia in combinazione con leganti di varia natura e tipologia. Il processo di qualificazione degli aggregati coinvolge diversi elementi, quali, la caratterizzazione del materiale attraverso lo svolgimento di prove sperimentali per la determinazione delle principali proprietà fisiche, chimiche e meccaniche, dall'altro, la definizione di opportuni criteri di classificazione e accettazione in relazione alla destinazione d'uso finale.

2.5.1 Origine litologica

Gli aggregati lapidei hanno origine dalle rocce e possono trovarsi in depositi naturali (soprattutto sotto forma di sabbie e ghiaie) formati attraverso un complesso insieme di fenomeni chimico-fisici, oppure essere prodotti mediante estrazione (e successiva trasformazione) da cava. Oltre agli aggregati lapidei esistono anche altri prodotti di origine artificiale o da riciclo, utilizzati in tutto o in parte come aggregati nelle costruzioni, si veda ad esempio l'utilizzo del materiale fresato ricavato dalle pavimentazioni esistenti o del polverino di gomma ottenuto dal recupero degli pneumatici dismessi.

In relazione alle rocce naturali impiegate nella produzione dei conglomerati bituminosi, esse possono essere classificate, in base alla loro genesi gologica, nelle seguenti categorie in base alla loro :

- ignee, derivanti dal raffreddamento di masse fuse incandescenti (*magma*). Possono essere a loro volta suddivise in *intrusive* e *vulcaniche*;
- sedimentarie, formate a seguito dell'accumulo di detriti;
- metamorfiche, generate dalla trasformazione di rocce preesistenti sotto l'azione della pressione o della temperatura, con un successivo processo di ricristallizzazione.

2.5.2 Cicli di produzione

Il ciclo di produzione degli aggregati lapidei destinati al confezionamento dei conglomerati bituminosi si configura come un processo articolato, volto a garantire il raggiungimento di specifici requisiti qualitativi e prestazionali.

La prima fase di tale ciclo consiste nel processo di estrazione (Figura 2.9) che avviene all'interno di una cava di prestito, opportunamente individuata e tale da presentare una formazione rocciosa di caratteristiche idonee al tipo di impiego previsto. L'operazione di estrazione avviene secondo una serie di successivi sbancamenti, effettuati a seconda dei casi con mezzi meccanici o mediante l'uso di esplosivi, realizzando di volta in volta un nuovo fronte di scavo.



Figura (2.9) – Fase di estrazione da cava a cielo aperto

La fase successiva consiste nel trasporto del materiale sbancato all'impianto di frantumazione. La scelta della modalità di trasporto (su strada o mediante ferrovia) è condizionata dalla distanza tra la zona di scavo e l'impianto, e dal fatto che i trasferimenti si svolgano esclusivamente all'interno dell'area di produzione (consentendo per esempio l'uso di mezzi speciali quali i *dumper*) o se sfruttino anche la viabilità ordinaria.

Il materiale estratto, generalmente caratterizzato da dimensioni elevate e da una distribuzione granulometrica non idonea all'impiego diretto, viene successivamente sottoposto a operazioni di frantumazione primaria, secondaria e, se necessario, terziaria (Figura 2.10). Queste fasi hanno lo scopo di ridurre progressivamente la pezzatura degli aggregati e di ottenere una forma più regolare, migliorando le proprietà di adesione al legante bituminoso e il comportamento meccanico della miscela. A seconda dell'utilizzo o meno di acqua, si distingue il processo di frantumazione per via secca da quello per via umida.



Figura 2.10 – Fase di frantumazione degli aggregati provenienti dalla cava

A valle delle operazioni di frantumazione, il materiale viene avviato alla vagliatura, processo mediante il quale gli aggregati vengono separati in classi granulometriche omogenee attraverso l'uso di vagli vibranti. Questa fase è fondamentale per garantire la corretta composizione granulometrica richiesta dal mix design del conglomerato bituminoso. Parallelamente, possono essere effettuate operazioni di lavaggio, finalizzate alla rimozione delle frazioni fini indesiderate (quali argille e limi) e di eventuali impurità organiche, che potrebbero compromettere l'adesione tra aggregato e bitume.

Successivamente, gli aggregati vengono stoccati (Figura 2.11) in cumuli distinti per classi granulometriche, adottando accorgimenti volti a prevenire fenomeni di segregazione e contaminazione. Il materiale così ottenuto è quindi sottoposto a controlli di qualità, che riguardano parametri quali la resistenza all'usura, la forma dei grani, l'assorbimento d'acqua e la pulizia superficiale.



Figura 2.11 – Fase di vagliatura e stoccaggio degli aggregati

2.5.3 Dimensioni e granulometria

Dal punto di vista dimensionale gli aggregati vengono distinti in grossi e fini. Esistono diversi criteri per definire ciascuna delle due categorie. La letteratura tradizionale indica come grossi gli aggregati trattenuti al vaglio di apertura pari a 4,75-5 mm (a seconda della serie di vagli adottata), mentre come fini quelli di dimensioni comprese tra il valore su indicato e il limite inferiore di 0,075 mm. La frazione minerale passante a quest'ultima dimensione costituisce una componente specifica denominata filler.

Nell'ambito di ciascuno dei due raggruppamenti suindicati, è possibile operare un'ulteriore differenziazione individuando diverse classi dimensionali. Poiché gli aggregati sono formati da una molteplicità di elementi, ogni classe è generalmente contraddistinta da un intervallo nominale compreso tra due dimensioni caratteristiche entro cui è contenuta gran parte dei granuli (d/D). Quanto più è stretto l'intervallo, tanto più la classe può definirsi uniforme fino al caso estremo di classe monodimensionale o monogranulare con d e D corrispondenti a due vagli consecutivi. La principale proprietà che caratterizza una miscela di aggregati è la sua distribuzione granulometrica, ovvero la percentuale relativa, normalmente in peso, di elementi corrispondenti a ciascuna dimensione. La granulometria influenza direttamente le prestazioni del prodotto finale (sia esso un conglomerato bituminoso, cementizio o un misto granulare legato o non) in quanto a essa si legano la lavorabilità, le proprietà volumetriche, il grado di compattezza, la risposta meccanica, la durabilità. L'analisi granulometrica viene effettuata sottoponendo un campione rappresentativo degli aggregati a un processo di vagliatura, attraverso l'impiego di una opportuna serie di vagli a maglie quadre, denominati *stacci*.

2.5.4 Distribuzione granulometrica

La distribuzione granulometrica degli aggregati costituisce un elemento fondamentale nella progettazione dei conglomerati bituminosi, in quanto definisce il modo in cui le diverse classi dimensionali delle particelle si combinano all'interno della miscela. Essa rappresenta la base per ottenere una struttura interna compatta e stabile, capace di garantire adeguate prestazioni meccaniche e funzionali nel tempo.

Gli aggregati utilizzati per il confezionamento del conglomerato bituminoso sono rocce sciolte, così come si trovano in natura o che sono diventate tali a seguito delle operazioni di scavo e di frantumazione. La distribuzione granulometrica degli aggregati è fra le principali caratteristiche di identificazione delle rocce sciolte determinandone il comportamento meccanico e idraulico.

La distribuzione granulometrica di una terra è definita dalla distribuzione dimensionale delle particelle elementari che la costituiscono. Essa viene determinata sperimentalmente mediante l'analisi granulometrica eseguita in laboratorio, attraverso l'impiego di metodologie distinte in funzione della dimensione dei grani.

In particolare, per le frazioni più grossolane (con diametro superiore a 0,063 mm) si ricorre alla prova di setacciatura, mentre per le frazioni più fini (con diametro inferiore a 0,063 mm) si applicano metodi basati sulla sedimentazione in un fluido.

2.5.5 Analisi granulometrica mediante setacciatura

L'analisi granulometrica per setacciatura avviene utilizzando attualmente setacci dotati di aperture quadrate (Figura 2.12), in accordo con la Norma UNI CEN ISO/TS 17892-4 [6]. Tale norma richiede che per descrivere adeguatamente la distribuzione granulometrica di una terra di dimensioni comprese tra 125 e 0,063 mm siano impiegati non meno di 12 setacci scelti tra le serie riportate nelle specifiche ISO 565 [7] e ISO 3310-1 [8]. In campo internazionale viene spesso utilizzata la serie ASTM

costituita da setacci di apertura che varia da 0,037 mm (operativamente da 0,074 mm) a 127,0 mm.



Figura 2.12 – Setacci con aperture quadrate

Alcuni capitoli tuttora vigenti prescrivono, per la determinazione della distribuzione granulometrica di una terra, l'utilizzo congiunto di setacci a maglia quadra (per le frazioni di dimensioni minori o uguali a 2 mm) e di crivelli dotati di aperture circolari (Figura 2.13) (per le frazioni di dimensioni maggiori di 2 mm). In questo caso occorre considerare che al diametro dei fori dei crivelli si applica, per essere ricondotto alla dimensione nominale dei setacci corrispondenti, un fattore di equivalenza convenzionalmente assunto pari a 0,8.



Figura 2.13 – Crivelli con aperture circolari

Tabella 2.2

Setacci maggiormente utilizzati per l'analisi granulometrica degli aggregati

Serie ASTM		Serie ISO 565 – ISO 3310
Setaccio	Apertura [mm]	Apertura [mm]
5"	127	125
4"	101,6	90
3"	76,2	75
2 ½"	63,5	63
2"	50,8	45
1"	25,4	31,5
¾"	19,1	22,4
½"	12,7	16
⅜"	9,52	8
4	4,76	4
10	2	2
18	1	1
40	0,42	0,5
80	0,177	0,18
120	0,125	0,125
200	0,074	0,063

L'analisi granulometrica per setacciatura va effettuata, in ogni caso, su materiale costituito da elementi di dimensioni inferiori a 125 mm. Affinché il campione sottoposto a prova sia effettivamente rappresentativo del materiale oggetto di studio occorre che la sua massa, dopo essiccazione in stufa a 105 °C (in assenza di materie suscettibili al calore, come la sostanza organica e altri materiali alterabili) oppure a 50 °C (nel caso più generale), sia compresa tra 200 e 500 volte la dimensione nominale massima (in mm) degli elementi della terra D_{max} (dimensione corrispondente al 95% di passante nella curva granulometrica).

La setacciatura può essere eseguita secondo differenti modalità operative, in funzione delle caratteristiche granulometriche del materiale analizzato. In particolare, essa può essere condotta:

- **a secco**, nel caso di terre granulari a prevalente frazione grossolana, per le quali la presenza di componenti limo-argillose risulta trascurabile o nulla;
- **per via umida**, qualora il materiale presenti una quantità significativa di frazioni fini (limo e/o argilla).

In quest'ultimo caso, il campione deve essere preliminarmente sospeso in acqua al fine di favorire la dispersione delle particelle fini. Tale operazione è generalmente accompagnata da un'adeguata agitazione meccanica e dall'impiego di agenti disperdenti, allo scopo di promuovere la completa disaggregazione del materiale e garantire una separazione efficace delle diverse classi granulometriche.

Per l'esecuzione dell'analisi granulometrica mediante setacciatura, si procede preliminarmente alla predisposizione di una serie di setacci disposti in colonna, con aperture progressivamente decrescenti dall'alto verso il basso. È necessario selezionare il primo setaccio, caratterizzato dall'apertura maggiore, in modo tale che l'intero campione risulti completamente passante attraverso di esso.

Al termine delle operazioni di vagliatura, eseguite manualmente o mediante vibrovaglio, e previo essiccamento del materiale trattenuto, si determinano i seguenti parametri:

- la massa secca T_i del materiale trattenuto sul setaccio i -esimo, corrispondente alla specifica dimensione di apertura;
- la massa cumulata P_i del materiale passante attraverso il setaccio considerato;
- la percentuale cumulativa di passante, calcolata rispetto alla massa totale iniziale del campione.

Tali grandezze costituiscono la base per la successiva elaborazione della curva granulometrica del materiale analizzato.

2.5.6 Analisi granulometrica per sedimentazione

La distribuzione granulometrica delle frazioni di dimensioni inferiori a $0,05 \div 0,075$ mm viene determinata mediante sedimentazione, applicando la legge di Stokes. Secondo tale principio la velocità di caduta (sedimentazione) di una particella in un fluido dipende dalla sua dimensione, densità e viscosità del fluido; dunque, particelle più grandi sedimentano più velocemente, mentre particelle più piccole restano sospese più a lungo (Figura 2.14).

Misurando quanto materiale resta in sospensione nel tempo in dispersione acquosa e a temperatura costante, si ricava la distribuzione granulometrica della frazione fine. Il metodo più diffuso è quello che mette in relazione la variazione delle dimensioni delle particelle di terra con la variazione della densità della soluzione acqua-terra misurata con cadenza temporale di tipo logaritmico, mediante areometro.

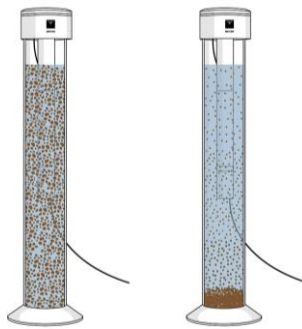


Figura 2.14 – Esempio di metodo di sedimentazione per l'analisi granulometrica

2.5.7 Curva granulometrica

Come accennato in precedenza il risultato delle analisi granulometriche sono le *curve granulometriche*, esse rappresentano graficamente la distribuzione dimensionale delle particelle solide che costituiscono la miscela, quali ghiaie, sabbie e filler. In particolare, esse riportano la percentuale in peso di materiale passante attraverso una serie di setacci normalizzati, consentendo di descrivere in modo sintetico la composizione granulometrica dell'insieme degli aggregati.

Nel caso dei conglomerati bituminosi, queste curve assumono un'importanza fondamentale perché permettono di progettare e controllare la struttura interna della miscela, influenzandone direttamente le prestazioni. Una corretta distribuzione granulometrica consente infatti di ottenere un adeguato scheletro lapideo, garantendo resistenza meccanica, stabilità, durabilità e lavorabilità del conglomerato durante la posa in opera. Per questo motivo, la curva granulometrica costituisce uno degli strumenti principali nella progettazione e nel controllo degli aggregati destinati alla produzione di conglomerati bituminosi.

Le curve granulometriche sono costruite riportando, in un piano cartesiano, la relazione tra il diametro delle particelle e la percentuale in peso del materiale avente dimensione inferiore a tale diametro.

In particolare, l'asse delle ascisse è costituito dai diametri dei setacci della serie granulometrica adottata, espressi generalmente in millimetri e disposti secondo una scala logaritmica, al fine di consentire una rappresentazione efficace di intervalli dimensionali molto ampi, che comprendono sia le frazioni grossolane sia quelle fini. L'asse delle ordinate riporta invece la percentuale cumulata di passante, ossia la quantità, espressa in percentuale, di aggregato che attraversa ciascun setaccio rispetto alla massa totale del campione (Figura 2.15).

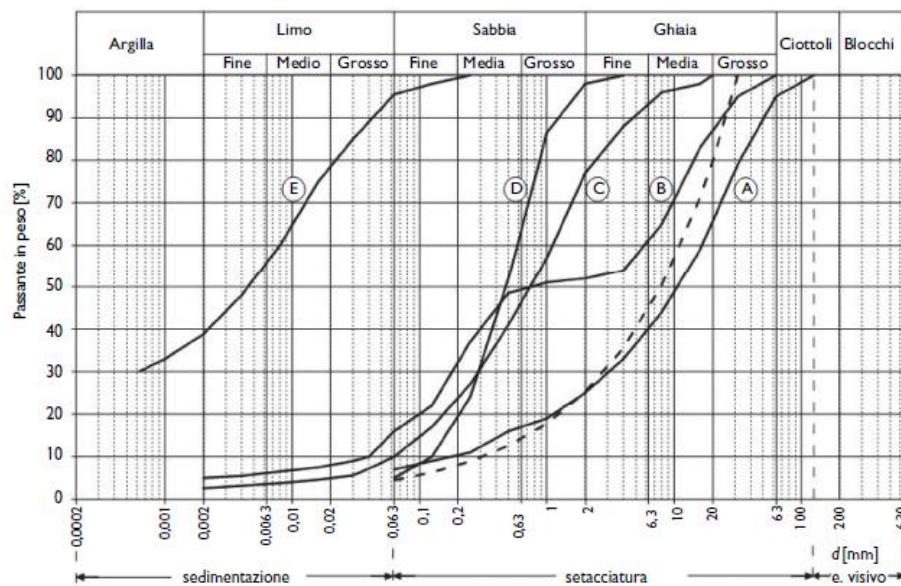


Figura 2.15 – Esempi di curve granulometriche

Esse generalmente vengono distinte in *ben graduate* (Figura 2.16) e *mal graduate* (Figura 2.17), a seconda di come sono distribuite le particelle particella di un ammasso sciolto di aggregati. Alla prima categoria appartengono quelle terre le cui particelle sono distribuite in maniera continua in un intervallo abbastanza ampio di dimensioni, mentre alla seconda categoria appartengono le terre che presentano un eccesso oppure una carenza di una o più classi dimensionali.

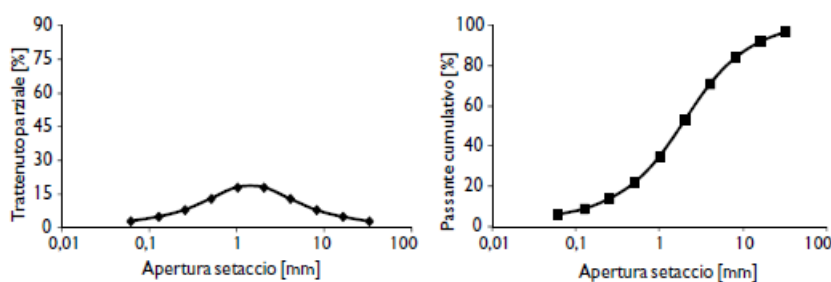


Figura 2.16 - Curva granulometrica ben graduata (simmetrica):

(a) distribuzione di frequenza;

(b) distribuzione cumulata

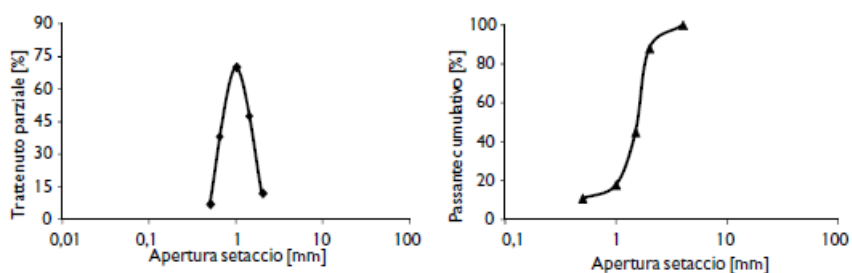


Figura 2.17 - Curva granulometrica mal graduata (uniforme):

(a) distribuzione di frequenza;

(b) distribuzione cumulata

2.6 Conglomerato bituminoso

I conglomerati bituminosi sono materiali compositi ottenuti dalla miscelazione di aggregati lapidei, legante bituminoso, filler ed eventuali additivi. Il campo di impiego più diffuso dei conglomerati bituminosi è di gran lunga quello delle pavimentazioni flessibili o semirigide. Come già anticipato in precedenza, i conglomerati presentano caratteristiche differenti in relazione allo strato della pavimentazione cui sono destinati (base, *binder* e usura). Ciò in ordine a composizione, caratteristiche volumetriche e proprietà meccaniche. Gli aspetti principali legati alla composizione riguardano l'assortimento granulometrico degli aggregati e il dosaggio del legante. La miscela lapidea deve rispettare opportuni limiti dimensionali in modo da rientrare all'interno di un fuso granulometrico, definito sulla base di una curva di distribuzione ottimale. Il filler, pur costituendo una frazione specifica (passante al vaglio di apertura pari a 0,075 mm oppure 0,063 mm) della distribuzione granulometrica degli aggregati, viene considerato come un componente a sé stante e infatti all'atto della produzione viene aggiunto separatamente rispetto alle restanti classi di aggregato tramite una linea dedicata.

La composizione della miscela può prevedere anche la presenza di conglomerato riciclato (*RAP - Reclaimed Asphalt Pavemen*), comunemente chiamato *fresato*, proveniente dalla fresatura di pavimentazioni preesistenti.

Anche per tale componente la percentuale di utilizzo deve essere stabilita sulla base di un attento studio di miscela, tenendo presente che il suo valore viene comunque mantenuto al di sotto di certi limiti che orientativamente possono essere posti pari a:

- 30% (in peso rispetto agli aggregati di primo impiego) per strati di base;
- 25% per strati di collegamento;
- 15% per strati di usura.

Inoltre, nella miscela possono essere aggiunti additivi che consentono di migliorare le prestazioni complessive del materiale. Essi possono essere prodotti di origine naturale o artificiale e il loro dosaggio all'interno del conglomerato varia a seconda delle condizioni di impiego, della natura degli aggregati e delle caratteristiche finali del prodotto e va anch'esso definito nell'ambito dello studio della miscela. Tra i prodotti più diffusi si hanno:

- materiali polimerici di tipo elastomerico o plastomerico, aggiunti secondo un processo distinto rispetto a quello di modifica del legante;
- fibre sintetiche o naturali (in poliestere, polipropilene, cellulosa), generalmente usate per conferire stabilità al mastice bituminoso;
- agenti antiossidanti;
- attivanti d'adesione, costituiti da sostanze tensioattive che favoriscono il legame
- bitume-aggregato;
- attivanti chimici funzionali, usati per rigenerare il bitume invecchiato del conglomerato riciclato, quando previsto.

2.6.1 Processo di produzione del conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso rappresenta uno dei materiali fondamentali nella realizzazione delle infrastrutture stradali moderne. La sua produzione deriva da un processo industriale controllato che combina aggregati lapidei e legante bituminoso. Ogni fase, dalla selezione delle materie prime alla miscelazione, influisce direttamente sulle prestazioni finali del prodotto. Comprendere questo processo è essenziale per garantire qualità, durabilità e sicurezza nelle pavimentazioni.

La produzione dei conglomerati bituminosi può essere realizzata mediante tre principali tipologie di impianti: impianti fissi, impianti mobili e impianti semoventi. Le prime due categorie possono ulteriormente essere classificate in impianti a funzionamento continuo e impianti a funzionamento discontinuo.

Gli impianti continui, generalmente caratterizzati da costi di investimento inferiori, si distinguono per una maggiore semplicità gestionale e per esigenze manutentive ridotte rispetto agli impianti discontinui. Tuttavia, nel contesto nazionale, essi risultano scarsamente diffusi. Tale limitata adozione è riconducibile alla loro natura operativa, che richiede cicli produttivi continui, privi di interruzioni anche di breve durata, e una limitata variabilità nella tipologia di miscela prodotta.

Al contrario, gli impianti fissi operano frequentemente a servizio di una pluralità di cantieri, spesso di dimensioni contenute, e sono chiamati a soddisfare richieste eterogenee in termini di composizione delle miscele, anche nell'arco della stessa giornata lavorativa. Tali esigenze produttive possono essere efficacemente soddisfatte unicamente mediante impianti di tipo discontinuo, i quali, grazie alla loro maggiore flessibilità operativa, consentono un controllo più accurato del processo produttivo e una più agevole adattabilità alle diverse specifiche richieste.

2.6.2 Impianti di tipo discontinuo

La discontinuità del processo produttivo è caratterizzata dalla modalità secondo cui vengono prodotte le miscele, in generale ogni 40/50 secondi. Questa tipologia di impianto è più facile da controllare ed è quello più diffuso in quanto permette la massima flessibilità di utilizzo, grande versatilità ed è ideale per servire un territorio dove sono richieste diverse formule di produzione e la massima prontezza nel servizio alla clientela.

Il processo produttivo di un impianto discontinuo ha inizio dalle vasche o dai silos di stoccaggio degli aggregati, poste di solito ai margini dell'impianto, dove all'interno di ognuno di essi si ha una specifica pezzatura (classe) di aggregati. Da un minimo di 4 predosatori, gli impianti moderni possono raggiungere un numero ben più alto, a

seconda della flessibilità e dell'accuratezza della curva granulometrica che si vuole ottenere.

Come per gli aggregati vergini, anche gli aggregati provenienti dal riciclo delle pavimentazioni che vengono dismesse (fresato) vengono suddivisi e stoccati in base alla classe granulometrica. Tali aggregati, mediante l'utilizzo di un nastro trasportatore vengono portati all'interno del tamburo essiccatore, in proporzioni coerenti con la distribuzione granulometrica della miscela obiettivo. Da qui ha inizio il vero e proprio processo produttivo del conglomerato.

Il tamburo (o cilindro) essiccatore non è altro che un cilindro rotante, che al suo interno possiede una apposita palettatura che ha lo scopo di sollevare il materiale vergine, riscaldandolo per contatto con l'aria calda prodotta da un bruciatore. Tale processo è necessario al fine di rimuovere l'eventuale acqua presente all'interno degli aggregati. All'interno dell'essiccatore, il calore generato dalla fiamma viene trasferito agli inerti per irraggiamento termico. Durante tale processo, è inevitabile la formazione di significative quantità di gas, polveri e prodotti della combustione all'interno del tamburo. Questi effluenti vengono successivamente convogliati e trattati mediante un sistema di filtrazione a maniche, al fine di ridurre il contenuto di particolato, per poi essere rilasciati in atmosfera nel rispetto delle normative vigenti.

Il materiale trattenuto dal filtro viene depositato sul fondo e raccolto mediante un'apposita coclea che lo invia al silo di stoccaggio per essere poi usato come filler nel processo di miscelazione.

Nella fase successiva del processo produttivo, li aggregati provenienti dal cilindro vengono trasportati per mezzo di un elevatore a tazze nella parte alta della torre di miscelazione ove trovano alloggiamento l'unità di selezione dotata di vagli vibranti, i contenitori di stoccaggio, il sistema di pesatura e il mescolatore. I vagli vibranti, disposti in ordine di dimensione decrescente, provvedono alla cosiddetta riclassificazione degli aggregati, separando le frazioni progressivamente trattenute per convogliarle nei rispettivi contenitori. Le frazioni granulometriche così rifelezionate vengono successivamente combinate, attraverso il sistema di pesatura, per essere immesse nel mescolatore in proporzioni tali da produrre la formulazione di progetto. Il mescolatore è costituito da una camera recante due alberi paralleli controrotanti, dotati di bracci muniti a loro volta di palette in corrispondenza delle estremità.

Il bitume necessario alla produzione è avviato alla vasca di pesatura, dove, in seguito, una pompa lo preleva e lo invia al mescolatore attraverso la barra di spruzzatura. Il ciclo di produzione prevede che gli inerti entrino per primi nel mescolatore. In seguito, ed in sequenza con calcolati ritardi, entrano il bitume, eventuali additivi ed il filler. Al termine della mescolazione, il conglomerato bituminoso è già pronto per la stesa, il mescolatore si apre e lo fa cadere nella benna di carico che lo trasporta nel silo di stoccaggio del prodotto finito.

2.6.3 Impianti di tipo continuo

Gli impianti continui sono così chiamati perché non vi è interruzione (o discontinuità) nel processo produttivo del conglomerato bituminoso. Si possono distinguere in due tipologie: quelli comunemente noti come *drum mixer*, caratterizzati da un processo produttivo che si svolge in un'unica unità operativa (il cilindro essiccatore – miscelatore) e quelli caratterizzati dalla presenza di un sistema di *miscelazione esterno* posto a valle del cilindro essiccatore.

In un impianto di produzione di tipo ***drum mixer*** gli aggregati arrivano in impianto e vengono stoccati in apposite tramogge o sili in funzione della classe granulometrica degli aggregati stessi. Non essendo prevista una fase di rielezione degli aggregati medesimi, è necessario porre particolare cura affinché le varie classi non subiscano contaminazioni reciproche o da parte di materiali estranei. Al disotto delle tramogge sono posizionati dei nastri estrattori muniti di celle di carico. La variazione di velocità dei nastri permette di dosare la quantità di materiale prelevato da ogni tramoggia.

Gli aggregati così dosati vengono scaricati su un nastro collettore, dotato di un sistema di pesatura automatica per il controllo continuo della loro massa, e vengono convogliati all'interno del cilindro essiccatore-miscelatore. Quest'ultimo opera in modalità a flussi “concorrenti”, secondo cui gli aggregati, immessi nel tamburo dal lato del bruciatore, vengono progressivamente essiccati e riscaldati mentre scorrono verso il lato opposto di fuoriuscita, allontanandosi dunque dalla fiamma in modo

“concorde” con i gas di scarico al fine di mantenere il punto di ingresso del legante a una sufficiente distanza dalla fiamma (per evitarne la combustione o l'eccessiva ossidazione). La miscela lapidea rimane all'interno del cilindro per un tempo generalmente compreso tra 3 e 4 minuti, in relazione alla sua lunghezza, alla velocità di rotazione, all'angolo di inclinazione, alle dimensioni degli aggregati.

Prelevato dalla cisterna, il legante viene pompato nel drum mixer a circa un terzo della sua lunghezza (a partire dal lato dello scarico) mentre il filler minerale, costituito in tutto o in parte, di polveri recuperate dal filtraggio dei gas di scarico, può essere immesso sia a monte sia a valle di tale punto.

Negli impianti continui con *mescolatore esterno*, a differenza dei precedenti, il cilindro essiccatore funziona a flussi “controcorrente”: gli aggregati entrano dal lato opposto rispetto al bruciatore e scorrono in senso contrario alla direzione dei gas di scarico (flussi opposti), ottenendo in tal modo un rendimento termico sensibilmente più elevato in ragione del fatto che, separando la fase di essiccazione da quella di miscelazione, viene meno il vincolo di tenere a sufficiente distanza il legante dalla fiamma.

In questo tipo di impianto l'unità di miscelazione è costituita da due alberi controrotanti dotati di palette opportunamente sagomate, che provvedono a mescolare gli aggregati caldi (provenienti dal tamburo) col bitume, col filler e con eventuali additivi, in modo da realizzare un flusso di produzione ininterrotto.

2.7 Processo di compattazione in sito

Come anticipato nell'introduzione della presente tesi, il processo di compattazione costituisce la fase conclusiva della realizzazione di una nuova pavimentazione stradale e viene eseguito successivamente alla stesa del conglomerato bituminoso. Essa influisce inoltre sulla percentuale di vuoti residui all'interno della miscela, condizionando la possibilità di infiltrazione dell'acqua e l'insorgere di fenomeni di degrado, quali l'ormaiamento e la fessurazione.

Poiché tale fase rappresenta il fulcro della presente ricerca, nel prosieguo del paragrafo saranno illustrate le principali metodologie operative adottate per la sua esecuzione.

Il processo di compattazione si realizza operando "a caldo", quando cioè il materiale si trova a una temperatura tale per cui la viscosità del legante ne consente la lavorazione (la finestra temporale entro cui è possibile effettuare la compattazione in modo efficace è variabile e dipende principalmente dalle condizioni climatiche, dal tipo e dalla temperatura del conglomerato bituminoso, nonché dai mezzi d'opera impiegati). Subito dopo la stesa, il conglomerato bituminoso deve essere costipato allo scopo di ridurre il volume dei vuoti interni e favorire in tal modo l'incremento di resistenze meccaniche che si genera col mutuo avvicinamento delle particelle che lo compongono. Ciò avviene ordinariamente per mezzo di compattatori a rullo metallico a doppio tamburo, detti tandem, a ruote gommate, oppure combinati ferro – gomma.

Le azioni coinvolte nel processo di addensamento di uno strato in conglomerato bituminoso sono varie e concorrono tutte insieme a ridurre il contenuto di vuoti del materiale fino ai valori ottimali necessari per garantire le caratteristiche meccaniche dello strato. Oltre all'azione statica dovuta al peso proprio del sistema di compattazione (metallico o pneumatico), vanno messe in conto la manipolazione legata alle forze non verticali trasmesse allo strato e le eventuali azioni dinamiche di impatto e vibrazione.

La scelta del mezzo costipante è legata sia all'aspetto prettamente tecnico (massa, carico lineare, tipologia), sia a quello economico di produzione, secondo il quale è comunemente accettato che le dimensioni trasversali del compattatore siano tali da poter coprire la sezione in lavorazione con non più di tre passate sovrapposte. Nei casi

in cui ciò non sia possibile, e l'importanza della costruzione lo giustifichi, è consigliabile l'affiancamento di più mezzi compattatori.

Il processo di compattazione dei conglomerati bituminosi può suddividersi in tre fasi **iniziale**, **intermedia** e di **finitura** ciascuna delle quali si caratterizza per mezzi e tecniche differenti l'una dall'altra.

- Nella **fase iniziale** è opportuno che si raggiunga la maggior parte del grado di addensamento finale richiesto (in genere oltre il 90%) il che impone che si operi nelle condizioni di temperatura massima del materiale, tali per cui non si verifichino distorsioni anomale dello strato (è bene che il compattatore proceda a breve distanza dalla finitrice e con la stessa produzione oraria). In tale fase sono comunemente impiegati compattatori a rullo vibrante limitando l'uso di compattatori pneumatici agli strati di base e binder.
- La **fase intermedia** ha lo scopo di “chiudere la miscela” in modo da raggiungere il grado di addensamento finale dello strato eliminando, al contempo, le tracce prodotte dai compattatori nella fase precedente. È essenziale che il materiale abbia una temperatura tale da renderlo ancora lavorabile e cioè che gli aggregati lapidei possano subire degli spostamenti relativi sotto l'azione meccanica dei mezzi. Molto spesso la compattazione intermedia è effettuata con compattatori a ruote pneumatiche in grado di esercitare elevate forze statiche senza somministrare forze di impatto. In questa fase, a differenza di quella iniziale, è possibile, in alternativa, impiegare i compattatori a rulli metallici vibranti, ma occorre limitare l'azione vibrante operando ad alte frequenze di oscillazione abbinate a basse ampiezze per evitare la formazione di segni e fessure superficiali o, nei casi limite, la vera e propria frantumazione degli aggregati (per il fatto che la miscela ha già sviluppato una certa rigidità).
- La **fase di finitura** ha lo scopo di rimuovere ogni traccia di stesa o segno di arresto, in modo da ottenere una superficie omogenea e regolare. Spesso tale operazione viene eseguita a distanza di circa un'ora dalla posa del conglomerato impiegando compattatori a rulli in modalità esclusivamente statica.

Nella stesa si deve porre la massima cura alla formazione dei giunti longitudinali preferibilmente ottenuti mediante tempestivo affiancamento di una strisciata alla precedente.

2.8 Metodi di compattazione in laboratorio

La compattazione è il metodo più semplice ed economico per aumentare la durata della pavimentazione stradale e migliorarne la capacità portante. La miscela deve essere compattata al grado desiderato aumentando la densità e riducendo così la porosità. [7] Nel progetto delle miscele la valutazione della lavorabilità occupa un ruolo centrale sia per quanto concerne la definizione delle corrette modalità operative, sia per i relativi criteri di controllo. Ciò richiede l'utilizzo di opportune metodologie sperimentali, in grado di simulare i meccanismi di addensamento generati dai mezzi di cantiere e di ottenere dei campioni rappresentativi del materiale posto in opera, ai fini della successiva caratterizzazione prestazionale.

Esistono diverse tecniche per la compattazione in laboratorio dei conglomerati bituminosi; tra le attrezzature più comuni attualmente disponibili si citano, in particolare:

- compattatori a piastra;
- compattatori a rullo;
- martello Marshall;
- pressa giratoria.

La tecnica Marshall ha rappresentato per lungo tempo il sistema più diffuso per la compattazione in laboratorio dei conglomerati bituminosi. L'addensamento avviene per mezzo di un maglio battente avente peso pari a 7850 ± 50 g, lasciato cadere ripetutamente da una altezza predefinita pari a 7850 ± 50 mm (norma UNI EN 12697-30). La procedura standard richiede un prestabilito numero di colpi su ciascun lato del campione. I valori del numero di colpi comunemente impiegati risultano pari a 75 e 50. Nonostante tale metodologia di compattazione sia stata per diverso tempo la più utilizzata per effettuare prove di laboratorio, tale tecnica presenta dei grossi limiti. In primo luogo, infatti, essa determina condizioni di addensamento ben lontane da quelle che si verificano durante la rullatura in situ in quanto legate a una azione impulsiva ed esclusivamente verticale.

Inoltre, di norma non viene monitorato l'evolversi del processo di compattazione durante lo svolgimento della prova (essenziale ai fini della valutazione della lavorabilità) ma solo le caratteristiche finali del campione.

Al contrario, il metodo basato sulla pressa a taglio giratorio (*Gyratory Shear Compactor*) consente di superare le limitazioni sopra indicate, coniugando i vantaggi della semplicità esecutiva con l'esigenza di riprodurre condizioni di addensamento rappresentative di quelle reali. Per tali ragioni essa costituisce attualmente il metodo più utilizzato nell'ambito degli studi di miscela di tipo razionale.

Il principio di base consiste nel sottoporre il materiale, contenuto all'interno di una fustella cilindrica di dimensioni note e inclinata rispetto alla verticale, all'azione combinata di una pressione normale applicata per mezzo di un pistone a comando idraulico e di una sollecitazione di taglio, generata per effetto della rotazione della fustella stessa intorno all'asse verticale. Si realizza in tal modo un meccanismo di compattazione della miscela analogo a quello prodotto dall'avanzamento del rullo (il cosiddetto effetto "di impasto") che porta a una riorganizzazione delle particelle attraverso movimenti di traslazione e rotazione reciproci. In condizioni standard si adotta un valore della pressione di 600 kPa, una velocità di rotazione di 30 giri/min e un angolo di inclinazione pari a 1,25; sono previste, a seconda dei casi, fustelle del diametro di 100, 150 e 160 mm (norma UNI EN 12697-31).

Diversi studi dimostrano che l'utilizzo della pressa giratoria rispetto alla compattazione Marshall sia migliore. Un esempio è lo studio condotto da Cheng et al. [8] nel quale hanno evidenziato che i provini realizzati mediante compattatore giratorio mostrano prestazioni superiori in termini di stabilità dinamica e resistenza a trazione rispetto a quelli confezionati con il metodo Marshall.

Per queste motivazioni tutti i provini realizzati nella campagna sperimentale, dalla quale questa tesi trae fondamento, sono stati compattati mediante l'utilizzo di questo metodo, in accordo con quanto riportato all'interno della norma EN 12697-31.

2.9 Utilizzo di inerti intelligenti per la valutazione della compattazione

I *sensori granulometrici* o *inerti intelligenti* sono stati recentemente introdotti nell'ingegneria delle pavimentazioni per studiare la lavorabilità delle miscele di asfalto.

Questo tipo di sensore è stato introdotto nell'ingegneria civile per studiare il movimento delle particelle di ballast ferroviario [9,10]. In queste prime applicazioni, è stato utilizzato un guscio esterno simile a una particella di ballast reale con una dimensione nominale di 60 mm.

Le dimensioni dei sensori sono state poi ridotte per essere implementate nella ricerca sulle miscele di asfalto. Questa tecnologia innovativa è stata inizialmente utilizzata per studiare la cinematica delle particelle di aggregato grosso durante la compattazione rotatoria in laboratorio [11].

Poiché i sensori si sono dimostrati efficaci nello studio del comportamento di compattazione delle miscele di asfalto, il loro utilizzo nell'ingegneria delle pavimentazioni è stato recentemente standardizzato dall'ASTM D8541 [12].

2.9.1 Esperienze in laboratorio

In laboratorio vengono utilizzati diversi metodi di compattazione per studiare il processo di densificazione, come quelli descritti nel paragrafo precedente. Tuttavia, le proprietà finali della miscela, sebbene idealmente governate unicamente dalla sua composizione e volumetria, in pratica sono fortemente influenzate dal metodo e dalle condizioni di compattazione, rendendo il processo di densificazione particolarmente complesso da analizzare. Questo è il motivo per cui il processo di compattazione sul campo si basa ancora in gran parte sull'esperienza pratica, che spesso porta a problemi di prestazioni della pavimentazione a lungo termine [13].

Inoltre, al giorno d'oggi non esistono ancora metodi di controllo diretto, continuo e in tempo reale della compattazione in situ.

Per superare la difficoltà legata al mancato raggiungimento, in cantiere, delle stesse proprietà volumetriche ottenute in laboratorio, è stato sviluppato uno specifico sensore chiamato “*Inerte intelligente*” o “*Sensore granulometrico*”, in grado di fornire dati in tempo reale che permettono di comprendere ed analizzare il comportamento della miscela bituminosa durante la fase di compattazione. Questi sensori sono tipicamente costituiti da un guscio esterno di polimero termoplastico e da un sensore wireless interno in grado di misurare accelerazioni, rotazioni e temperatura. I dati raccolti vengono quindi trasmessi in tempo reale a un dispositivo digitale tramite tecnologia Bluetooth [13].

I sensori di dimensione delle particelle consentono il monitoraggio di numerose variabili durante il processo di compattazione. Essi sono stati impiegati, ad esempio, per evidenziare l'influenza della dimensione e della distribuzione granulometrica degli aggregati sul comportamento in fase di compattazione [14], nonché per analizzare gli effetti della temperatura di compattazione e dell'utilizzo di additivi per asfalti tiepidi (Warm Mix Asphalt) sulla lavorabilità delle miscele [15,16].

Inoltre, tale tecnologia è stata estesa allo studio di altri materiali impiegati nelle pavimentazioni, tra cui aggregati non legati per strati di fondazione [17,18] e miscele riciclate a freddo [19].

2.9.2 Esperienze in sito

La compattazione costituisce una fase fondamentale nella realizzazione delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso; tuttavia, le tecnologie per la valutazione in tempo reale della compattezza mediante approcci non distruttivi risultano ancora limitate e frequentemente basate su criteri empirici. Numerosi studi condotti in sito hanno affrontato tale problematica attraverso l'impiego di sensori intelligenti, finalizzati al monitoraggio in tempo reale del movimento delle particelle

e della risposta dinamica delle miscele bituminose durante il processo di compattazione.

Le prime ricerche basate sull'utilizzo di sensori particellari nelle compattazioni effettuate in situ hanno evidenziato come le differenti tipologie di rulli influenzino in maniera distinta il movimento delle particelle: i rulli statici e vibranti determinano prevalentemente spostamenti lungo la direzione verticale, mentre i rulli gommati inducono, oltre a tali movimenti, anche rotazioni e traslazioni orizzontali, favorendo una compattazione più omogenea.

Le simulazioni di laboratorio condotte mediante compattatori giratori hanno mostrato una parziale capacità di riprodurre l'effetto di impastamento tipico dei rulli gommati, mentre la compattazione Marshall risulta più rappresentativa del comportamento indotto dai rulli vibranti.

Tali studi sperimentali hanno altresì confermato l'efficacia dell'impiego di sensori nel monitoraggio in tempo reale dell'incremento di densità e del fenomeno di incastro degli aggregati, evidenziando il potenziale della compattazione intelligente quale strumento per il miglioramento del controllo di qualità delle pavimentazioni stradali [20,21].

È stata inoltre riscontrata una marcata correlazione lineare tra l'accelerazione del tamburo vibrante e le tensioni verticali all'interno della miscela, nonché tra queste ultime e il grado di compattazione rilevato mediante compattazione girella. Tali evidenze confermano che le misure dinamiche interne possono essere efficacemente impiegate per la valutazione in tempo reale della compattezza, anche in condizioni sperimentali differenti [22].

Studi più recenti hanno ulteriormente approfondito la relazione tra l'accelerazione delle particelle e il grado di compattazione, evidenziando come il tamburo vibrante risulti particolarmente efficace nell'indurre azioni lungo la direzione verticale. Inoltre, è emerso che l'ampiezza dell'accelerazione triassiale può essere utilizzata come parametro empirico per la stima della densità in situ.

Tali risultati contribuiscono a una migliore comprensione dei meccanismi di compattazione degli strati superficiali in conglomerato bituminoso e forniscono solide

basi applicative per l'ottimizzazione delle attività di controllo della qualità e per l'implementazione di tecniche di compattazione intelligente in ambito di cantiere [23,24].

2.10 Realizzazione di strati in conglomerato bituminoso con spessori maggiori

La compattazione delle miscele bituminose costituisce una fase determinante nel processo di realizzazione delle pavimentazioni stradali, in quanto incide in modo significativo sulle prestazioni meccaniche e sulla durabilità nel lungo periodo. Il conseguimento dei valori di densità di progetto e del contenuto ottimale di vuoti d'aria risulta essenziale per garantire un'adeguata capacità portante e una sufficiente resistenza alle deformazioni permanenti.

Lo spessore dello strato rappresenta un parametro progettuale di fondamentale rilevanza; sebbene l'impiego di strati di grande spessore (thick lift) consenta una razionalizzazione delle operazioni costruttive e una riduzione dei costi, l'attenzione della comunità scientifica si è focalizzata sulla possibilità di assicurare un'efficace compattazione anche in presenza di spessori elevati, senza compromettere le prestazioni della pavimentazione.

In tale contesto, i sensori granulometrici hanno evidenziato un significativo potenziale nella valutazione della lavorabilità durante la compattazione giratoria, offrendo una prospettiva innovativa di analisi del processo basata sul comportamento degli aggregati.

La definizione dello spessore degli strati rappresenta un elemento di primaria importanza nella progettazione e realizzazione delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Le normative tecniche prevedono generalmente uno spessore minimo pari a circa tre volte la dimensione massima nominale dell'aggregato (NMA). Al contempo, vengono stabiliti limiti superiori allo spessore applicabile, al fine di

prevenire fenomeni di compattazione non uniforme o inadeguata, nonché potenziali ripercussioni negative sul comfort di marcia e sui tempi di raffreddamento della miscela.

Nonostante tali limitazioni, l'impiego di strati ad elevato spessore consente di realizzare l'intera sezione progettuale in un'unica fase esecutiva, evitando la necessità di stendere e compattare più strati sovrapposti. Ciò comporta una semplificazione delle operazioni di posa, l'eliminazione delle interfacce che si vengono a creare tra i vari strati, le quali sono potenzialmente critiche per la durabilità della pavimentazione stessa e una riduzione dei costi, anche grazie alla mancata applicazione dello strato di attacco intermedio.

Nel corso degli anni, numerosi contributi scientifici hanno approfondito la realizzazione di pavimentazioni mediante strati di grande spessore, valutandone i potenziali vantaggi legati alla possibilità di ottenere una compattazione efficace anche per valori elevati dello spessore. Tali studi si sono concentrati in particolare sulla verifica dell'applicabilità pratica di questa tecnica, al fine di accertare che non comporti una riduzione delle prestazioni complessive della pavimentazione.

In particolare, Choubane et al. (1997) [25] propongono, come criterio generale, l'adozione di uno spessore dello strato non inferiore a quattro volte la dimensione massima nominale dell'aggregato (NMAS), al fine di agevolare il processo di compattazione. Secondo tali autori, il rispetto di questo valore minimo consente di assicurare un adeguato livello di densificazione e di incrementare l'efficacia complessiva della compattazione.

Al contrario, Russell et al. (2005) [26], sulla base dell'analisi di valori di spessore (t) e di rapporti t/NMAS eccedenti gli intervalli previsti dalle normative, hanno concluso che non vi siano motivazioni sufficienti per modificare i limiti attualmente in vigore. I risultati ottenuti evidenziano infatti come parametri quali la densità e la permeabilità delle miscele Superpave siano fortemente influenzati da molteplici variabili specifiche del progetto, tra cui la tipologia dello strato di base, le caratteristiche degli aggregati, la distribuzione granulometrica e il numero di girazioni di progetto (N_{des}). Ne deriva

che una revisione dei requisiti relativi allo spessore risulta non giustificata in assenza di una valutazione complessiva di tali fattori interagenti.

Ulteriori contributi presenti in letteratura hanno evidenziato che strati di conglomerato bituminoso a caldo (HMA) caratterizzati da maggiore spessore, con un rapporto spessore/NMAS superiore a 5, presentano una maggiore capacità di ritenzione del calore. Ciò consente di prolungare l'intervallo temporale disponibile per il conseguimento della densità di progetto, favorendo al contempo un miglioramento della lavorabilità e della compattabilità della miscela [27].

Tuttavia, la maggior parte delle indagini sperimentali è stata condotta in condizioni operative di cantiere, senza pervenire a conclusioni univoche in merito ai gradienti di compattazione lungo lo spessore dello strato. Tale limitazione impedisce una valutazione approfondita dell'uniformità del processo di compattazione negli strati di elevato spessore.

In questo contesto la presente tesi si pone come obiettivo quello di valutare, in condizioni controllate di laboratorio, la possibilità di realizzare strati di spessore maggiore rispetto a quelli comunemente usati e di andare ad analizzare l'uniformità della compattazione di tali strati.

3. Aggregato intelligente e compattazione giratoria

3.1 Aggregato intelligente

Gli aggregati intelligenti o SmartRock, che sono stati utilizzati nella campagna sperimentale sulla quale la presente tesi trae fondamento, sono dispositivi costituiti da un sensore wireless posto all'interno di un guscio protettivo sferico (Figura 3.1).

Nello specifico, l'unità di raccolta dei dati è costituita da un dispositivo multisensore dotato di un modulo elettrico fornito di un accelerometro a tre assi, un giroscopio a tre assi e un magnetometro a tre assi. Il modulo è dotato di un firmware preinstallato che consente la comunicazione con uno smartphone tramite tecnologia Bluetooth, in questo modo si ha la possibilità di registrare ed archiviare i dati registrati dal sensore i quali possono essere analizzati alla fine del processo di utilizzo del sensore. Per garantire maggiore stabilità e facilità d'uso, il modulo è stato installato su un circuito stampato (PCB) progettato su misura. Dato il basso consumo energetico del sensore interno, l'alimentazione è fornita da una comune batteria primaria al litio CR2032 [13].



Figura 3.1 – Composizione aggregato intelligente

Il guscio esterno, all'interno del quale il sensore viene inserito, è costituito da due semisfere che si uniscono ad incastro. Esse sono realizzate con una resina selezionata e prodotte mediante tecnologia di stampa 3D a stereolitografia (SLA). La resina scelta per la produzione dei gusci, grazie alle caratteristiche che sviluppa post-polimerizzazione, permette una buona resistenza alla temperatura e alle sollecitazioni della compattazione (Tabella 3.1).

Proprietà	Valore
Resistenza alla trazione ultima [MPa]	65
Modulo di trazione [GPa]	2.8
Modulo flessionale [GPa]	2.2
Resistenza all'impatto (test Izod con intaglio [J/m]	25
Allungamento alla rottura [%]	6
Temperatura di deflessione termica a 1,8 MPa [°C]	58
Temperatura di deflessione termica a 0,45 MPa [°C]	73

Tabella 3.1 – caratteristiche di post-polimerizzazione della resina utilizzata per i gusci esterni

Il guscio permette una adeguata comunicazione Bluetooth tra sensore e smartphone, essi sono riutilizzabili nel caso in cui al termine del processo di compattazione non risultino danneggiati.

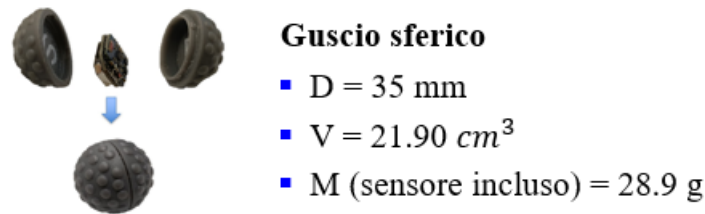
Essi sono stati progettati con l'obiettivo di riprodurre sia le dimensioni sia il comportamento meccanico di un aggregato grosso all'interno della miscela bituminosa, garantendo al contempo la compatibilità con le caratteristiche e gli ingombri hardware del sensore. Le loro dimensioni risultano infatti comparabili con quelle degli aggregati di maggiore pezzatura presenti nella miscela (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Confronto tra le dimensioni del guscio sferico e quelle di un aggregato di maggiore pezzatura

Sulla superficie esterna del guscio sono stati posizionati casualmente degli elementi di 1 mm di altezza per migliorare il movimento e l'interazione della sfera con il materiale circostante.

Di seguito si riportano le misure del guscio esterno e del peso incluso di sensore:



3.2 Sensore interno

Nel seguente paragrafo si analizzano nel dettaglio le caratteristiche inerenti al sensore utilizzato nella fase di sperimentazione, andando a specificarne il peso, le dimensioni e le caratteristiche (Tabella 3.2).

Il nome tecnico del dispositivo utilizzato è WT901BLE BLE 5.0 (Figura 3.3), è un dispositivo multisensore Bluetooth 5.0 (sensore IMU AHRS) in grado di determinare accelerazione, velocità angolare, angoli e campo magnetico su 3 assi. Grazie alle dimensioni compatte e all'involucro robusto, è particolarmente adatto ad applicazioni industriali come il monitoraggio delle condizioni e la manutenzione predittiva [28].

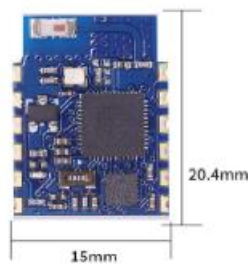


Figura 3.3 – Sensore WT901BLE BLE 5.0

Specifiche	Valore	Tolleranza
Larghezza (mm)	15	± 0.1
Lunghezza (mm)	20.4	± 0.1
Altezza (mm)	2	± 0.1
Peso (g)	0.86	± 0.1

Tabella 3.2 – dimensioni e peso del sensore WT901BLE BLE 5.0

Il modulo integra un giroscopio ad elevata precisione, un accelerometro e un sensore geomagnetico (Tabella 3.3) ed è basato su un microprocessore ad alte prestazioni. Esso si avvale di algoritmi avanzati, modelli dinamici sofisticati e di un filtro di Kalman per la stima rapida e accurata, in tempo reale, dell'assetto e del movimento (angoli di Roll, Pitch e Yaw lungo gli assi X, Y e Z).

L'adozione di tecniche avanzate di filtraggio digitale, congiuntamente all'algoritmo proprietario WITMOTION per la calibrazione automatica dello zero-bias, in grado di adattare autonomamente il livello di riferimento in assenza di sollecitazioni o segnali esterni, consente di ottenere un'elevata accuratezza delle misure e una significativa attenuazione del rumore.

La comunicazione avviene con una velocità di trasmissione fissata a 115200 baud, non modificabile, mentre la frequenza di aggiornamento dei dati è configurabile in un intervallo compreso tra 0,2 Hz e 50 Hz, con valore massimo pari a 50 Hz. I contenuti informativi in uscita risultano selezionabili in maniera flessibile (Tabella 3.4).

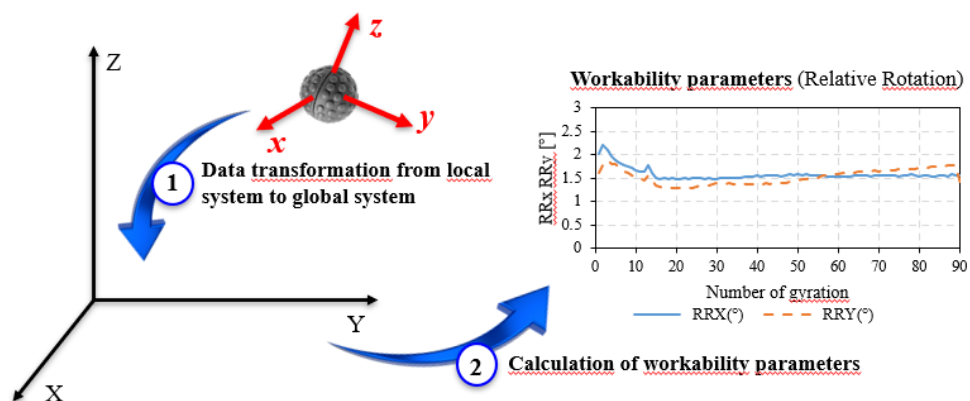
Sensori	Range di misura	Precisione
Accelerometro	3 assi: X, Y, Z ± 16 g	Precisione: 0.01 g Risoluzione: 16 bit Stabilità: 0.005 g
Giroscopio	3 assi: X, Y, Z ± 2000 °/s	Risoluzione: 16 bit Stabilità: 0.05 °/s
Magnetometro	X, Y, Z, 3-assi ± 4900 μ T	0.15 μ T/LSB typ. (16-bit)
Angoli / Inclinometro	3 assi: X, Y, Z X, Z-assi: $\pm 180^\circ$ Y $\pm 90^\circ$ (Y-asse 90° è un punto singolare)	Assi X,Y: 0.05° Asse Z: 1° (dopo la calibrazione magnetica)

Tabella 3.3 – Componenti del sensore con relative caratteristiche

Caratteristiche	Specifiche
Tensione	3.3V-5V
Corrente	<40mA
Tensione di esercizio	Power source of 3.3-5V
Dati registrati	Angoli: 3 assi: X, Y, Z Accelerazione: 3 assi: X, Y, Z Velocità angolare: 3 assi: X, Y, Z Campo magnetico: 3 assi: X, Y, Z Tempo, Quaternioni
Frequenza di output	0.2Hz--50Hz
Interfaccia	Serial TTL level
Bluetooth 5.0	Range: $\leq 50\text{m}$
Velocità di trasmissione	115200(default, non può essere cambiata)

Tabella 3.4 – Parametri di lavoro del sensore

Il modulo registra, durante la compattazione, informazioni inerenti ad accelerazioni lineari, velocità angolari e angoli di Eulero riferiti ad un sistema di riferimento locale proprio del sensore. Tali dati, come richiesto dalla normativa ASTM D8541 [29], devono essere successivamente ritrasformati in modo da convertire i dati registrati al



sistema di riferimento globale (WGS 84 – World Geodetic System 1984) (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Trasformazione dati da sistema di riferimento locale a WGS84 per il calcolo dei parametri di lavorabilità

Tale trasformazione viene eseguita utilizzando matrici di rotazione basate sui quaternioni, derivate dai dati iniziali dei quaternioni raccolti nei primi sei secondi, prima dell'inizio della compattazione [13].

Il sensore può operare adottando un algoritmo a 6 assi oppure, in alternativa, una configurazione a 9 assi.

Nel caso della configurazione a 6 assi, l'angolo relativo all'asse z viene determinato mediante l'integrazione della velocità angolare; al contrario, nella configurazione a 9 assi, esso è stimato sulla base del campo magnetico terrestre. Poiché il sensore viene collocato all'interno di uno stampo in acciaio durante il processo di compattazione girella, l'ambiente di installazione è caratterizzato da rilevanti interferenze magnetiche. Pertanto, nel presente studio, si è scelto di adottare la configurazione operativa a 6 assi.

Il sistema di riferimento adottato per la determinazione degli angoli di assetto è costituito dal sistema di coordinate Nord-Est-Sky. Il modulo deve essere orientato conformemente alla direzione positiva illustrata nella figura di riferimento (Figura 3.5): la direzione verso sinistra definisce l'asse X, quella in avanti l'asse Y, mentre la direzione verso l'alto individua l'asse Z.

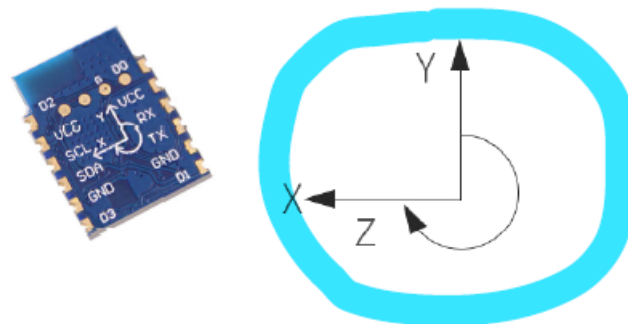


Figura 3.5 – Direzione del sistema di riferimento interno del sensore

3.2.1 Angoli di Eulero

Gli angoli di Eulero descrivono la sequenza di rotazioni del sistema di coordinate secondo la convenzione Z-Y-X; in particolare, l'assetto viene ottenuto mediante una rotazione iniziale attorno all'asse Z, seguita da una rotazione attorno all'asse Y e, infine, da una rotazione attorno all'asse X.

In generale, gli angoli di Eulero costituiscono una parametrizzazione dell'orientamento tridimensionale di un corpo rigido nello spazio. Essi permettono di descrivere in modo completo la configurazione di un sistema di riferimento cartesiano mobile $OXYZ$, solidale con il corpo, rispetto a un sistema di riferimento cartesiano fisso $Oxyz$, assumendo che entrambi condividano la medesima origine (Figura 3.6).

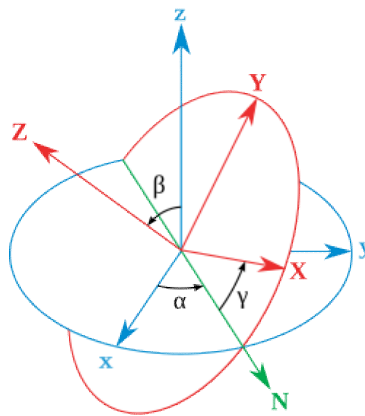


Figura 3.6 – Rappresentazione degli angoli di Eulero

Dal punto di vista geometrico, gli angoli di Eulero esprimono l'orientamento relativo tra due terne ortogonali mediante una successione ordinata di tre rotazioni elementari attorno ad assi opportunamente scelti. Questa rappresentazione è possibile poiché qualsiasi rotazione nello spazio tridimensionale può essere ricondotta alla composizione di tre rotazioni indipendenti. Un elemento geometrico fondamentale nella costruzione degli angoli di Eulero è la cosiddetta *linea dei nodi*.

Quando i piani xy del sistema fisso e XY del sistema mobile sono distinti, essi si intersecano lungo una retta passante per l'origine, definita appunto linea dei nodi. Tale retta rappresenta l'asse attorno al quale avviene una delle rotazioni intermedie.

Dunque, avendo preso in considerazione due sistemi di riferimento, uno fisso $Oxyz$ ed uno mobile $OXYZ$, l'orientamento del sistema mobile può essere ottenuto a partire da quello fisso attraverso tre trasformazioni rotazionali successive, descritte da tre parametri scalari indipendenti, che corrispondono appunto agli angoli di Eulero, i quali sono:

- α è l'angolo compreso tra l'asse x e la linea dei nodi; è denominato *angolo di precessione* ed è definito negli intervalli $[0, 2\pi)$ oppure $[-\pi, \pi)$.
- β è l'angolo compreso tra gli assi z e Z ; è denominato *angolo di nutazione* ed è definito negli intervalli $[0, \pi]$ oppure $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$.
- γ è l'angolo compreso tra la linea dei nodi e l'asse X ; è denominato *angolo di rotazione propria* ed è definito negli intervalli $[0, 2\pi)$ oppure $[-\pi, \pi)$.

3.3 Procedura di settaggio e calibrazione del sensore

Prima dell'avvio della fase sperimentale, che prevede il posizionamento del sensore all'interno della fustella durante la fase di compattazione, è necessario procedere alla configurazione del dispositivo.

A tale scopo, il sensore viene collegato al computer mediante tecnologia Bluetooth. Attraverso l'utilizzo dell'applicazione proprietaria **WITMOTION**, è possibile eseguire l'intera procedura di configurazione.

Una volta stabilita correttamente la connessione, si procede con l'apertura dell'applicazione dedicata alla gestione del dispositivo. Nella schermata principale (Figura 3.7), è necessario accedere alla sezione denominata “**Config**”, dalla quale è possibile entrare nella finestra di configurazione e impostare i parametri operativi del dispositivo (Figura 3.8).

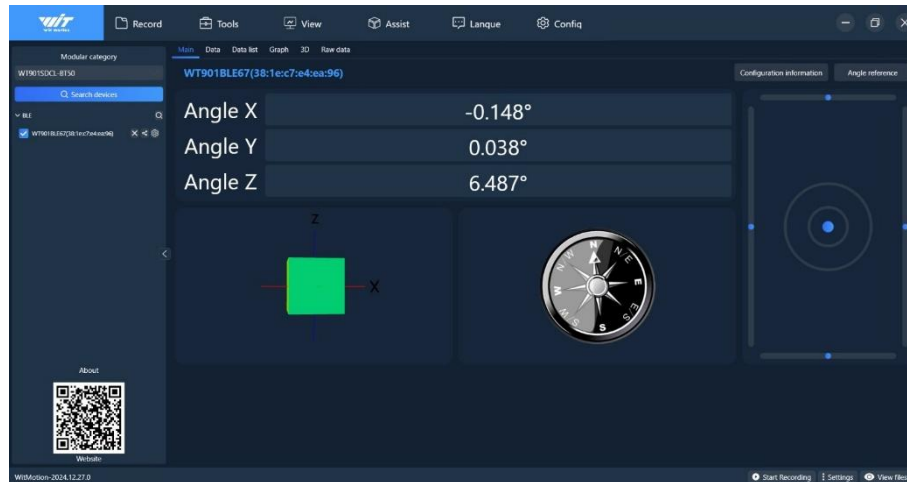


Figura 3.7 – Schermata principale dell'applicazione e indicazione della sezione per accedere alla configurazione

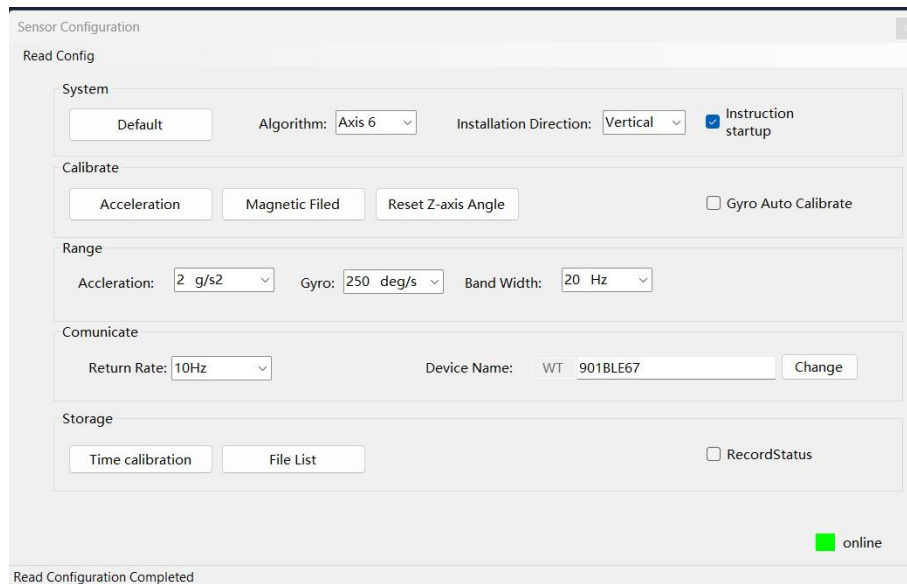


Figura 3.8 – Schermata per la configurazione del dispositivo

Come anticipato in precedenza, il sensore deve essere configurato in modo da escludere la registrazione dei dati provenienti dal magnetometro. A tale scopo, è necessario impostare l'algoritmo in modo che il dispositivo operi utilizzando esclusivamente sei dei nove assi disponibili, ovvero i tre assi del giroscopio e i tre assi dell'accelerometro.

Per ottenere tale configurazione, dalla schermata dedicata alla configurazione del dispositivo è necessario accedere alla sezione denominata **“System”**. In corrispondenza della voce **“Algorithm”**, è presente un menu a tendina dal quale selezionare l’opzione **“Axis 6”** (Figura 3.9), impostando così il funzionamento del sensore nella modalità desiderata.

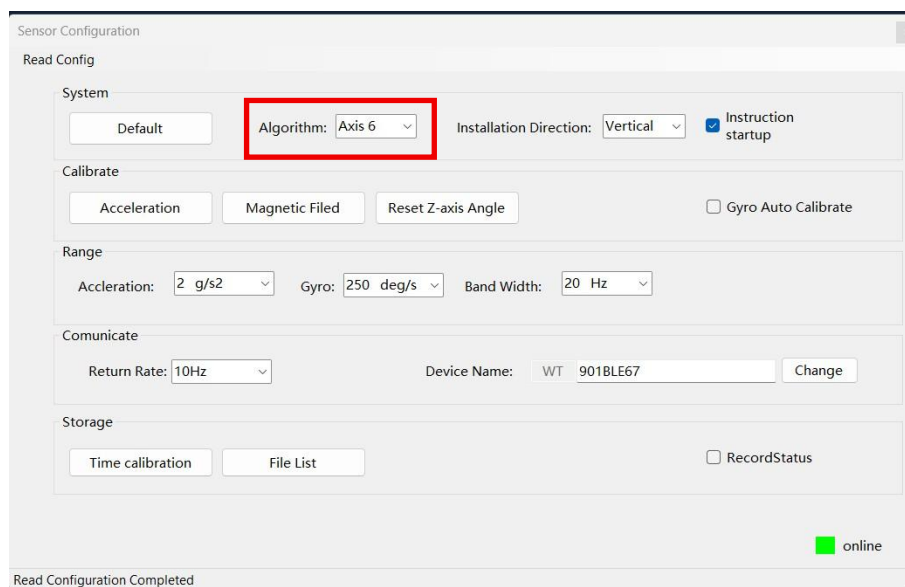


Figura 3.9– Algorithm “Axis 6”

Successivamente, è necessario definire la direzione di installazione del sensore, impostandola in configurazione verticale. Tale parametro consente di specificare al dispositivo l’orientamento con cui esso opererà durante la fase sperimentale, ovvero in assetto verticale all’interno del guscio, garantendo una corretta interpretazione dei dati acquisiti.

L’impostazione viene effettuata accedendo alla sezione **“System”** dell’interfaccia di configurazione. In corrispondenza della voce **“Installation Direction”** è disponibile un menu a tendina dal quale è necessario selezionare l’opzione **“Vertical”** (Figura 3.10), in modo da definire in maniera univoca il sistema di riferimento operativo del sensore.

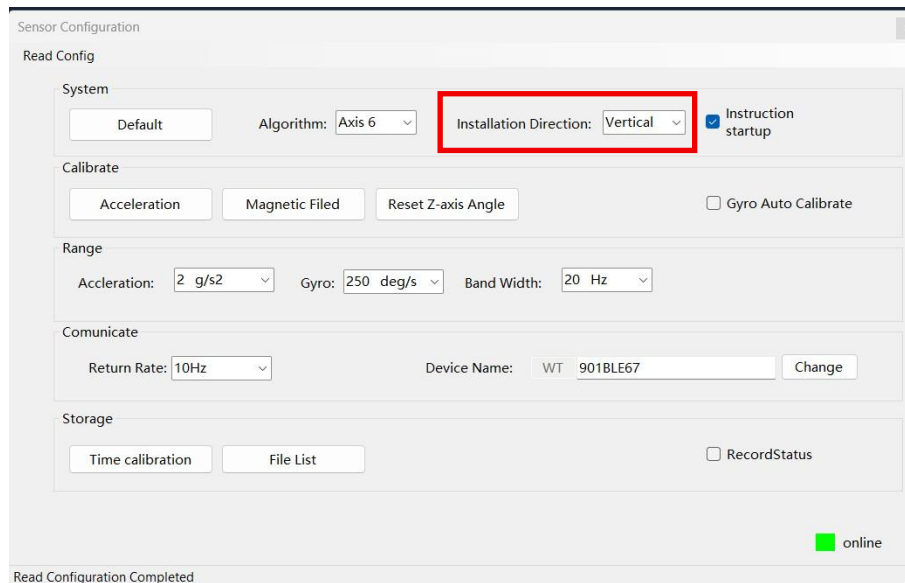


Figura 3.10 – Installation Direction “Vertical”

L'impostazione della direzione su modalità “**Vertical**” determina l'applicazione interna, da parte del processore del sensore, di una rotazione del sistema di riferimento pari a 90° attorno all'asse X .

Tale trasformazione consente di riallineare il sistema di coordinate del dispositivo con l'effettivo orientamento operativo, facendo sì che la configurazione eretta venga interpretata come nuova condizione di riferimento. In questo modo, le grandezze cinematiche misurate vengono elaborate coerentemente rispetto al nuovo assetto, garantendo un'accurata stima dei movimenti e dell'orientamento del sensore durante le prove sperimentali.

Una volta completata la procedura di configurazione, il sensore risulta pronto per l'impiego nella fase sperimentale.

Durante le operazioni di compattazione, il dispositivo deve essere interfacciato con uno smartphone dotato di sistema operativo Android, al fine di consentire la gestione e la registrazione dei dati acquisiti. La procedura di connessione e utilizzo durante la fase operativa è descritta nel seguito.

1. La prima operazione che deve essere svolta è quella di installare sullo smartphone l'applicazione WITMOTION, in modo da poter controllare i

parametri del sensore, tramite file APK. Una volta terminata la procedura di download dell'applicazione bisogna acconsentire all'utilizzo da parte della stessa della localizzazione e dell'archiviazione dei dati sullo smartphone (Figura 3.11).

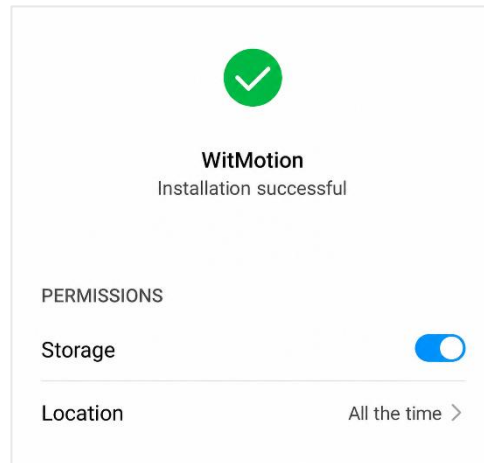


Figura 3.11 – Schermata iniziale

2. una volta dato il consenso si entra nell'applicazione e bisogna scegliere la tipologia del modulo in utilizzo; selezionare la voce che riporta “BLE 5.0 Series” (Figura 3.12)

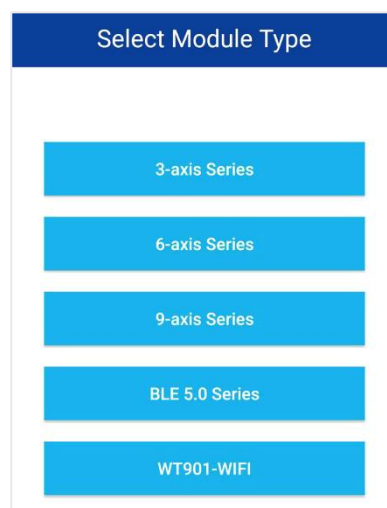


Figura 3.12 – Schermata per la selezione della tipologia del modulo

3. Successivamente, bisogna connettere il sensore con lo smartphone. Nella pagina iniziale si deve selezionare “search device” (Figura 3.13) e di conseguenza, quando l’applicazione rileva il dispositivo bisogna selezionarlo (Figura 3.14).

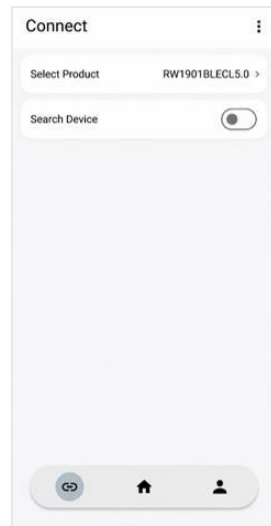


Figura 3.13 – Schermata per ricerca dispositivo

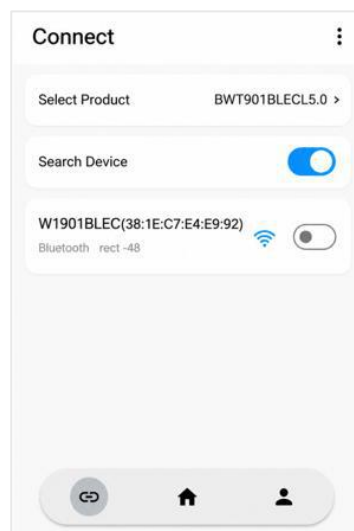


Figura 3.14 – Schermata di selezione del sensore da connettere

- Una volta selezionato il dispositivo da voler connettere allo smartphone, la casella di selezione, presente accanto al nome del sensore, diventerà di colore di azzurro (Figura 3.15). Nel momento in cui il collegamento tra il sensore e lo smartphone avviene, sul sensore una luce a LED di colore blu lampeggia e rimane accesa per circa un secondo.

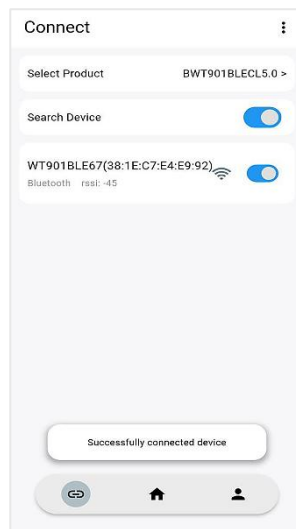


Figura 3.15 – Collegamento con il sensore

- Successivamente sullo schermo del telefono apparirà una schermata in cui vengono riportati tutti i dati del sensore registrati in tempo reale e la rappresentazione di un cubo al cui interno è presente un sistema di riferimento che fornisce indicazioni riguardo l'orientamento del sensore (Figura 3.16)

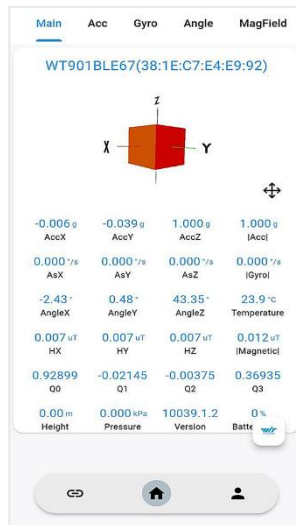


Figura 3.16 – Schermata principale con informazioni registrate dal sensore

I passaggi descritti riguardano il collegamento del sensore con lo smartphone, di seguito vengono riportati i passaggi che vengono eseguiti per la calibrazione del sensore prima dell'avvio della prova di compattazione e la procedura per estrapolare i dati registrati dal sensore stesso alla fine della prova.

Durante la fase sperimentale sono state svolte due tipologie di prove, una che prevedeva l'inserimento del sensore all'interno della miscela bituminosa, di seguito posta nella fustella e una il cui il sensore veniva posto sul lato esterno della fustella e reso solidale con la stessa in modo da poterne determinare le rotazioni relative derivanti dal moto rigido.

La procedura di calibrazione, uguale per entrambe le tipologie di prove, deve essere svolta una volta che la fustella viene inserita nella pressa giratoria, prima di avviare la prova di compattazione.

1. Dalla schermata principale dell'applicazione accedere al menu delle impostazioni ed eseguire la procedura di calibrazione selezionando l'opzione denominata “*Acceleration calibration*” (Figura 3.17). Questa fase è fondamentale, in quanto consente la calibrazione degli angoli di Eulero e il loro azzeramento rispetto a una condizione iniziale di riferimento. Questo passaggio risulta essenziale nella successiva fase di elaborazione dei dati, poiché consente una rappresentazione più chiara, coerente e sistematica delle grandezze

misurate, garantendo l'allineamento tra il sistema di riferimento locale del sensore e quello globale sin dalle prime fasi di acquisizione.

La procedura di calibrazione presenta una durata di circa 10 secondi; durante tale intervallo temporale è fondamentale che il sensore rimanga il più possibile immobile, al fine di evitare l'introduzione di errori sistematici o perturbazioni nelle misure iniziali.

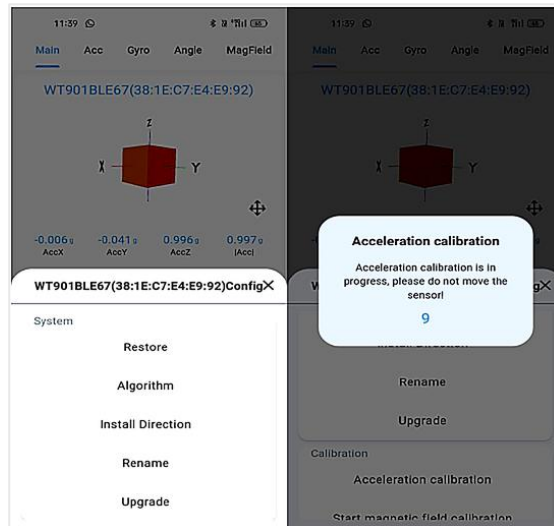


Figura 3.17 – Schermata per la procedura di calibrazione (Acceleration Calibration)

2. Terminata la procedura di calibrazione del sensore, sempre dal menu delle impostazioni bisogna selezionare la voce che riporta l'opzione "Z-axis zero" (Figura 3.18). Questa fase consente la regolazione automatica dello zero di riferimento dell'asse Z in assenza di segnali o carichi applicati. Tale procedura garantisce un'elevata accuratezza delle misure, migliorando l'affidabilità complessiva dei dati registrati. Prima di effettuare questa operazione bisogna assicurarsi che il modulo sia fermo, successivamente si può cliccare sulla voce "Z-axis zero". Dalla schermata principale dell'applicazione si noterà come l'angolo dell'asse Z torni a zero gradi.

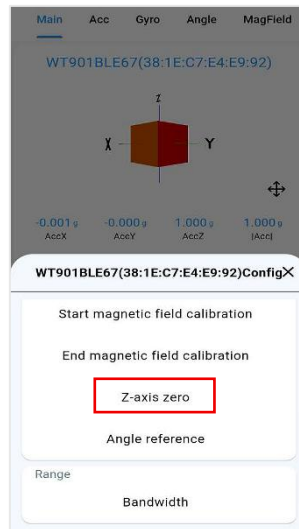


Figura 3.18 – Configurazione “Z-axis zero”

3.3.1 Procedura per la registrazione ed estrapolazione dei dati

Prima dell’avvio della procedura di compattazione del provino, è necessario attivare la registrazione dati da parte del sensore. Successivamente, i dati registrati devono essere opportunamente estratti al fine di consentirne l’utilizzo. Il procedimento operativo relativo a tale fase è descritto nel seguito.

1. Prima di avviare la fase di registrazione controllare sulla schermata principale dell’applicazione che i parametri influenzati dalla calibrazione siano tutti prossimi allo zero (Figura 3.19).

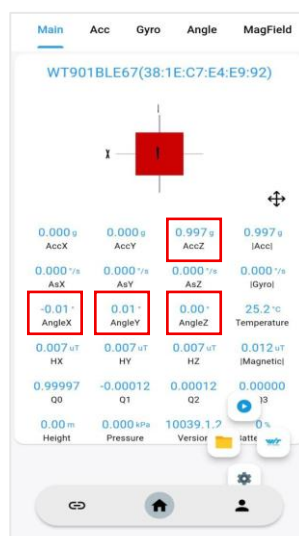


Figura 3.18 – schermata principale e parametri influenzati dalla calibrazione

2. Una volta aver controllato che tutti i parametri siano prossimi allo zero si può procedere ad avviare la registrazione dei dati da parte del sensore premendo sull'apposita icona presente nella schermata principale dell'applicazione (Figura 3.20);

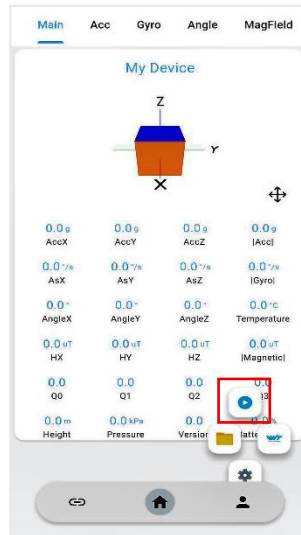


Figura 3.20 – Icona per l'avvio della registrazione

3. Al termine della fase di registrazione dei dati, per poter accedere e visualizzare i file contenenti le informazioni acquisite dal sensore, è necessario selezionare l'icona rappresentante la cartella di colore giallo (Figura 3.21);

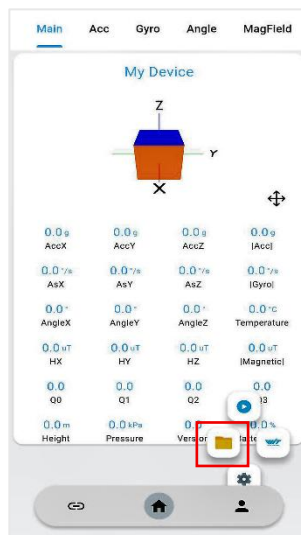


Figura 3.21 – Icona per accedere ai file registrati dal sensore

4. A seguito della selezione dell'icona precedentemente indicata, viene visualizzata una schermata (Figura 3.22) in cui sono presenti cartelle denominate in funzione della data di registrazione; all'interno di ciascuna di esse sono archiviati file in formato .txt, contenenti le informazioni acquisite dal modulo (Figura 3.23);

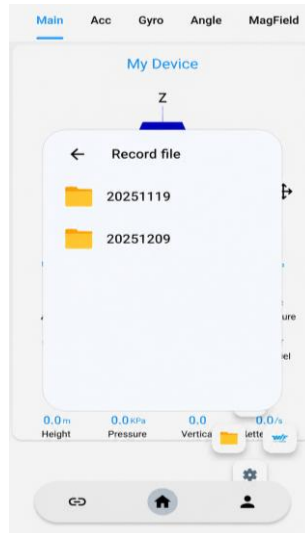


Figura 3.22 – Cartelle contenenti file .txt

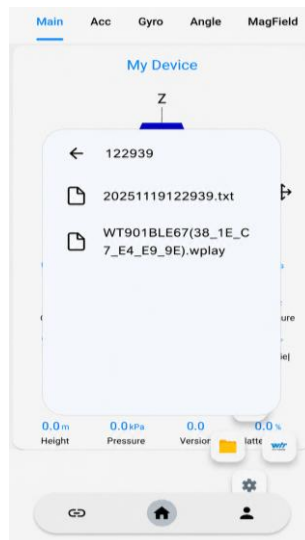


Figura 3.23 – File .txt contenenti i dati registrati dal sensore

I file registrati dal sensore in formato .txt, sono valori riferiti al sistema di riferimento locale proprio del modulo. Mediante un codice MATLAB sviluppato nel Dipartimento di Strade e Trasporti (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche vengono poi riferiti al sistema di riferimento globale come previsto dalla norma ASTM D8541.

3.4 Pressa giratoria

Nella campagna sperimentale la compattazione giratoria è stata effettuata applicando al provino simultaneamente un'azione di compressione statica e sforzi di taglio, considerando le condizioni di prova standard specificate all'interno della normativa EN-12697-31 [30], utilizzando un compattatore giratorio modello B100B92 di TECNOTEST (Figura 3.24).



Figura 3.24 – Pressa giratoria TECNOTEST modello B100B92

Tale macchinario segue esattamente il principio di compattazione descritto nella normativa. Il principio giratorio è quello asse-stampo in rivoluzione conica centrata sul piattello di carico. [31] Dunque, la compattazione è indotta da un movimento circolare rigido della superficie superiore dello stampo, che genera una superficie di rotazione conica (considerando l'asse del campione). Durante questo processo, le

superfici superiore e inferiore del campione rimangono perpendicolari all'asse della superficie conica (Figura 3.25) [13].

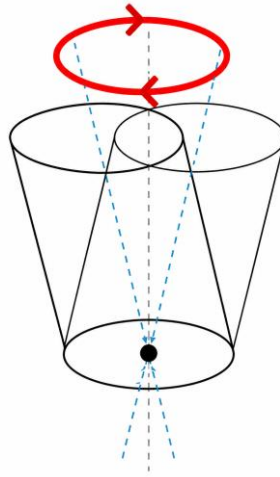


Figura 3.25 – Movimento impresso alla fustella secondo norma EN-12697-31

La velocità programmata è pari 30 giri per minuto con arresto rallentato. I cicli giratori della macchina sono impostabili senza vincolo numerico, all'interno della campagna sperimentale tale numero è stato impostato a 100 giri, in quale secondo l'esperienza avrebbe portato ad un grado di addensamento della miscela del 92%.

L'apparecchiatura opera imponendo alla fustella una rotazione caratterizzata da un angolo giratorio esterno settabile in un range compreso tra 0° e 2° , nella sperimentazione in esame l'angolo giratorio esterno imposto è pari a $1,25^\circ$, come indicato dalla normativa. Tramite un sistema ad alimentazione pneumatica, con pressione dell'aria a 10 bar, la macchina garantisce l'applicazione di una pressione costante sul provino pari a 600 kPa.

La misurazione dell'altezza del provino avviene mediante un trasduttore magnetostriettivo coassiale posizionato sul martinetto idraulico di carico. Alla fine del processo di compattazione per l'estrusione del provino dallo stampo, la macchina è dotata di un secondo martinetto pneumatico secondario integrato nel piano di lavoro. Alla macchina è affiancato un dispositivo di comando, ovvero un computer che lavora tramite sistema operativo Microsoft Windows 7, delegando a schede "industrial standard", disposte a bordo macchina, le routine operazionali, la lettura dei sensori analogici e digitali, l'esecuzione della parte del programma in logica PLC. [31]

3.4.1 Settaggio della macchina e avvio della prova

Prima dell'avvio della fase di compattazione, è necessario impostare, tramite il terminale di controllo interfacciato con la macchina, i parametri operativi per l'esecuzione della prova.

A seguito dell'accensione del terminale, si procede con l'apertura dell'applicazione **TECNOTEST** dedicata al controllo della pressa giratoria. Una volta avviata l'applicazione, la schermata iniziale visualizzata corrisponde a quella riportata in Figura 3.26.



Figura 3.26 – Schermata iniziale del software per la gestione della macchina

Dalla schermata iniziale, selezionando il comando “**Nuova**”, si accede alla finestra dedicata all'impostazione dei parametri di prova (Figura 3.27).

All'interno di tale interfaccia è necessario inserire il nominativo della prova, corrispondente al codice identificativo del provino. Successivamente, devono essere definiti i principali parametri operativi della prova, tra cui il diametro della fustella impiegata, pari a 150 mm, e il numero di rivoluzioni che la macchina deve compiere per l'esecuzione della prova, fissato, nel caso in esame, a 100 giri.

Figura 3.27 – Schermata dedicata all'impostazione dei parametri di prova

Una volta completata l'impostazione dei parametri di prova, è possibile avviare l'esecuzione selezionando il comando **“Esegui”**. Successivamente, si apre la schermata dedicata al monitoraggio della prova (Figura 3.28), all'interno della quale, nella porzione superiore dell'interfaccia, vengono visualizzati in tempo reale i principali parametri acquisiti durante l'esecuzione. Tra questi si annoverano l'altezza del provino, la pressione verticale applicata e il numero di rivoluzioni effettuate. All'interno della medesima schermata è inoltre presente una rappresentazione grafica dell'andamento della variazione di altezza del provino nel corso dell'intera prova, utile per l'analisi del processo di compattazione. Premendo il tasto start si dà inizio alla prova.

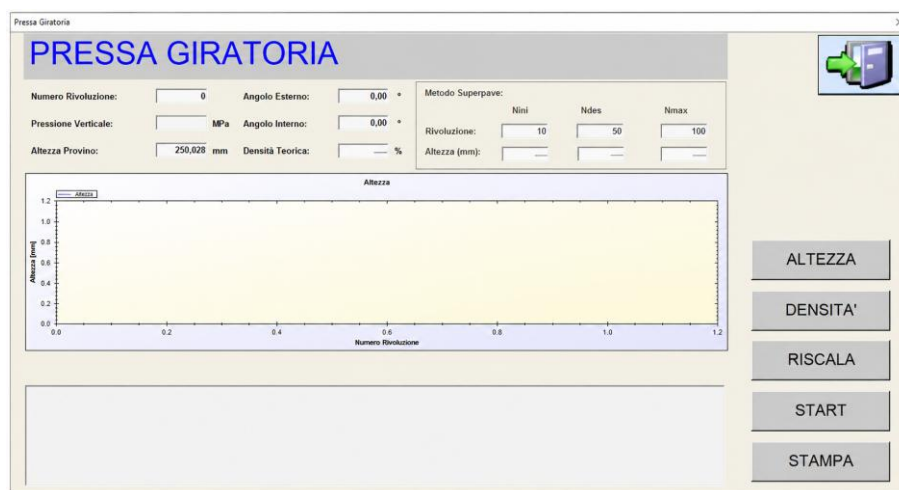


Figura 3.28 – Schermata di monitoraggio della prova

4. Parametri di lavorabilità

Uno degli obiettivi principali del seguente studio è quello di andare ad effettuare una valutazione dell'uniformità della compattazione in provini di elevata altezza ed un confronto degli stessi con provini aventi spessori che rispecchiano gli spessori convenzionalmente utilizzati in sito. Questo confronto avviene mediante la determinazione di alcuni parametri, i quali sono utili anche per definire il comportamento della miscela bituminosa durante le prove sperimentali. Tali parametri sono oggetto di analisi nel presente capitolo.

La campagna sperimentale, e di conseguenza la presente tesi, si basano principalmente sulla valutazione, sull'analisi e sul confronto dei parametri che vengono elencati di seguito.

4.1 Relative Rotation – RR

La RR (Relative Rotation), ovvero la rotazione relativa calcolata per un particolare ciclo di rotazione (Gyrations) viene determinata andando a trovare la differenza tra il valore di picco (o valore massimo) e il valore di valle (o valore minimo) dell'angolo di Eulero corrispondente a quella determinata rotazione (Figura 4.1). [28]

La Rotazione Relativa rappresenta l'angolo massimo di fluttuazione della particella in ciascun ciclo lungo le direzioni x, y e z.

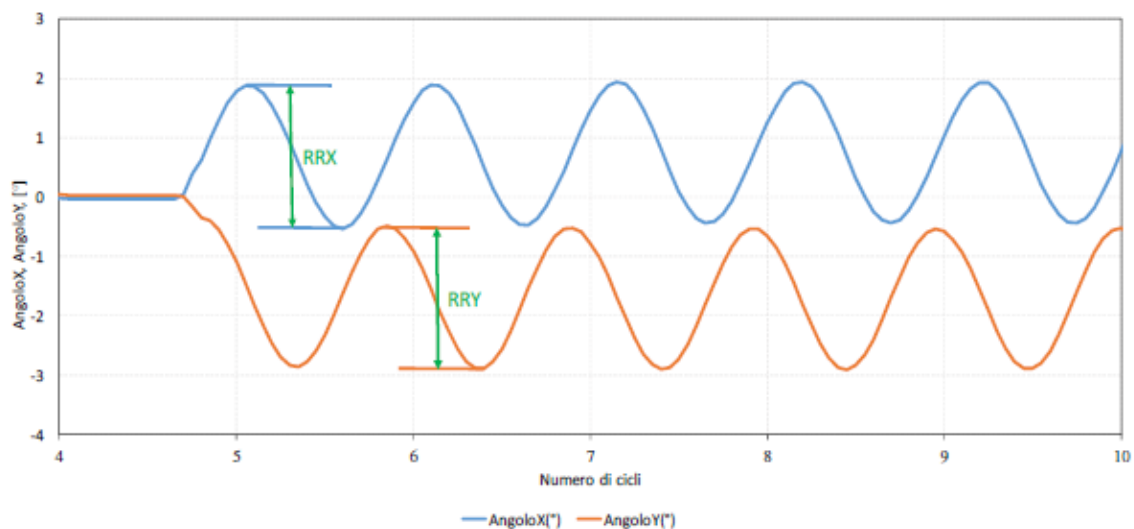


Figura 4.1 – Definizione delle Relative Rotation (RR)

4.2 Relative Rotation Capacity – RRC

Questo parametro è stato proposto dalla normativa ASTM D8541 [28]. La determinazione delle RR per ciascun ciclo di rotazione consente di individuare il parametro denominato *Relative Rotation Capacity* (RRC) o capacità di rotazione relativa. Quest'ultimo è definito come l'area sottesa alla curva RRx-y, ottenuta come valore medio tra le componenti RRx e RRY, da N_{initial} (numero iniziale delle rotazioni) a N_{design} (numero finale delle rotazioni, numero di rotazione in cui l'asfalto ha raggiunto la percentuale di compattazione stabilita) (Figura 4.2).

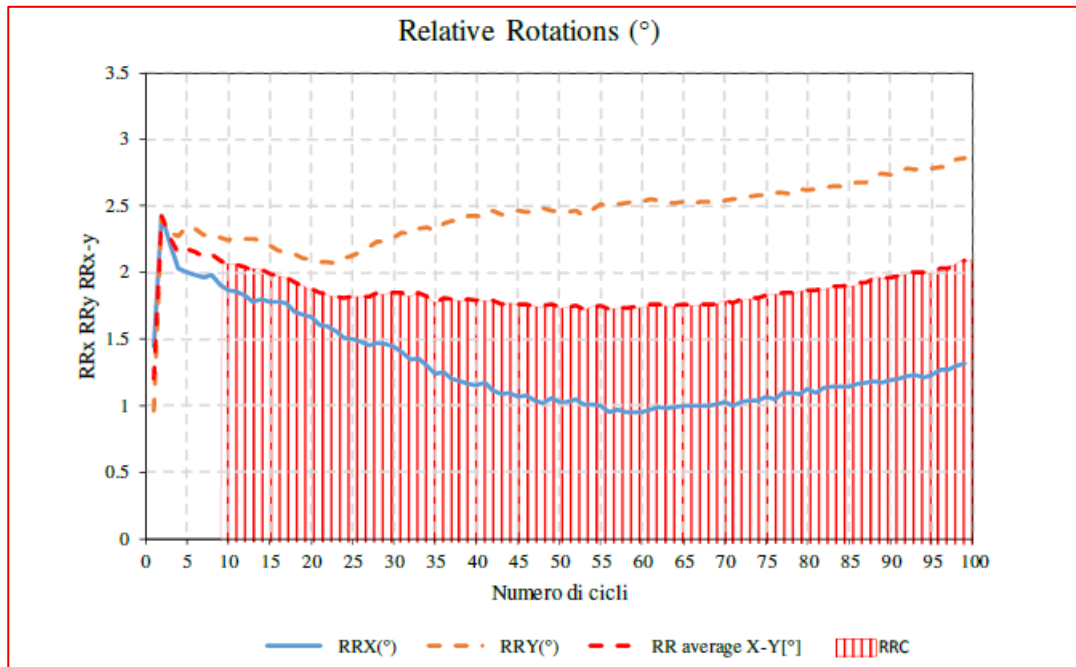


Figura 4.2 – Definizione grafica della Relative Rotation Capacity (RRC)

RRC viene calcolato con la formula che viene descritta nel seguito:

$$RRC = \sum_{i=N_i}^{N_d} \frac{(RR_{i+1} + RR_i) \cdot l}{2}$$

Dove RR_i indica la rotazione relativa della miscela compattata allo i -esimo ciclo, RR_{i+1} indica la rotazione relativa della miscela compattata alla $(i+1)$ -esima rotazione, N_i corrisponde al numero iniziale delle rotazioni per la compattazione della miscela, che coerentemente a quanto stabilito anche per la determinazione del valore del CEI è stato posto pari a 8, mentre N_d è il numero di rotazioni di progetto della miscela compattata ed è stato considerato coincidente con il numero di rotazioni necessarie per raggiungere un grado di compattazione del 92%

4.3 Compaction Energy Index – CEI

Il grado di compattazione di una miscela bituminosa può essere valutato mediante diversi parametri in grado di descrivere il comportamento del materiale nel corso dei cicli di addensamento. Tra questi, un indicatore di particolare rilevanza è rappresentato dal Compaction Energy Index (CEI), un parametro che viene utilizzato per valutare la lavorabilità delle miscele. Esso rappresenta l'energia necessaria per ottenere una compattazione della miscela pari al 92%. Questo indice è rappresentativo dell'area sotto la curva di compattazione a partire dall'8ª rotazione (gyration) fino al raggiungimento di un grado di compattazione del 92% (Figura 4.3).

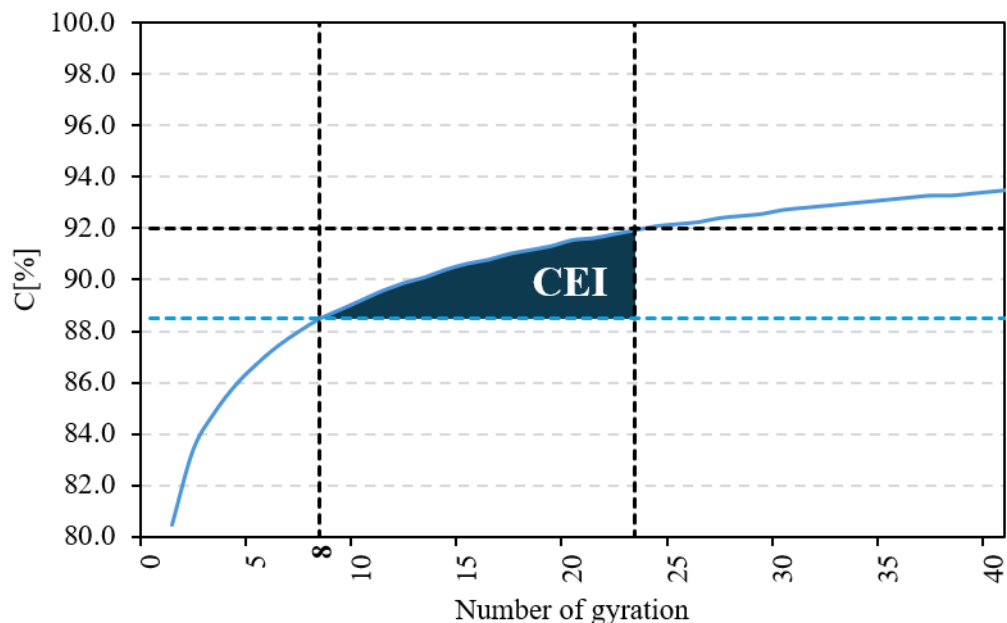


Figura 4.3 – Definizione grafica del CEI

Un valore elevato del Compaction Energy Index (CEI) indica che è stata necessaria una maggiore quantità di energia per raggiungere il livello di compattazione prefissato. Tale indice permette di confrontare in modo quantitativo l'efficienza della compattazione tra diverse miscele o differenti condizioni di prova, offrendo un riferimento utile per l'ottimizzazione dei processi costruttivi e per la valutazione della lavorabilità del materiale [24].

4.4 Mold-Sensor Relative Rotation Capacity – M-S RRC

Il Mold Sensor Relative Rotation Capacity (M-S RRC) è un nuovo parametro che indica l'area compresa tra la Rotazione Relativa ottenuta dal moto rigido della fustella e la curva di RR ottenuta dalla miscela di asfalto (media x-y), da $N_{initial}$ a N_{design} .

In base a quanto riportato all'interno della normativa ASTM D8541, la rotazione relativa degli aggregati durante la fase di compattazione deve essere valutata mediante l'utilizzo dell'RRC, rapportandolo ai valori calcolati del CEI per avere informazioni sulla lavorabilità della miscela bituminosa.

Si è reso necessario l'utilizzo di questo nuovo parametro in quanto, sembrerebbe emergere una proporzionalità diretta tra il valore del CEI e quello di RRC, ma questo comportamento contraddice il significato attribuito a ciascun parametro, poiché alti valori di RRC, indicativi di buona lavorabilità, corrispondono ad alti valori di CEI, indicativi invece di scarsa lavorabilità.

La differenza sostanziale tra RRC e M-S RRC è che, in questo nuovo parametro, rispetto all'RRC viene tenuto in considerazione il movimento rigido della fustella che influisce direttamente sulla miscela. Utilizzando questo nuovo parametro facciamo riferimento alla rotazione relativa degli aggregati della sola miscela e non del sistema miscela-fustella come avveniva nel caso dell'RRC. In questo modo, come si potrà notare anche nel paragrafo inerente all'analisi dei risultati, si ottiene una nuova proporzione diretta tra M-S RRC e CEI, in questo caso alti valori di M-S RRC corrispondono ad alti valori di CEI ed entrambi sono indicativi di una bassa lavorabilità della miscela.

Il fatto di tener in considerazione la rotazione rigida della fustella dovuta al suo moto rigido può essere spiegato dal fatto che, durante il processo di compattazione mediante Pressa Giratoria, l'angolo esterno che viene applicato causi una distribuzione non uniforme delle forze agenti sul provino. Pertanto, al fine di valutare il moto relativo effettivo tra la fustella e il sensore, si rende necessario introdurre un nuovo parametro di lavorabilità. L'M-S RRC viene definito come riportato di seguito:

$$M - S RRC = \sum_{i=N_i}^{N_d} \left| \frac{(RRx - y_{i+1} + RRx - y_i)}{2} - RR_{mold} \right| \cdot l$$

dove RR_i denota la rotazione relativa media della miscela bituminosa compattata alla i -esima rotazione, mentre RR_{i+1} rappresenta la corrispondente rotazione relativa alla $(i+1)$ -esima rotazione. Il termine RR_{mold} indica la rotazione relativa attribuibile al moto rigido della fustella (pari a $2,35^\circ$, successivamente viene dimostrato che questo valore rimane costante). Il parametro " l " identifica la lunghezza dell'unità lungo l'asse x , corrispondente a una singola rotazione.

4.5 Contenuto di vuoti

L'ultimo parametro che è stato utilizzato nella sperimentazione per valutare e confrontare la compattazione dei vari provini è stato l'indice dei vuoti. Esso è un parametro espresso in percentuale, che rappresenta un indicatore fondamentale della densità finale del materiale. La determinazione del contenuto di vuoti, eseguita in conformità alla norma UNI EN 12697-8 [32], consente di ottenere una valutazione quantitativa accurata del grado di compattazione raggiunto; tale parametro, integrato con gli altri indicatori analizzati, fornisce informazioni fondamentali in merito alla lavorabilità e alla qualità complessiva delle miscele bituminose.

Il valore del contenuto di vuoti viene determinato tramite la seguente relazione:

$$\text{Contenuto di vuoti [\%]} = 100 - \frac{\rho_{geom}}{\rho_{max}} \cdot 100$$

dove ρ_{max} indica la massima densità della miscela compattata con la percentuale di vuoti minima, mentre ρ_{geom} indica la densità geometrica dei vuoti e viene determinata tramite il seguente rapporto:

$$\rho_{geom} = \frac{\text{peso della miscela} - \text{peso aggregato intelligente}}{\pi r^2 h - V_{\text{aggregato intelligente}}}$$

dove r corrisponde al raggio della fustella, che nel caso del presente studio è pari a 150 mm, h corrisponde all'altezza del provino, mentre $V_{\text{aggregato intelligente}}$ corrisponde al volume che la Smartrock occupa all'interno del provino, che come visto nel paragrafo 3.1 è pari a 21,90 cm³.

5. Materiali

La sperimentazione sulla quale la presente tesi trae fondamento è basata sulla realizzazione di diverse tipologie di provini di differenti altezze (le caratteristiche dei provini e delle prove svolte verranno descritte nel dettaglio nel capitolo successivo) i quali sono stati prodotti sfruttando la stessa tipologia di materiale, ovvero un conglomerato bituminoso tiepido destinato alla realizzazione di strati di base.

Il conglomerato bituminoso destinato alla realizzazione degli strati di base rappresenta un elemento fondamentale nella struttura delle pavimentazioni stradali, in quanto svolge una funzione primaria di distribuzione dei carichi indotti dal traffico verso gli strati inferiori. Tali miscele sono progettate per garantire adeguate prestazioni meccaniche, con particolare riferimento alla resistenza alla deformazione permanente, alla fatica e alla durabilità nel tempo.

Dal punto di vista compositivo, il conglomerato bituminoso per strati di base si caratterizza per una granulometria degli aggregati generalmente più grossolana rispetto agli strati superficiali, con una dimensione massima nominale (NMAS) elevata, al fine di assicurare un'adeguata capacità portante. Il contenuto di legante bituminoso è calibrato in modo da garantire un corretto equilibrio tra coesione e stabilità, evitando fenomeni di eccessiva deformabilità o fragilità.

Un aspetto rilevante riguarda inoltre la possibilità di impiego di materiali riciclati, in particolare fresato d'asfalto (RAP), che consente di migliorare la sostenibilità del processo produttivo senza compromettere le prestazioni richieste, purché opportunamente dosato e caratterizzato.

Dal punto di vista prestazionale, questi conglomerati devono presentare un adeguato grado di compattazione e un contenuto di vuoti controllato, elementi che influenzano direttamente la resistenza meccanica e la durabilità della pavimentazione.

In base a quanto appena detto, la miscela di base impiegata nella sperimentazione è stata scelta specificamente per le peculiari caratteristiche che la contraddistinguono in termini di granulometria degli aggregati, dimensione massima nominale (NMAS), tipologia e dosaggio del legante, nonché contenuto di asfalto riciclato (RAP).

Analizzando nello specifico il materiale utilizzato durante le prove per la realizzazione dei provini, esso è un conglomerato bituminoso, più precisamente, come riportato nella normativa UNI EN 13108-1 [33], la designazione della miscela è Base Riciclata 30% Hard Tiepido, codice standard CB 32 BASE PMB 45/80-70.

Il materiale è costituito da una miscela inerte composta da aggregati lapidei vergini caratterizzati da un valore di NMAS pari a 20 mm e da una percentuale di asfalto riciclato (RAP) pari al 30% del peso totale degli inerti.

Di seguito, in Figura 5.1 e Figura 5.2 si riportano rispettivamente la curva granulometrica degli inerti vergini e lo studio granulometrico della miscela.

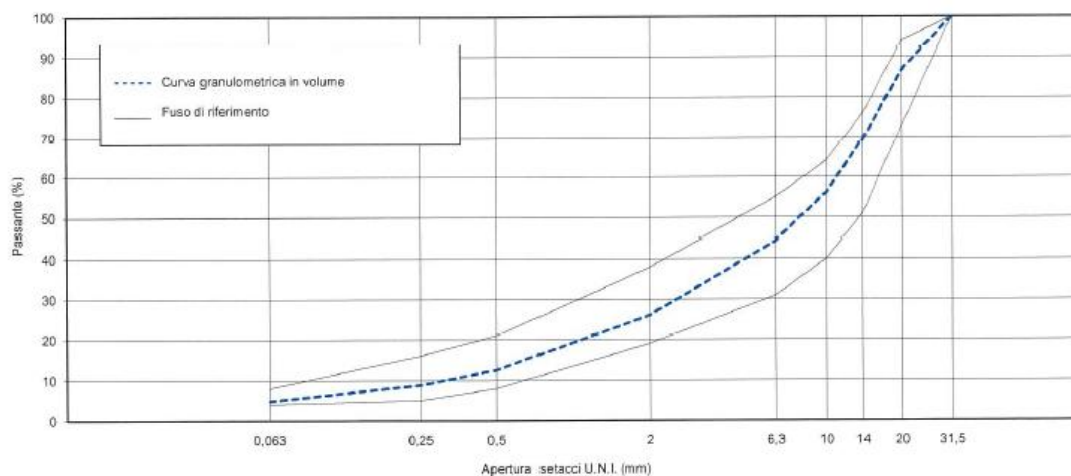


Figura 5.1 – Curva granulometrica degli inerti vergini

Aggregato d/D	Cave Macerata 0/4	Cave Macerata 10/20	Cave Macerata 20/32				Aggregato RA 0/14	Filler Edilcalc 0/1	Risultante granulometrica peso		Risultante granulometrica volume		Fuso	
									Trattenuti %	Passanti %	Trattenuti %	Passanti %	Passanti in volume %	
									peso		volume			
Analisi granulometriche (UNI EN 933-1) Set. UNI - Trattenuti %	31,5									100,0		100,0	100	100
	20		5,1	85,1					13,3	86,7	13,3	86,7	73	94
	14		51,2	10,7			4,9		17,3	69,4	17,3	69,4	51	76
	10		30,2	2,1			11,0		10,0	55,0	10,1	66,0	10	61
	6,3		6,3	1,8			32,1		11,6	44,3	11,6	44,4	31	55
	2	38,5	1,5				26,1		18,3	26,0	18,3	26,1	19	38
	0,5	40,4					10,1		13,5	12,5	13,6	12,5	8	21
	0,25	9,4					4,2		3,7	8,8	3,7	8,8	5	16
	0,063	8,0					5,1	17,0	4,0	4,8	4,0	4,8	4	8
	Filler	3,7	0,7	0,3			6,5	83,0	4,8		4,8			
% utilizzo										26	28	14		
										30	2			
														100
										Quota materiale di recupero (%)				
Gse gr/cm ³ (MVA aggr.)										2,610	2,660	2,670		
										2,670	2,650			
												2,650		
										Gse Mix				

Figura 5.2 – Studio granulometrico della miscela di inerti

La miscela è stata confezionata utilizzando un bitume modificato *hard* con polimeri in percentuale pari al 4,4% riferito al peso degli aggregati. Nello specifico, il tipo di legante utilizzato è un bitume PMB 45/80-70 dove i valori 45/80 indicano l'intervallo di penetrazione, mentre 70 indica il punto di rammollimento del bitume determinato mediante la prova di palla e anello.

Il polimero utilizzato per la modifica del bitume è un polimero SBR Radiale (Stryrene-Butadiene Rubber), una gomma sintetica ottenuta da stirene e butadiene. Il termine radiale è riferito alla struttura molecolare “a stella” del polimero (Radial polymer), in cui le catene polimeriche partono da un centro comune e si sviluppano formando una struttura ramificata (tipo tela di ragno) (Figura 5.3)

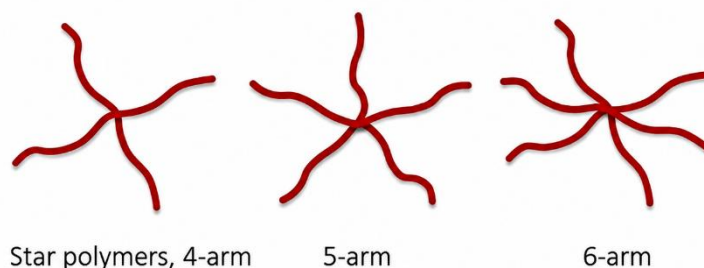


Figura 5.3 – Struttura molecolare di polimeri SBR Radiali

Questa tipologia di polimero rispetto ad un polimero SBR Lineare consente di conferire al bitume una maggiore elasticità, una maggiore resistenza alla deformazione (anti-rutting), una migliore stabilità alle alte temperature e una maggiore coesione con gli inerti.

La miscela oggetto di studio è un conglomerato bituminoso tiepido (*Warm Mix Asphalt*, WMA), ottenuto mediante l'aggiunta al legante bituminoso di un additivo chimico specifico, denominato Iterlow T, costituito da una miscela di composti amminici e additivi funzionali.

Tale additivo consente di ridurre le temperature operative lungo l'intero ciclo di produzione e posa del conglomerato: in fase di confezionamento, le temperature risultano comprese nell'intervallo 130–150 °C, mentre nelle successive fasi di stesa e compattazione *in situ* si attestano tra 90 e 120 °C. Contestualmente, l'additivo svolge una funzione di promotore di adesione, migliorando l'interazione tra legante e aggregati.

La possibilità di operare a temperature ridotte comporta una significativa diminuzione del fabbisogno energetico e delle emissioni in atmosfera, rendendo il processo produttivo più sostenibile. Inoltre, l'additivo risulta idoneo anche per la produzione di conglomerati tradizionali (*Hot Mix Asphalt*, HMA) in condizioni ambientali sfavorevoli, quali basse temperature (inferiori a 5 °C), e in presenza di esigenze logistiche legate a trasporti su lunghe distanze.

Nella Tabella 5.1 sono riportate le principali caratteristiche dell'additivo impiegato.

Proprietà tecniche	
Aspetto	Liquido
Colore	Giallo – bruno
Densità a 25°C	0.95 – 1.05 g/cm ³
Viscosità a 25°C	150 – 250 cP
Punto di infiammabilità	≥ 105 °C
Punto di scorrimento	≤ -5 °C

Tabella 5.1 – Proprietà tecniche additivo Iterlow T

Il dosaggio dell'additivo viene generalmente definito in un intervallo compreso tra lo 0.2% e lo 0.5% in massa rispetto al contenuto totale di bitume, considerando sia il legante vergine sia quello presente all'interno del materiale riciclato (RAP). All'interno del conglomerato in esame, utilizzato per la realizzazione dei provini è stato adottato un dosaggio pari allo 0.6%.

6. Programma sperimentale

Il programma sperimentale alla base della presente tesi viene illustrato in questo capitolo in cui vengono trattati gli obiettivi della sperimentazione, le procedure di laboratorio, il confezionamento dei provini e le prove svolte su di essi.

6.1 Obiettivi

L'obiettivo principale del presente elaborato di tesi sperimentale consiste nello svolgimento di un'analisi statistica della lavorabilità delle miscele bituminose, la quale è stata condotta basandosi sui risultati ottenuti dalla realizzazione di provini caratterizzati da altezze superiori a quelle comunemente adottate. Tale analisi viene condotta mediante l'impiego di sensori intelligenti, opportunamente inseriti all'interno del campione prima della fase di compattazione, effettuata tramite pressa giratoria, in conformità a quanto previsto dalla normativa UNI EN 12697-31.

In parallelo, il presente studio si propone di valutare il grado di uniformità della compattazione dei suddetti provini, mettendoli a confronto con campioni di altezza convenzionale. A tal fine, vengono utilizzati specifici parametri di lavorabilità, descritti nel paragrafo 3.5, tra cui il *Compaction Energy Index* (CEI), il *Mold Sensor Relative Rotation Capacity* (M-S RRC) e l'*indice dei vuoti*.

Un ulteriore obiettivo dell'indagine riguarda l'indagine sulla fattibilità della realizzazione in situ di strati in conglomerato bituminoso aventi spessori maggiori rispetto a quelli tradizionalmente impiegati, verificando che tali soluzioni non comportino un decadimento delle prestazioni meccaniche né una riduzione della durabilità del materiale nel lungo periodo.

Come detto pocanzi, l'intera sperimentazione è stata effettuata analizzando i risultati ottenuti da campioni di differenti altezze realizzati tutti con la stessa tipologia di

materiale, ovvero un conglomerato bituminoso destinato nell'utilizzo di cantiere, alla realizzazione di strati di base di una pavimentazione flessibile.

6.2 Struttura della sperimentazione

La presente tesi trae fondamento dalla campagna sperimentale, effettuata nel laboratorio del Dipartimento di Strade e Trasporti (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche. Tale attività sperimentale è stata articolata nella realizzazione di tre tipologie di provini caratterizzati da differenti altezze, pari rispettivamente a 115 mm, 150 mm e 180 mm. Tutti i provini sono stati confezionati mediante l'impiego di una fustella in acciaio avente diametro pari a 150 mm (Figura 6.1).

Le prime due altezze analizzate sono state scelte in quanto rappresentative degli spessori che comunemente vengono realizzati in situ ed i risultati ottenuti dalle prove basate sui suddetti spessori servono per poter effettuare il confronto con i risultati ottenuti dalle prove svolte sui campioni di altezza pari a 180 mm, i quali rappresentano strati con dimensioni maggiori rispetto a quelli convenzionali.

Per le tre diverse altezze sono state eseguite, sia prove in cui il sensore è stato posto all'interno della miscela bituminosa che successivamente sarebbe stata compattata, sia prove in cui il sensore veniva posto esternamente alla fustella e reso solidale con la stessa (Figura 6.1).



Figura 6.1 – Sensore posto esternamente alla fustella

Quest'ultima tipologia di prova è necessaria per riuscire a definire le rotazioni relative correlate al moto rigido che la fustella ha durante la fase di compattazione giratoria. Determinando il limite rigido della fustella, è possibile riuscire a determinare il valore dell'M-S RRC, parametro fondamentale che sarà utilizzato successivamente per andare ad analizzare e spiegare quali azioni agiscono sugli aggregati della miscela e la loro risposta a suddette azioni, quando vengono sottoposti ad una compattazione come quella giratoria, che in ambito di laboratorio, è quella che più fedelmente riesce a riprodurre gli effetti di una compattazione in situ mediante rulli meccanici.

Analizzando nello specifico le prove effettuate durante la campagna sperimentale, come detto in precedenza, è possibile distinguere le prove in cui il sensore è stato posto esternamente alla fustella e prove in cui il sensore è stato posto internamente al provino. Per quanto riguarda queste ultime, nel caso dei provini aventi altezza pari a 115 mm e 150 mm, l'aggregato intelligente è stato posizionato in corrispondenza della metà dell'altezza dello stesso (Figura 6.2), mentre nel caso di provini da 180 mm il sensore viene posto in tre posizioni differenti (Figura 6.3), in modo da poter analizzare tre regioni del provino stesso così da avere informazioni riguardo la variazione dei parametri di lavorabilità lungo l'altezza del provino. In particolare, i sensori vengono posti rispettivamente nella regione superiore del provino a tre quarti dell'altezza, nella regione inferiore ad un quarto dell'altezza e nella zona centrale del provino in corrispondenza della metà dell'altezza.

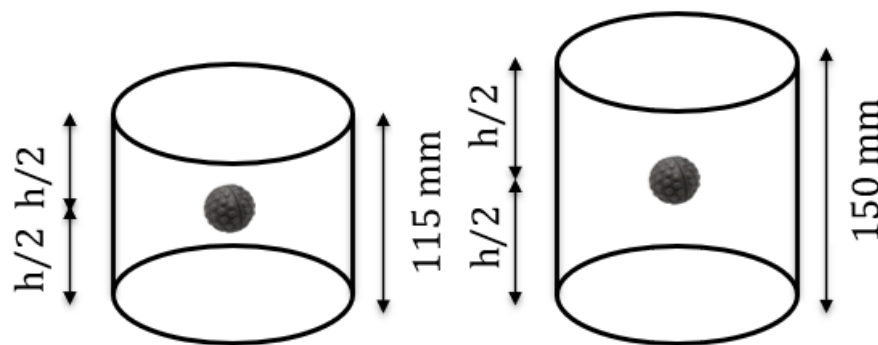


Figura 6.2 – Posizione sensore nei provini da 115 mm e 150 mm

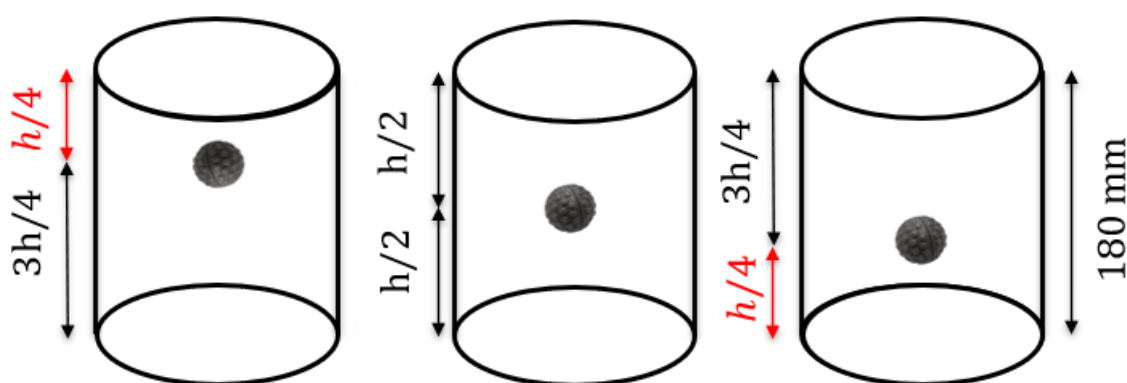


Figura 6.3 – Posizione sensore nelle diverse posizioni per i provini da 180 mm

Durante il periodo di sperimentazione sono stati realizzati complessivamente sette provini per ciascuna posizione del sensore e per ogni livello di altezza considerato. Inoltre, nell’ambito delle prove con sensore posto esternamente, sono stati confezionati tre provini per ciascuna altezza (Tabella 6.1). Nel complesso, l’attività sperimentale ha previsto la realizzazione di un totale di 44 prove.

	Altezza [mm]	Posizione intermedia	Posizione inferiore	Posizione superiore	Sensore esterno
Miscela di base	180	7	7	7	3
Miscela di base	150	7	-	-	3
Miscela di base	115	7	-	-	3

Tabella 6.1 – Numero totali di prove eseguite per tipologia di altezza e posizione del sensore

Tutte le prove sono state condotte adottando un sistema di identificazione univoco per ciascuna tipologia di provino realizzato, basato su una nomenclatura standardizzata. Tale criterio consente di distinguere in modo chiaro le diverse configurazioni sperimentali e di agevolare la successiva fase di analisi e confronto dei risultati. La nomenclatura utilizzata è di seguito illustrata:

180_mid_1

dove:

- **180** indica l'altezza del provino in esame; nel presente studio, come detto precedentemente, sono state considerate le altezze pari a 115 mm, 150 mm e 180 mm;
- **mid** identifica la posizione del sensore all'interno del provino. In particolare:
 - *mid* indica il posizionamento del sensore a metà dell'altezza del provino;
 - *top* indica il posizionamento del sensore a tre quarti dell'altezza, ovvero in prossimità della sommità;
 - *bottom* indica il posizionamento del sensore a un quarto dell'altezza, ovvero in prossimità della base;
 - per le prove realizzate con sensore posizionato esternamente, è stata adottata la dicitura *out*;
- il numero finale (ad esempio, **1**) rappresenta l'identificativo progressivo della singola prova.

Tale sistema di codifica garantisce una rapida e univoca interpretazione delle caratteristiche di ciascun provino, facilitando l'organizzazione e l'analisi dei dati sperimentali.

6.3 Calcolo delle masse dei provini

Il calcolo delle masse dei provini rappresenta la fase preliminare fondamentale da affrontare prima dell'avvio della sperimentazione vera e propria in laboratorio. Tale operazione risulta essenziale per determinare con precisione la quantità di materiale necessaria, in funzione dell'altezza del provino da realizzare e del diametro della fustella impiegata.

Questa fase assume particolare rilevanza in quanto il conglomerato bituminoso viene fornito dall'impianto di produzione in sacchi e deve quindi essere opportunamente suddiviso sulla base del peso teorico che viene calcolato in questa fase, al fine di garantire l'uniformità dei campioni e la corretta esecuzione delle prove.

Per la determinazione del peso teorico di ciascun provino, è necessario considerare una serie di parametri fondamentali. In primo luogo, la *massa volumica massima teorica* della miscela, che rappresenta la densità del conglomerato in condizioni ideali, ossia in assenza totale di vuoti d'aria. A questa si affianca la *percentuale di vuoti* prevista nel provino a seguito della compattazione, che, sulla base di esperienze pregresse, è stata assunta pari al 6% per una compattazione effettuata mediante pressa giratoria a 100 giri.

Tenendo conto di tale percentuale di vuoti, si ricava la *massa volumica effettiva* del conglomerato, ovvero la densità reale del materiale in condizioni operative. Infine, la determinazione del peso teorico richiede la conoscenza delle dimensioni geometriche del provino, in particolare dell'altezza finale a seguito della compattazione e del diametro, coincidente con quello della fustella utilizzata, pari nel caso in esame a 150 mm.

L'insieme di questi parametri consente di definire in modo accurato la massa di materiale da impiegare per la realizzazione di ciascun provino (Tabella 6.2), garantendo la coerenza e l'affidabilità dell'intero processo sperimentale.

Provino	Gmax [g/cm³]	AV [%]	Geff [g/cm³]	H [cm]	Diametro [cm]	M teorica [g]
115_out	2.490	6.0	2.3406	11.5	15	4757
150_out	2.490	6.0	2.3406	15	15	6204
180_out	2.490	6.0	2.3406	18	15	7445

***Tabella 6.2** – Valori delle masse teoriche dei provini senza sensore*

I valori delle masse teoriche precedentemente determinati fanno riferimento ai provini privi di sensore interno. Nel caso in cui sia previsto l’inserimento dell’aggregato intelligente all’interno del provino, risulta necessario apportare un’opportuna correzione alla massa del materiale.

In particolare, tale correzione viene effettuata determinando il volume occupato dal sensore all’interno del provino e calcolando il corrispondente quantitativo di conglomerato bituminoso che sarebbe altrimenti presente in quella porzione. Il peso del materiale da sottrarre è quindi ottenuto a partire dalla massa volumica effettiva del conglomerato, tenendo conto delle condizioni operative definite in precedenza.

In questo modo, la massa del provino con sensore viene opportunamente ridotta rispetto a quella teorica calcolata in precedenza, garantendo che il volume complessivo rimanga invariato e che le condizioni di compattazione risultino confrontabili con quelle dei provini privi di sensore.

Di seguito (Tabella 6.3) si riportano i valori delle masse dei provini che prevedono l’inserimento del sensore al loro interno, determinati tenendo conto del volume occupato dall’aggregato intelligente e del conseguente quantitativo di materiale sostituito.

Provino	M teorica [g]	V SmartRock [cm³]	G_{eff} [g/cm³]	M_{CB} equivalente [g]	M teorica finale [g]
115_mid	4757	21.9	2.3406	51.25914	4705
150_mid	6204	21.9	2.3406	51.25914	6153
180_top	7445	21.9	2.3406	51.25914	7394
180_mid	7445	21.9	2.3406	51.25914	7394
180_bottom	7445	21.9	2.3406	51.25914	7394

Tabella 6.2 – Valori delle masse teoriche dei provini con sensore interno

6.4 Protocolli della sperimentazione

Nel presente paragrafo viene illustrato in modo sistematico e rigoroso il procedimento adottato nel corso della sperimentazione sulla quale la presenti tesi si basa. In particolare, si descrivono le fasi operative dell'attività di laboratorio e le metodologie applicate, evidenziando i criteri seguiti nella progettazione e nell'esecuzione delle prove. Tale esposizione è finalizzata a garantire la trasparenza e la riproducibilità del protocollo sperimentale, nonché a fornire un solido inquadramento metodologico per la successiva analisi e interpretazione dei risultati.

Il programma sperimentale è stato articolato in tre fasi principali, ovvero:

1. realizzazione e compattazione dei provini con sensore esterno
2. realizzazione e compattazione dei provini con sensore interno
3. analisi del contenuto di vuoti sui provini realizzati in assenza di sensore

Tale suddivisione consente una trattazione sistematica delle diverse configurazioni sperimentali adottate, favorendo un confronto coerente tra i risultati ottenuti nelle varie condizioni di prova.

6.4.1 Realizzazione e compattazione dei provini con sensore esterno

Il processo di compattazione dei provini ha inizio con la fase di riscaldamento del materiale proveniente dall'impianto di produzione, il quale è fornito all'interno di appositi sacchi. Al fine di limitare gli sprechi, viene riscaldata esclusivamente la quantità di conglomerato necessaria per la realizzazione dei provini previsti nella giornata di prova.

Il materiale, ancora contenuto nei sacchi, viene disposto in forno ad una temperatura di 160 °C per un tempo minimo di tre ore, così da ripristinare adeguate condizioni di lavorabilità del conglomerato bituminoso. Contestualmente, all'interno del forno viene collocata anche la fustella impiegata nelle successive operazioni di compattazione.

Trascorso tale intervallo temporale, il materiale raggiunge una consistenza idonea per le successive operazioni.

Si procede quindi alla fase di sporzionamento, durante la quale il conglomerato viene trasferito dai sacchi a un apposito vassoio (Figura 6.4). Mediante l'impiego di una sassola (Figura 6.5), il materiale viene successivamente suddiviso in contenitori di dimensioni ridotte, in accordo con i valori delle masse teoriche dei provini precedentemente determinati. Tale operazione consente di garantire un'elevata

precisione nella preparazione dei campioni e di assicurare la ripetibilità delle condizioni sperimentali.



Figura 6.4 – Vassoio per il contenimento del conglomerato bituminoso



Figura 6.5 – Sassola per lo sporzionamento del materiale

In tal modo, ciascun contenitore risulta contenere la quantità di materiale necessaria per la realizzazione di uno specifico provino. Al fine di garantire una corretta identificazione e tracciabilità, ogni contenitore viene etichettato mediante l’inserimento di un foglietto riportante il codice identificativo del provino corrispondente, che verrà successivamente realizzato con la porzione di materiale assegnata.

Una volta completate le operazioni di sporzionamento e identificazione, il materiale viene nuovamente collocato all’interno del forno (Figura 6.7), mantenuto a una

temperatura compresa tra 160 e 165 °C per un ulteriore intervallo di circa tre ore. Tale fase è finalizzata a garantire che tutto il materiale raggiunga una temperatura uniforme e prossima a quella di compattazione, che teoricamente dovrebbe essere compresa tra i 140 °C e i 160°C.



Figura 6.6 – Forno per il riscaldamento del conglomerato bituminoso, MPM Instruments s.r.l. – Modello MPM M 250 VF

Una volta trascorso il tempo necessario per il riscaldamento del materiale, si procede con la fase di realizzazione dei provini. A tal fine, dal forno vengono estratti sia la fustella sia il contenitore con al suo interno la quantità di materiale precedentemente pesata per la realizzazione del singolo provino.

La procedura di confezionamento ha inizio con il posizionamento di un disco di carta sul fondo della fustella; successivamente, l'intero quantitativo di conglomerato bituminoso viene versato all'interno dello stampo (Figura 6.7). Una volta effettuato il riempimento, si procede con il posizionamento di un secondo disco di carta sulla superficie superiore del materiale.

L'impiego dei suddetti dischi di carta è finalizzato ad agevolare le operazioni di estrazione del provino dalla fustella al termine del processo di compattazione.



Figura 6.7 – Materiale disposto all'interno della fustella



Figura 6.8 – Disco in carta disposto sulla sommità del materiale da compattare

Prima di avviare tale processo, risulta necessario verificare la temperatura del materiale, utilizzando un termometro a sonda (Figura 6.8), al fine di accertare il raggiungimento dell'intervallo termico ottimale per la compattazione. Contemporaneamente alla misurazione della temperatura, si provvede a fissare il sensore sulla parte esterna della fustella, il quale sarà già collegato tramite Bluetooth allo smartphone. Tra il sensore e la fustella viene interposto uno strato di cartone, al fine di garantirne un'adeguata protezione dal calore. Il sensore viene quindi fissato allo stampo mediante nastro carta (Figura 6.10), in modo da renderlo solidale con la fustella stessa.

Come già evidenziato in precedenza, questa fase risulta fondamentale per la determinazione delle rotazioni relative indotte dal moto rigido della fustella. In tal modo è stato possibile individuare il limite rigido della fustella, consentendo la successiva determinazione dell'M-S RRC dei diversi provini realizzati.

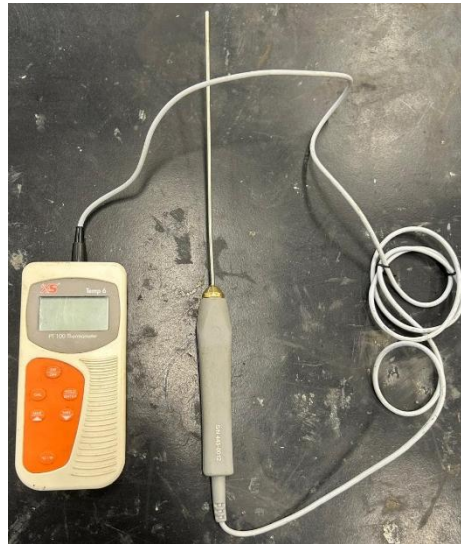


Figura 6.9 – Termometro a sonda
RTD 310 Thermometer



Figura 6.10 – Posizionamento del sensore esterno alla fustella con interposizione di uno strato di cartone e fissaggio mediante nastro carta

Una volta fissato il sensore e completata la fase di misurazione della temperatura, si procede con l'inserimento della fustella all'interno della pressa giratoria (Figura 6.11). Al fine di agevolare lo scorrimento della fustella sul piano di posa del macchinario, può essere applicata una modesta quantità di grasso lubrificante.

Una volta posizionata la fustella, tramite il terminale di controllo collegato alla macchina, si segnala l'avvenuto inserimento dello stampo. Il sistema esegue quindi una verifica preliminare del corretto centraggio del provino; qualora tale condizione risulti soddisfatta, è possibile procedere con le fasi successive della prova.

Prima dell'avvio del processo di compattazione, e successivamente alla verifica del centraggio, è necessario eseguire la procedura di calibrazione del sensore, secondo le modalità descritte nel paragrafo 3.3. Completata tale operazione, si può avviare la registrazione del sensore e dopo sei secondi si può procedere con l'avvio della prova. La pressa giratoria opera applicando una pressione verticale pari a 600 kPa, con un angolo di inclinazione di $1,25^\circ$, effettuando complessivamente 100 cicli rivolutivi, in accordo con le condizioni sperimentali precedentemente definite.



Figura 6.11 – Fustella inserita all'interno della pressa giratoria, prima

Al termine della prova di compattazione, la fustella viene estratta dal macchinario e si procede all'operazione di estrusione del provino appena compattato. Tale operazione viene eseguita mediante l'impiego di un martinetto pneumatico, situato sul piano di appoggio della pressa (Figura 6.12), che consente la fuoriuscita controllata del campione dalla fustella, preservandone l'integrità e facilitandone la successiva manipolazione.



Figura 6.12 – Provino estratto dalla fustella mediante martinetto pneumatico

Il provino così estratto viene opportunamente identificato mediante l'apposizione, sulla sua superficie, del codice identificativo corrispondente (Figura 6.13), e successivamente lasciato raffreddare a temperatura ambiente.



Figura 6.13 – Provini estratti dalla fustella identificati e lasciati raffreddare a temperatura ambiente

Una volta completata la fase di raffreddamento, il provino viene sottoposto a sezionamento mediante l'utilizzo di una segatrice circolare ad acqua, al fine di ottenere tre porzioni distinte (Figura 6.14). Tale operazione è finalizzata alla successiva analisi del contenuto di vuoti.

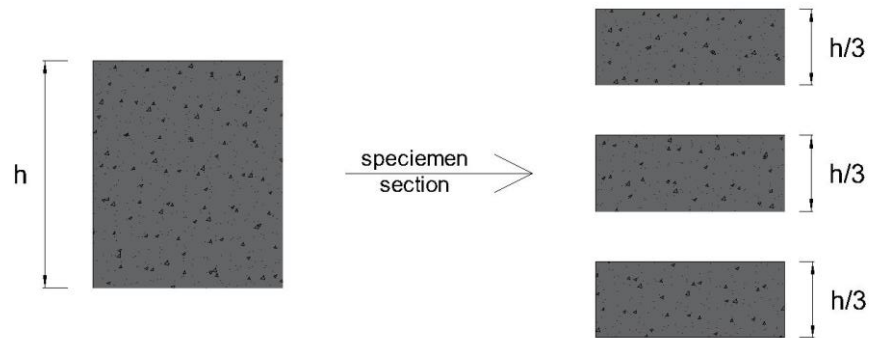


Figura 6.14 – Schema sezionamento dei provini

In particolare, la suddivisione in tre parti consente di esaminare separatamente la distribuzione dei vuoti nella zona superiore, centrale e inferiore del provino, permettendo così di valutare in maniera approfondita il grado di compattazione e le sue variazioni lungo la direzione verticale, ovvero in funzione della profondità all'interno del campione.

I provini sezionati vengono inizialmente asciugati superficialmente e successivamente identificati mediante l'apposizione del codice identificativo, integrato da una dicitura aggiuntiva atta a distinguere la specifica porzione del provino analizzata (Figura 6.15).



Figura 6.15 – Provini sezionati ed identificati

Poiché, a seguito delle operazioni di taglio, i campioni risultano umidi, essi vengono lasciati ad asciugare a temperatura ambiente per un periodo minimo di 24 ore, al fine di garantire la completa evaporazione dell'acqua eventualmente presente nei pori del materiale. Trascorso tale intervallo temporale, si procede con l'analisi del contenuto di vuoti per ciascuna porzione di provino.

La prima fase dell'analisi prevede l'individuazione, sulla superficie del campione, di quattro punti equidistanti lungo la circonferenza, mediante l'utilizzo di una piastra di centraggio (Figura 6.16). Tali punti vengono assunti come riferimenti per la misurazione dell'altezza del provino, effettuata tramite calibro elettronico.



Figura 6.16 – Piastra di centraggio

La rilevazione dell'altezza in quattro posizioni distinte è necessaria in quanto il processo di taglio non garantisce superfici perfettamente planari; pertanto, il valore medio delle quattro misurazioni consente di ottenere una stima più accurata dell'altezza effettiva della sezione.

La determinazione del contenuto di vuoti si basa su una procedura di pesature successive. In primo luogo, si esegue una pesata a secco del campione (Figura 6.17), seguita da una pesata idrostatica (Figura 6.18).



Figura 6.17 – Pesatura a secco del campione



Figura 6.18 – Processo di pesatura mediante pesa idrostatica

Successivamente, i provini vengono immersi in acqua per un tempo minimo di un'ora, così da consentire all'acqua di penetrare e riempire completamente i vuoti presenti nel materiale (Figura 6.19). Al termine del periodo di immersione, i campioni vengono nuovamente sottoposti a pesata idrostatica, quindi estratti, asciugati superficialmente e pesati ancora mediante pesata tradizionale, completando così il ciclo di misurazioni necessario per l'analisi dei vuoti.



Figura 6.19 – Provini che vengono lasciati immersi in acqua dopo la pesa idrostatica

6.4.2 Realizzazione e compattazione dei provini con sensore interno

Il processo di realizzazione e compattazione dei provini dotati di sensore interno presenta una struttura analoga a quella precedentemente descritta per i provini privi di sensore. Analogamente, la procedura prende avvio con il riscaldamento in forno dei sacchi contenenti il materiale proveniente dall'impianto produttivo. Una volta raggiunta una temperatura tale da rendere il conglomerato adeguatamente lavorabile, il materiale viene trasferito dal sacco all'interno del vassoio precedentemente illustrato (Figura 6.4).

A differenza del caso precedente, tuttavia, il materiale destinato alla realizzazione di ciascun provino viene suddiviso in due porzioni distinte, in funzione della posizione prevista per il sensore. Per ogni provino si utilizzano quindi due contenitori: uno contenente il materiale destinato a costituire lo strato inferiore del campione e l'altro contenente il materiale che andrà a formare la porzione superiore.

La suddivisione del materiale è effettuata sulla base dell'altezza di posizionamento del sensore e della massa teorica complessiva del provino, precedentemente determinata. Ad esempio, nel caso in cui il sensore sia posizionato a metà dell'altezza del provino, la quantità totale di materiale viene ripartita in due porzioni uguali. Qualora, invece, il sensore debba essere collocato nella parte inferiore del provino, il materiale viene suddiviso in una porzione pari a un quarto della massa totale - destinata a costituire lo strato inferiore su cui poggia il sensore - e in una porzione pari ai restanti tre quarti, che andrà a costituire lo strato sovrastante.

Tale procedura consente di garantire un corretto posizionamento del sensore all'interno del provino e di mantenere la coerenza geometrica e volumetrica del campione rispetto alle condizioni sperimentali definite.

In questo caso, le diverse porzioni di materiale devono essere opportunamente identificate mediante l'inserimento di un apposito foglietto all'interno di ciascun contenitore. In particolare, nel caso di suddivisione del materiale in due parti di uguale entità, è sufficiente riportare sul foglietto il solo codice identificativo della prova.

Diversamente, qualora la ripartizione del materiale avvenga in porzioni non equivalenti, si rende necessario integrare il codice identificativo con una dicitura aggiuntiva che specifichi lo strato di appartenenza del materiale stesso, distinguendo quindi tra porzione destinata alla realizzazione dello strato inferiore e quella relativa allo strato superiore del provino.

Una volta completate le operazioni di sporzionamento, analogamente a quanto descritto per i provini con sensore esterno, i contenitori aventi al loro interno le diverse porzioni di materiale, unitamente alla fustella, vengono collocati all'interno del forno a una temperatura di 160 °C per un intervallo di tempo pari a circa tre ore, al fine di garantire il raggiungimento di temperature uniformi e idonee alla compattazione. Trascorso tale periodo, si può procedere alla fase di realizzazione del provino.

Prima di effettuare la rimozione del materiale e della fustella dal forno, è necessario predisporre il sensore: in particolare, esso viene collegato tramite tecnologia Bluetooth a un dispositivo mobile e successivamente inserito all'interno di un apposito guscio protettivo.

Per facilitare il corretto assemblaggio del guscio, le due semisfere che lo compongono sono contrassegnate con specifiche indicazioni: una recante la lettera "P", in corrispondenza della sede destinata ad alloggiare la batteria che alimenta il sensore, e l'altra contrassegnata con la lettera "S", relativa al vano destinato al sensore stesso (Figura 6.20). Tale soluzione risulta particolarmente utile poiché il guscio è progettato su misura rispetto alle dimensioni del dispositivo; un eventuale posizionamento errato delle due parti ne impedirebbe la corretta chiusura.



Figura 6.20 – Identificazione delle due semisfere che costituiscono il guscio

Al fine di impedire eventuali movimenti del sensore all'interno del guscio durante la fase di compattazione, le due semisfere che lo costituiscono devono essere rese solidali. A tal scopo, sulla superficie interna della porzione contrassegnata con la lettera "P" viene applicato del nastro biadesivo; in questo modo, una volta chiuso, il guscio e il sensore risultano uniti in un unico corpo rigido (Figura 6.21).



Figura 6.21 – Condizione del guscio protettivo a seguito della fase di compattazione: è possibile osservare l'applicazione del nastro biadesivo, impiegato al fine di garantire la solidarizzazione del sensore con il guscio stesso.

Inoltre, sulla superficie esterna del guscio si provvede a tracciare, mediante un pennarello bianco, un segno in corrispondenza dell'asse verticale Z del sensore, identificato sul dispositivo stesso da un apposito riferimento di colore rosso. Parallelamente, viene riportata anche la direzione dell'asse orizzontale X (Figura 6.22). Queste informazioni risultano indispensabili per le fasi successive, poiché consentono di orientare correttamente il sensore all'interno del provino e di posizionarlo in modo da garantire l'asse Z sia disposto verticalmente verso l'alto.



Figura 6.22 – Dettaglio della marcatura recante l'indicazione dell'asse verticale **Z** (evidenziato mediante un punto) e della direzione dell'asse orizzontale **X** (indicato tramite un segmento).

Una volta terminato il processo di preparazione dell'aggregato intelligente, si può procedere con la fase di preparazione del provino. Come prima cosa vengono estratti dal forno la fustella ed esclusivamente i contenitori con all'interno le due parti dello stesso provino, si dispone sul fondo della fustella un disco di carta e successivamente si versa la prima parte di materiale al suo interno (Figura 6.23).

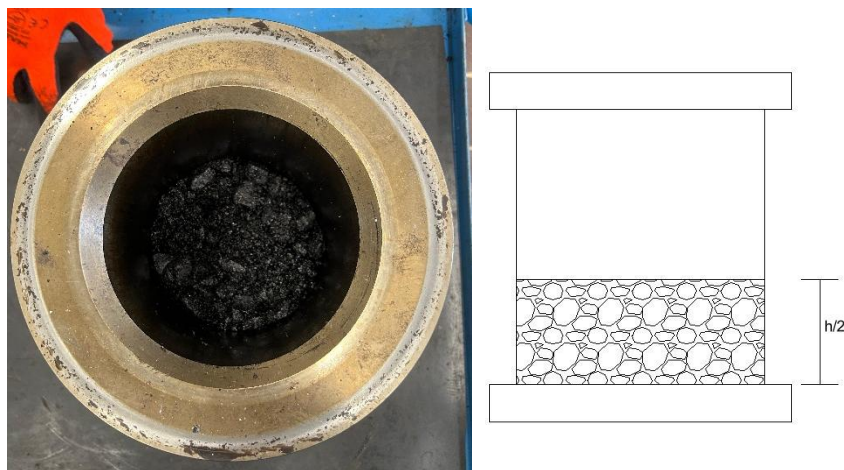


Figura 6.23 – Prima parte del materiale versata all'interno della fustella

Successivamente si procede al posizionamento del sensore all'interno del provino (Figura 6.24). Prima di effettuare tale operazione, mediante l'impiego di una spatola, si provvede a preparare un'adeguata superficie di appoggio, riorganizzando il materiale e spostando gli elementi di maggiori dimensioni.

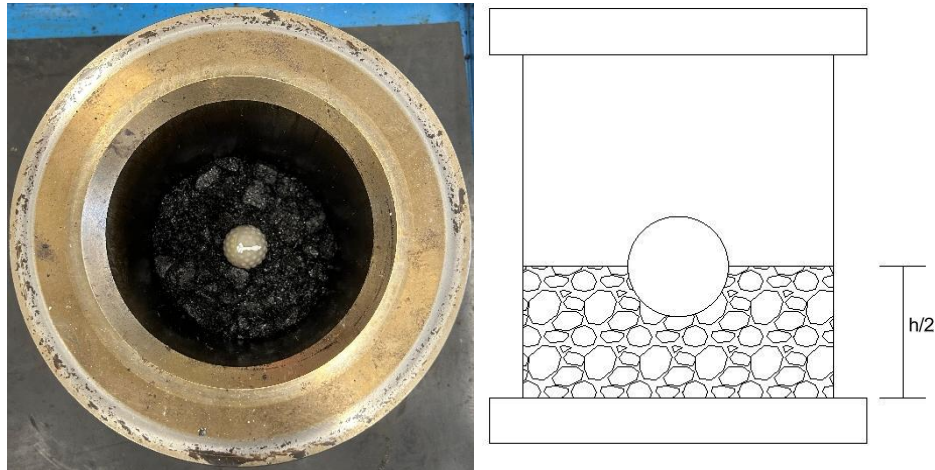


Figura 6.24 – Posizionamento del sensore all'interno della fustella

Tale accorgimento è finalizzato a evitare il contatto diretto tra gli aggregati di dimensioni più elevate e il dispositivo, condizione che potrebbe interferire con il corretto funzionamento del sensore, limitarne il movimento e, di conseguenza, compromettere l'affidabilità dei dati acquisiti durante la prova.

Il sensore deve essere posizionato in modo tale che l'asse Z risulti orientato verticalmente verso l'alto; inoltre, l'asse X deve essere disposto in modo che, una volta collocata la fustella all'interno della pressa giratoria, esso risulti uscente e perpendicolare rispetto al piano frontale del macchinario (Figura 6.25). Tale configurazione garantisce un corretto riferimento spaziale per l'acquisizione e l'interpretazione dei dati durante le fasi di compattazione.



Figura 6.25 - Dettaglio di come il sensore viene orientato rispetto alla fustella

Una volta posizionato accuratamente il sensore, si procede con il versamento della restante porzione di materiale necessaria alla realizzazione del provino. Al fine di evitare che tale operazione possa causare spostamenti indesiderati del dispositivo, si adottano specifici accorgimenti operativi.

In particolare, mediante l'impiego congiunto di una spatola e di una sassola, si prelevano dal contenitore tre o quattro piccole quantità di materiale a granulometria più fine, che vengono delicatamente deposte al di sopra del sensore, in modo da creare uno strato protettivo iniziale. Successivamente, sempre con la dovuta cautela, si provvede al versamento della restante parte del conglomerato (Figura 6.26).

Completata tale fase, si procede alla misurazione della temperatura del materiale mediante un termometro a sonda (Figura 6.27), al fine di verificare il raggiungimento delle condizioni termiche idonee alla compattazione. Infine, viene posizionato sulla sommità del provino il secondo disco di carta (Figura 6.28), utile a facilitare le operazioni di estrazione al termine della prova

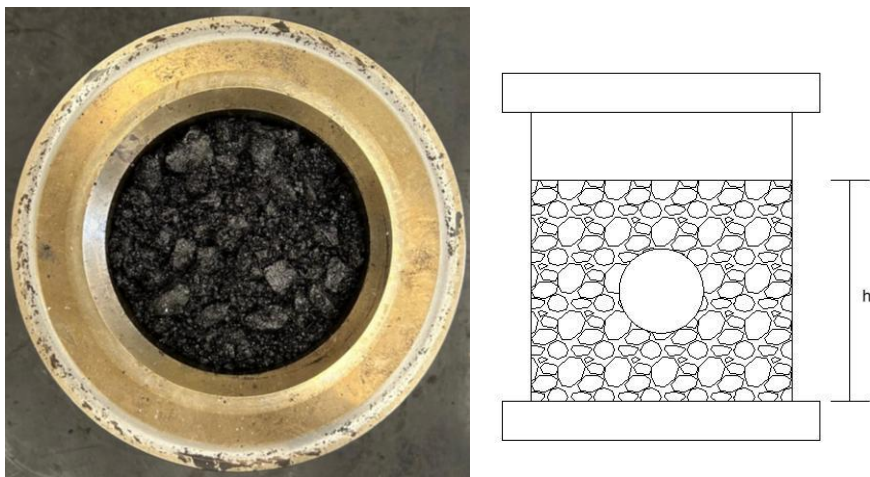


Figura 6.26 – Versamento della restante parte del materiale



Figura 6.27 – Misurazione della temperatura mediante termometro a sonda



Figura 6.28 – Posizionamento del secondo disco di carta sulla sommità del materiale

Una volta che il provino è pronto per essere sottoposto a compattazione, la fustella viene inserita all'interno della pressa giratoria e, tramite il terminale di controllo collegato al macchinario, si segnala l'avvenuto posizionamento dello stampo, eseguendo la procedura di avvio della prova descritta nel Paragrafo 3.4.1.

Il sistema esegue quindi una verifica preliminare del corretto centraggio del provino; qualora tale condizione risulti soddisfatta, è possibile procedere con le fasi successive della prova.

Successivamente alla verifica del centraggio, e prima dell'avvio della compattazione, è necessario eseguire la procedura di calibrazione del sensore secondo le modalità descritte nel paragrafo 3.3. Una volta completata tale operazione, si avvia la registrazione dei dati da parte del sensore e, trascorsi sei secondi, si procede con l'avvio della prova.

Diversamente da quanto previsto per le prove con sensore esterno, al termine del processo di compattazione il provino viene estruso dalla fustella mediante il medesimo martinetto pneumatico e sottoposto immediatamente a pesatura. Successivamente, il campione viene fratturato al fine di consentire il recupero del sensore prima che il conglomerato bituminoso si raffreddi e solidifichi (Figura 6.29).

Di conseguenza, in questa tipologia di prove, a differenza di quanto avviene per i provini con sensore esterno, non è possibile eseguire ulteriori analisi sui provini compattati, in quanto questi vengono distrutti durante la fase di recupero del dispositivo.



Figura 6.29 – Fase di rottura del provino (A) ed estrazione del sensore (B)

7. Analisi dei risultati

Nel presente paragrafo vengono analizzati i risultati derivanti dalla sperimentazione, con l'obiettivo di studiare statisticamente la possibilità di realizzare strati in conglomerato bituminoso con spessori superiori rispetto a quelli convenzionalmente adottati.

L'analisi si concentra sull'interpretazione dei dati raccolti durante le prove, esaminando in particolare Compaction Energy Index (CEI), il Mold Sensor Relative Rotation Capacity (M-S RRC), la distribuzione dei vuoti e come il valore di questi parametri possa variare in funzione della profondità all'interno del materiale. Attraverso tale approccio, si intende verificare se l'incremento dello spessore degli strati sia compatibile con il mantenimento di adeguati livelli prestazionali e di omogeneità del conglomerato.

Le prove eseguite sui diversi provini possono essere così sintetizzate:

- valutazione della compattabilità mediante l'analisi del contenuto di vuoti e del parametro CEI;
- valutazione della lavorabilità attraverso un'analisi congiunta dei parametri CEI e M-S RRC;
- valutazione delle rotazioni relative degli aggregati mediante l'interpretazione dei dati registrati dal sensore, ovvero tramite il parametro M-S RRC;
- analisi del grado di compattazione sulla base dell'interpretazione dei dati relativi all'indice dei vuoti.

7.1 Rotazioni relative della fustella

Nel presente paragrafo vengono riportati e analizzati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali condotte su provini di diverse altezze, nelle quali il sensore è stato posizionato esternamente rispetto alla fustella.

L'analisi è finalizzata a valutare il comportamento del conglomerato bituminoso durante il processo di compattazione, con particolare riferimento all'influenza dello spessore del provino sui parametri prestazionali considerati, consentendo così un confronto diretto tra le differenti configurazioni analizzate.

7.1.1 RR - provini 115_out

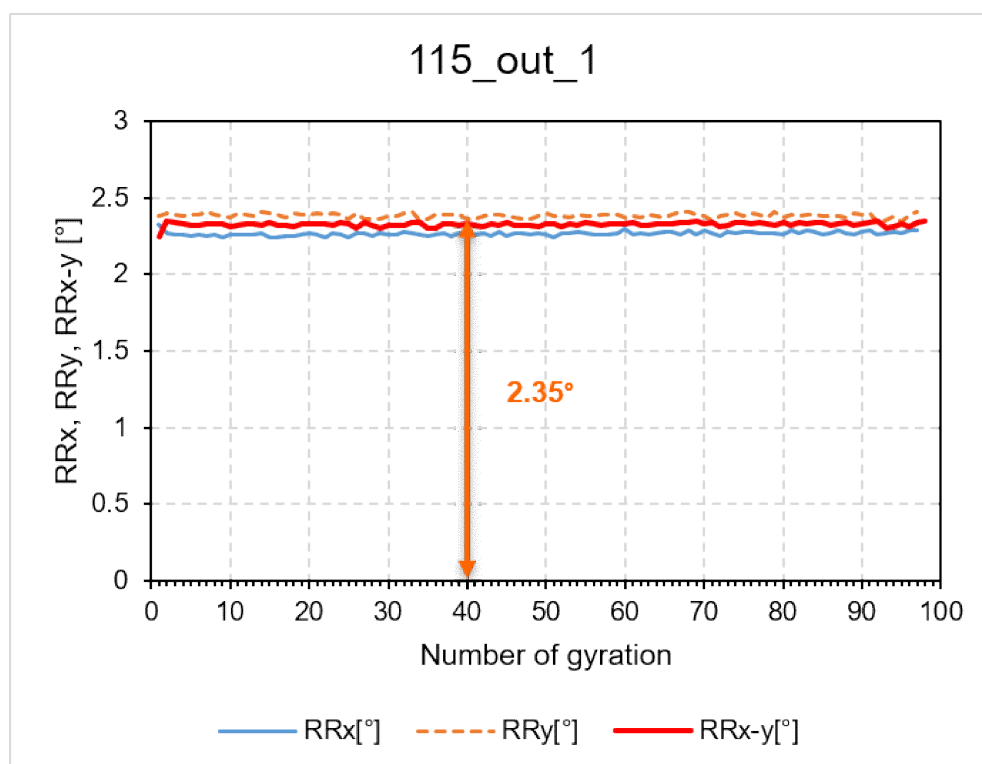


Figura 7.1 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 115_out_1

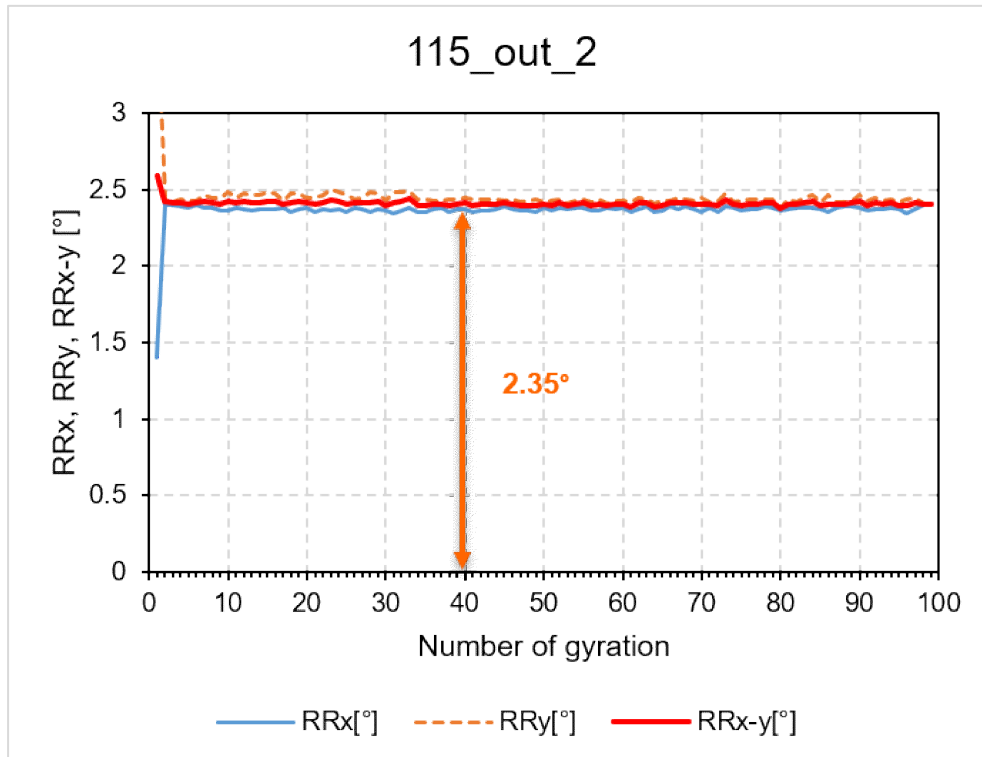
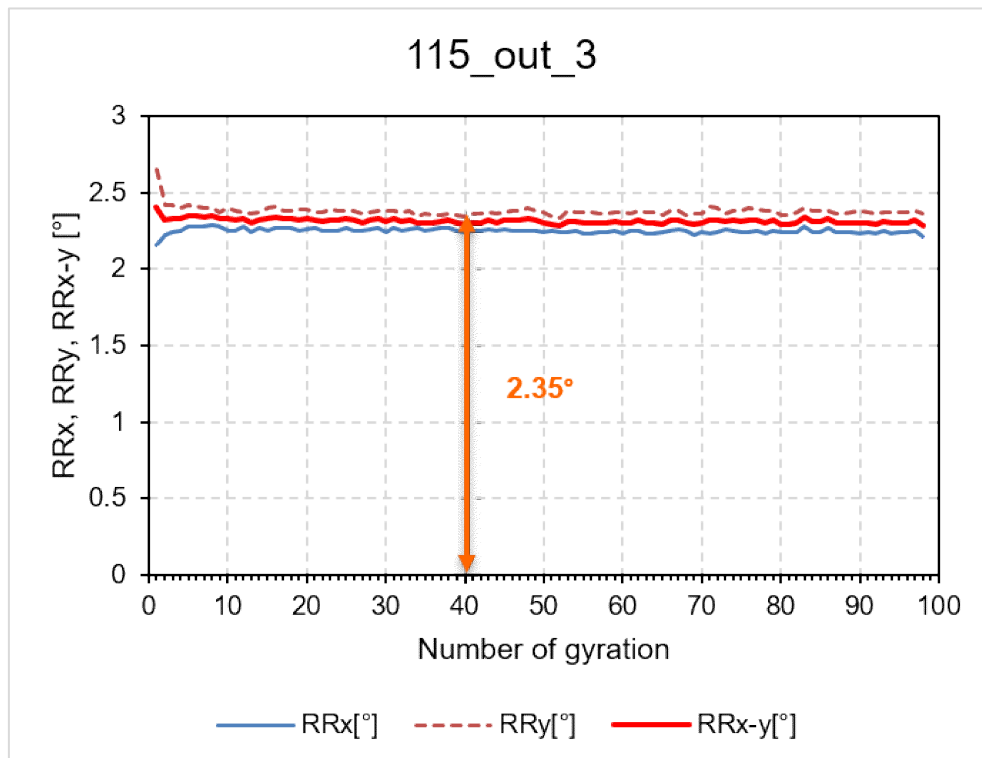


Figura 7.2 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 115_out_2

Figura 7.3 Curve Relative Rotation (RR) del provino 115_out_3



7.1.2 RR - provini 150_out

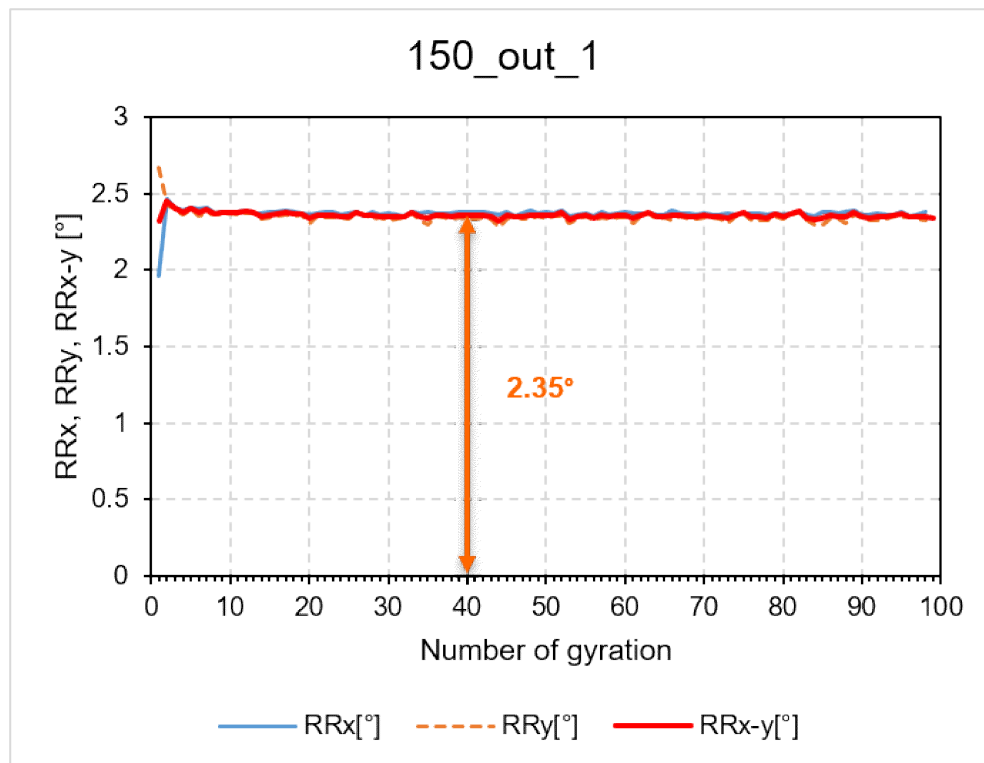


Figura 7.4 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 150_out_1

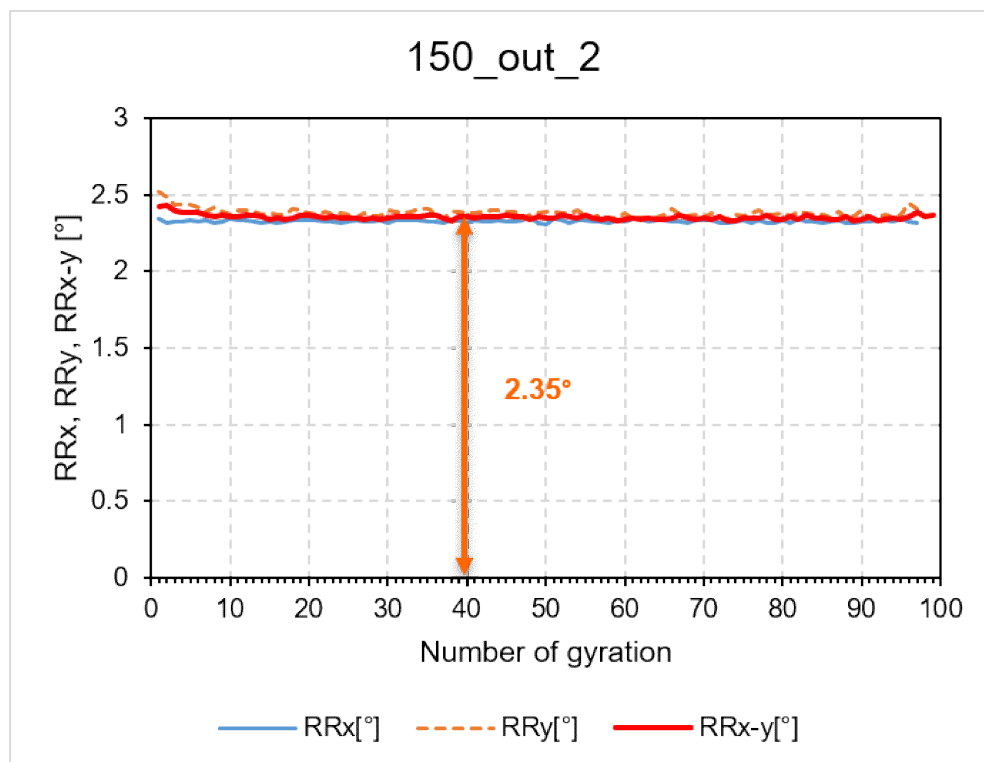


Figura 7.5 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 150_out_2

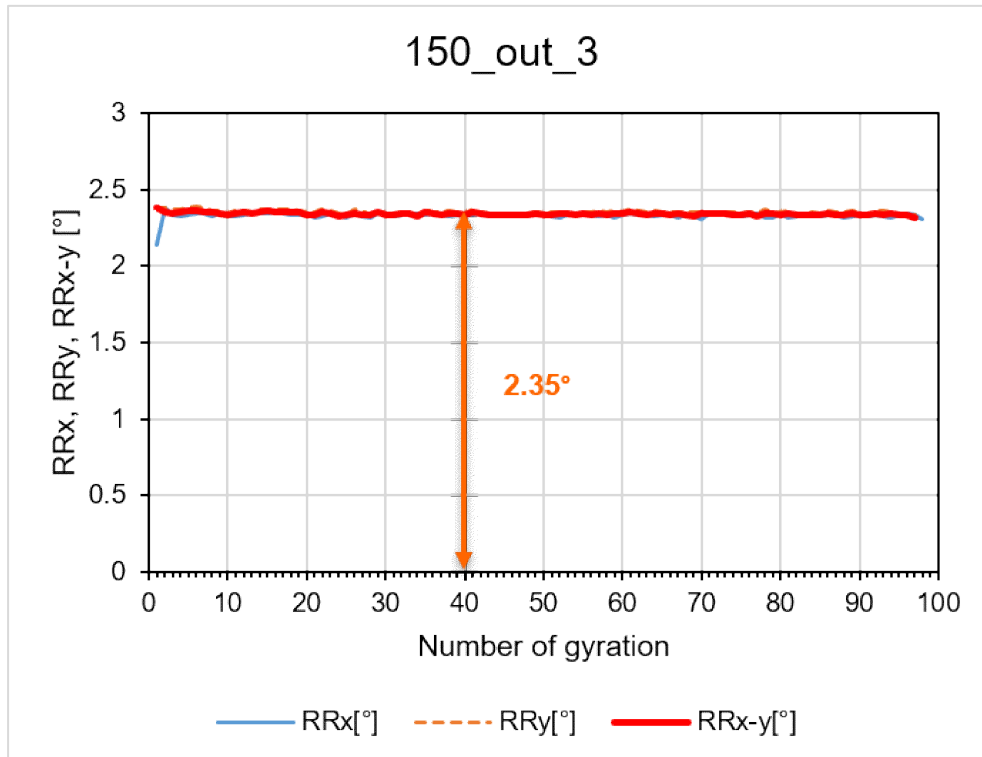


Figura 7.6 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 150_out_3

7.1.3 RRC - provini 180_out

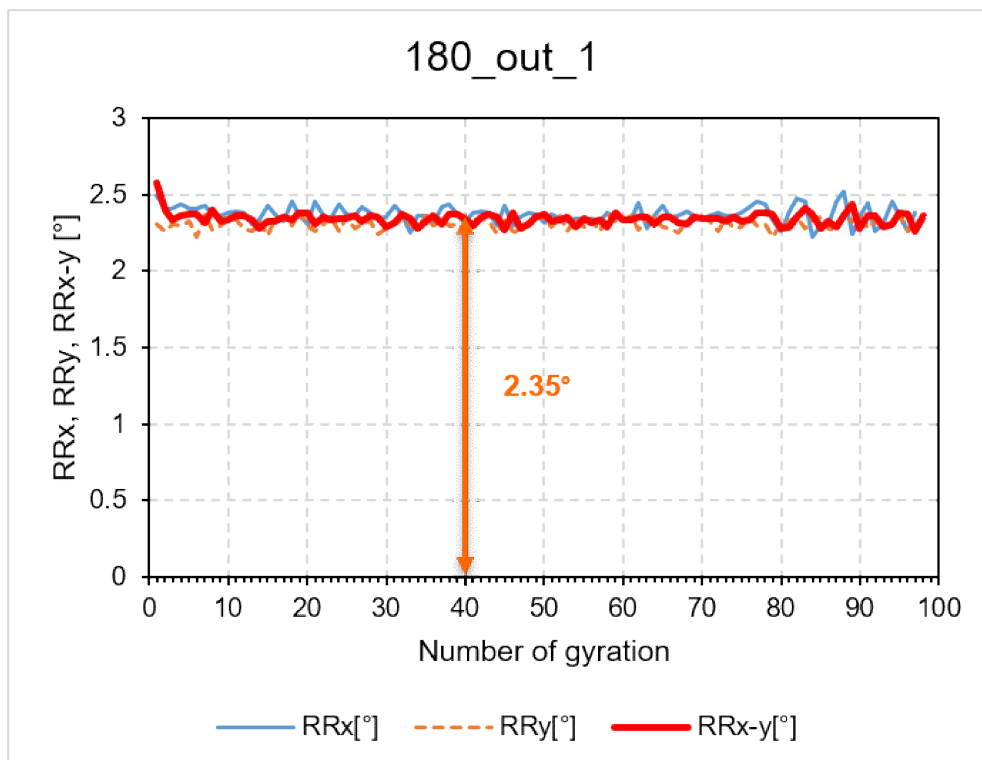


Figura 7.7 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 180_out_1

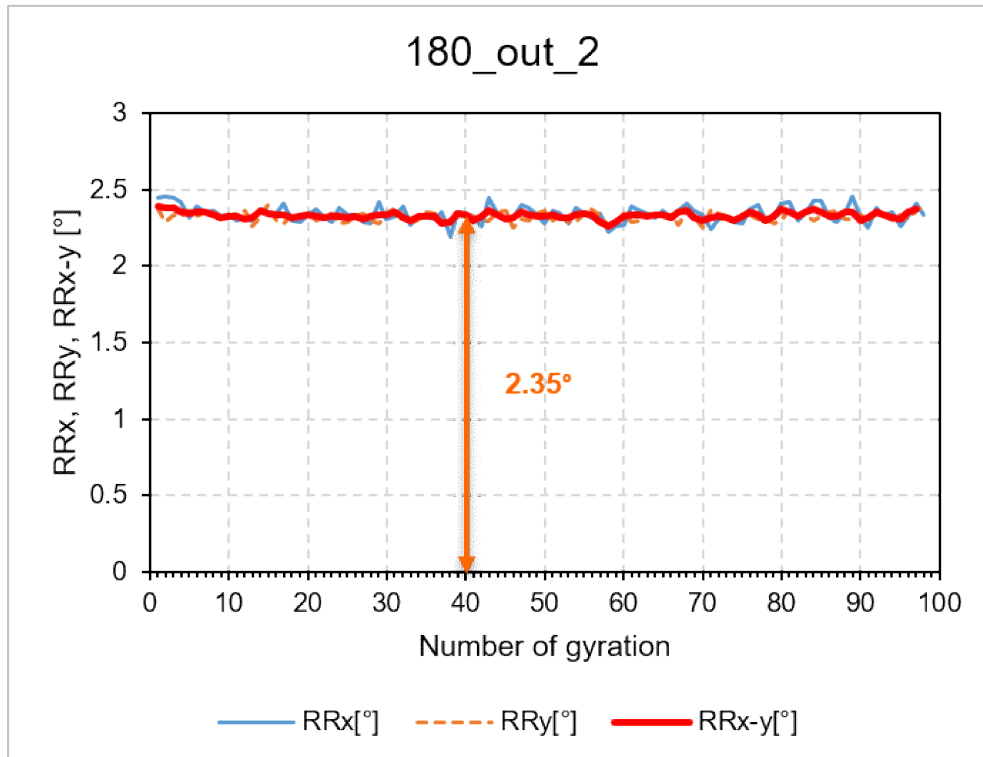


Figura 7.8 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 180_out_2

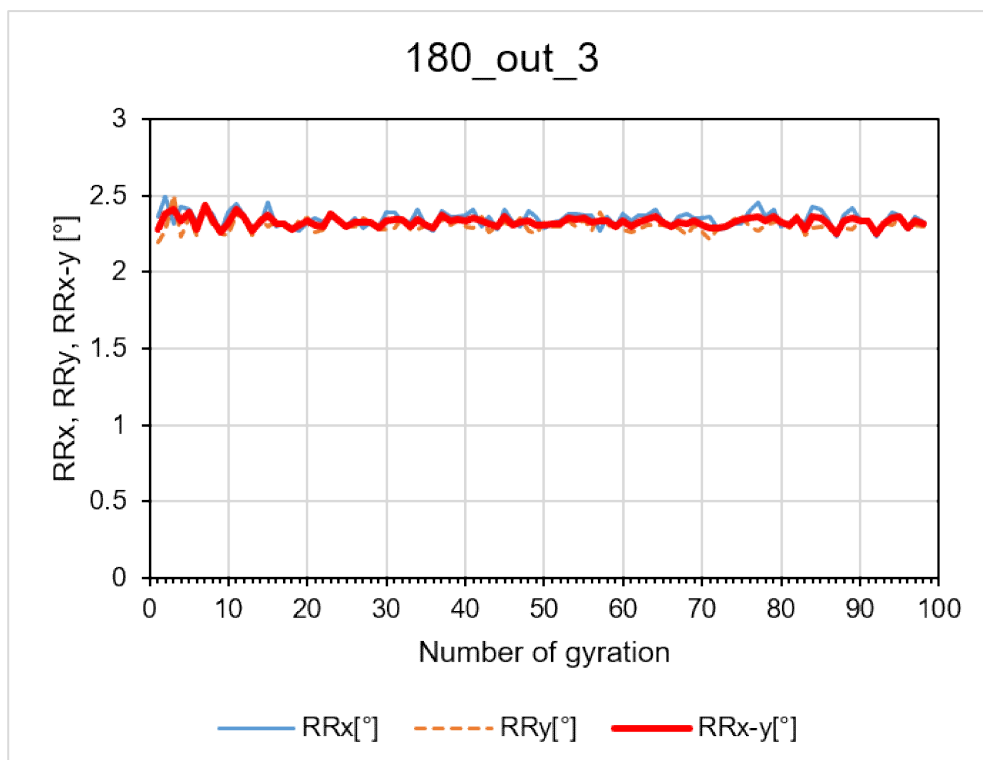


Figura 7.9 – Curve Relative Rotation (RR) del provino 180_out_3

7.1.4 Analisi dei risultati - RRx-y con sensore esterno

Come evidenziato dai grafici precedentemente riportati, il valore di RRx-y si mantiene pressoché costante per l'intera durata della prova, attestandosi intorno a un valore medio di circa 2,35°.

Tale comportamento si riscontra in tutte le prove condotte con sensore posto esternamente, indipendentemente dalle diverse altezze considerate per i provini. Ne consegue che il parametro RRx-y, di seguito indicato come RR_{mold}, non risulta influenzato dallo spessore del provino.

Alla luce di tali osservazioni, nelle successive elaborazioni, in particolare per il calcolo del parametro M-S RRC, il valore di RR_{mold} viene assunto costante.

7.2 Determinazione del Mold-Sensor Relative Rotation Capacity (M-S RRC)

Nel presente paragrafo si illustrano e si analizzano i grafici che hanno condotto alla determinazione del parametro M-S RRC per le diverse tipologie di provini. Tali grafici sono stati ricavati a partire dai dati acquisiti dal sensore, posizionato all'interno della fustella durante la fase di compattazione del materiale.

In una prima fase, i dati registrati sono stati opportunamente rielaborati al fine di essere espressi nel sistema di riferimento globale (WGS84), rendendoli così idonei a una corretta interpretazione. Successivamente, a partire da tali dati rielaborati, sono stati costruiti i grafici di interesse, dai quali è stato possibile determinare i corrispondenti valori del parametro M-S RRC.

7.2.1 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 115_mid

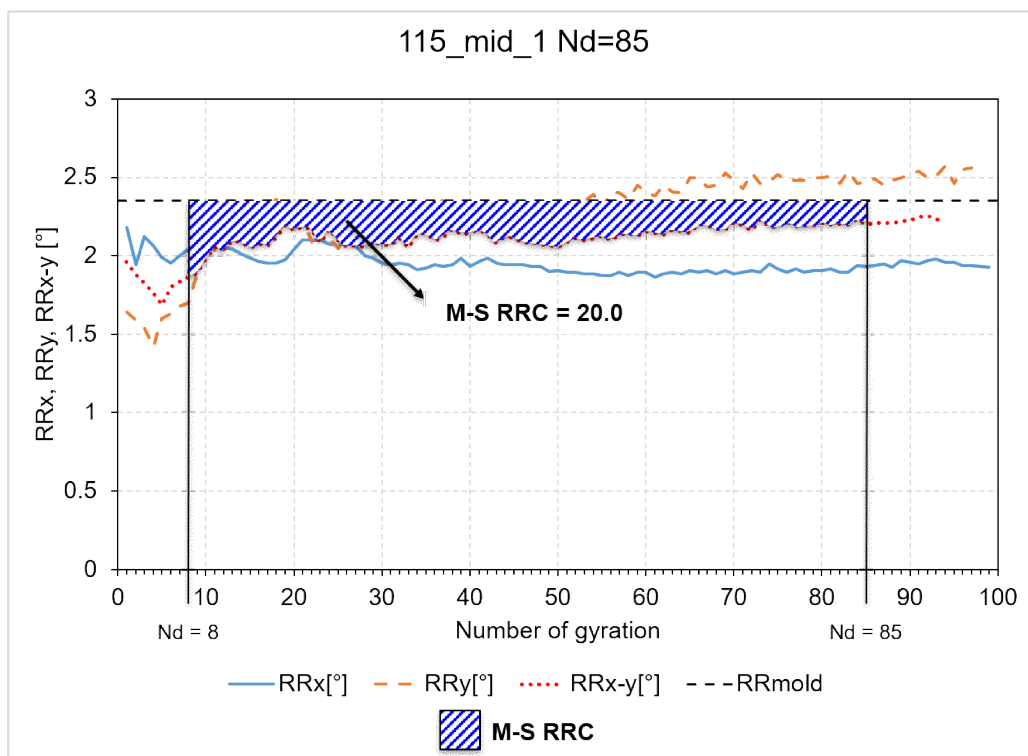


Figura 7.10 – Grafico delle curve delle RR del provino 115_mid_1 e calcolo M-S RRC

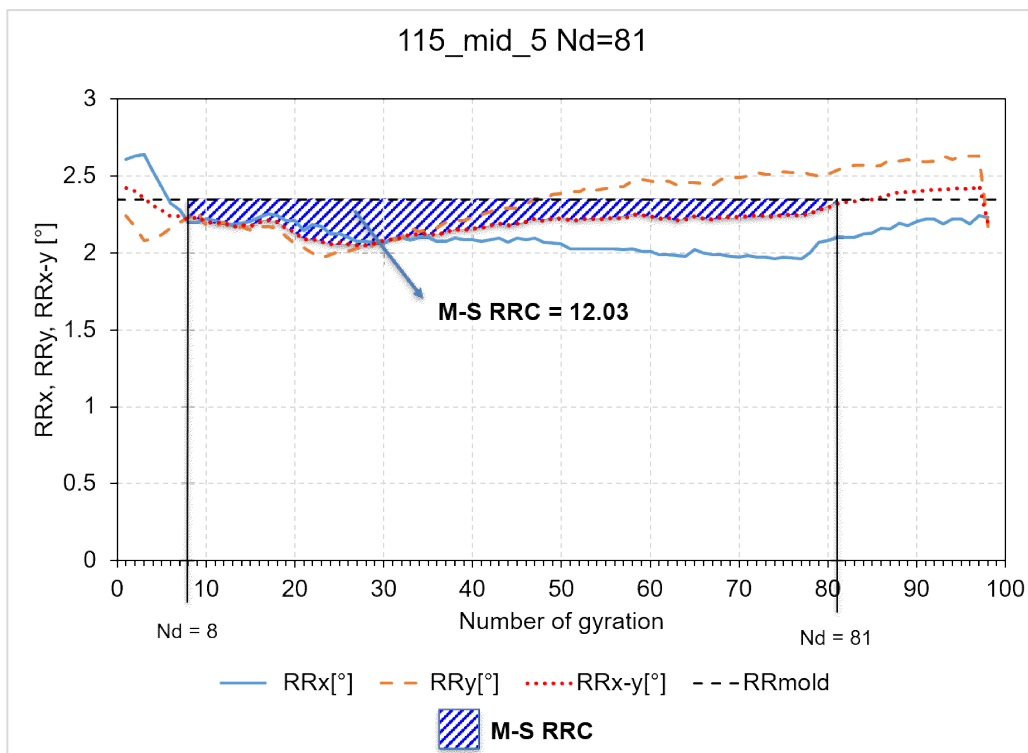


Figura 7.11 – Grafico delle curve delle RR del provino 115_mid_5 e calcolo M-S RRC

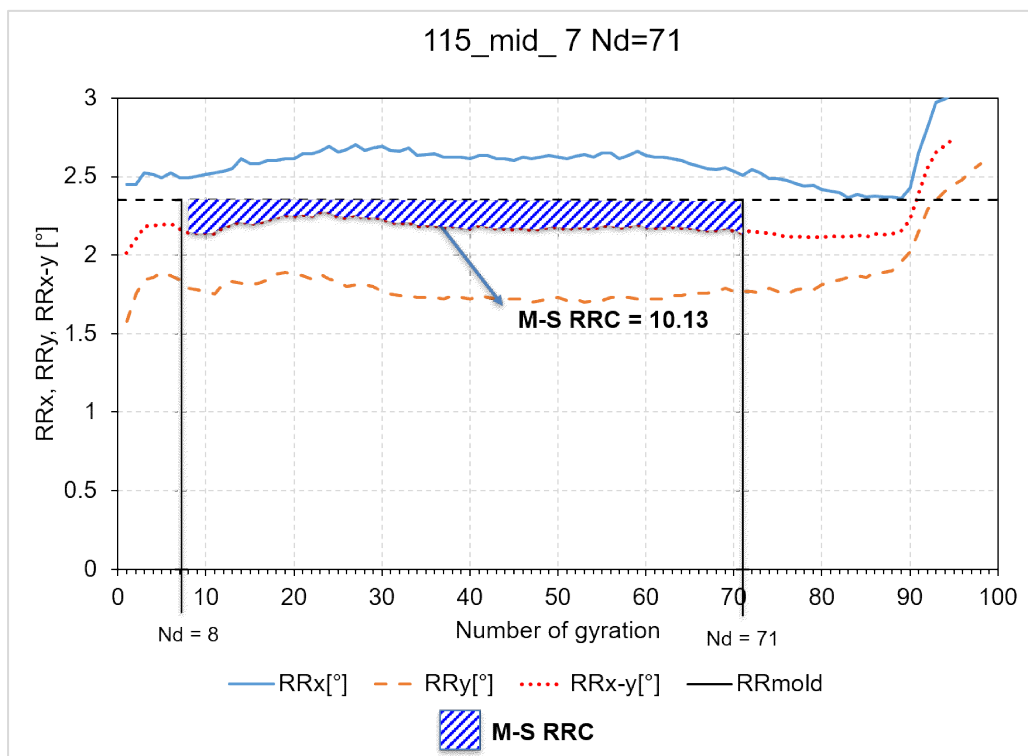


Figura 7.12 – Grafico delle curve delle RR del provino 115_mid_7 e calcolo M-S RRC

7.2.2 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 150_mid

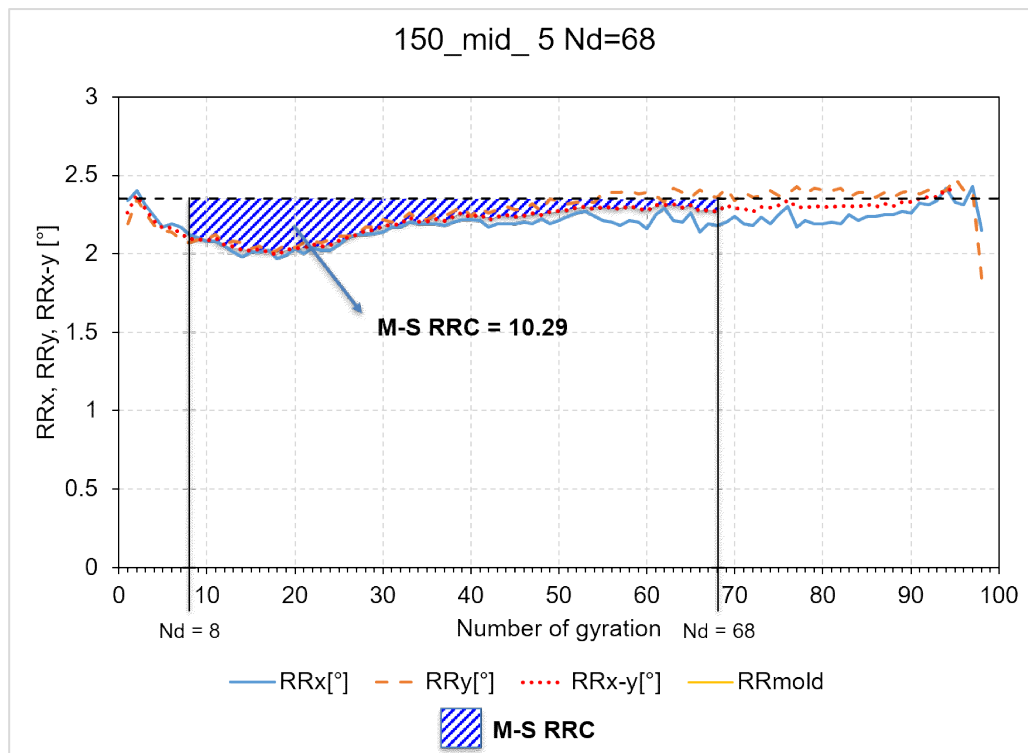


Figura 7.13 – Grafico delle curve delle RR del provino 150_mid_5 e calcolo M-S RRC

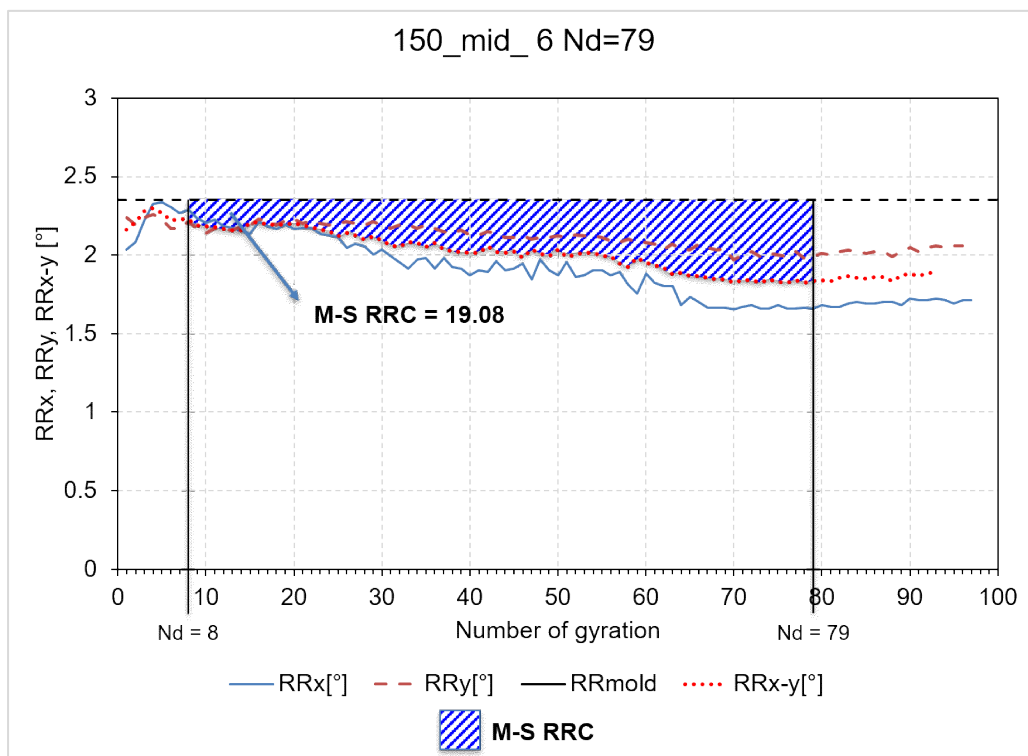


Figura 7.14 – Grafico delle curve delle RR del provino 150_mid_5 e calcolo M-S RRC

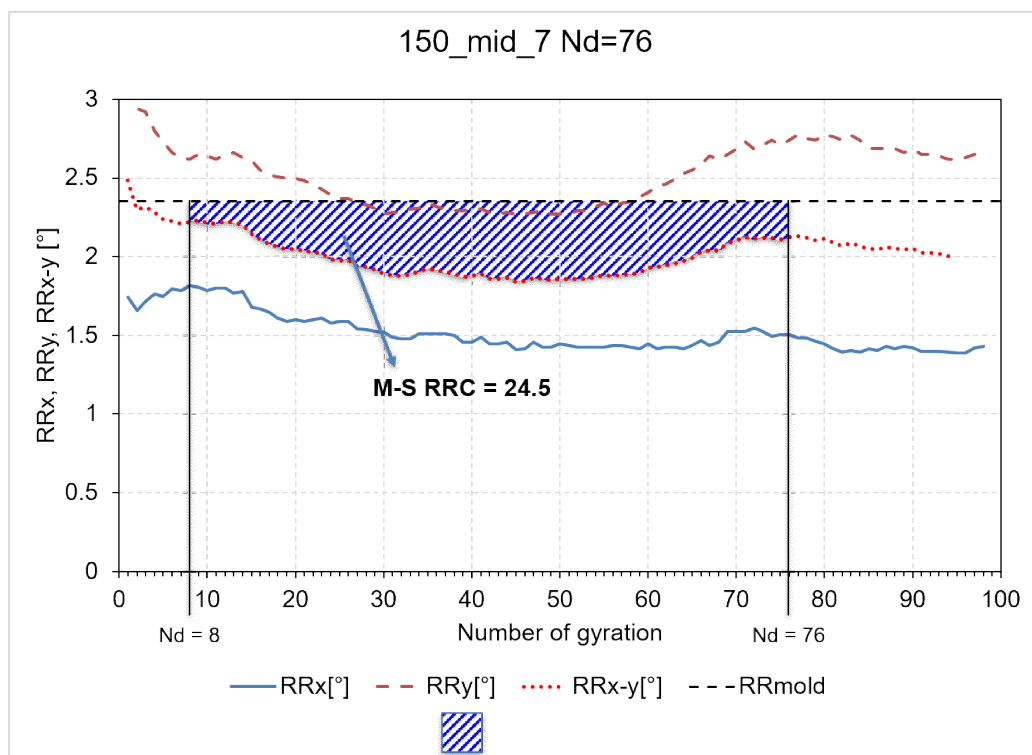


Figura 7.15 – Grafico delle curve delle RR del provino 150_mid_7 e calcolo M-S RRC

7.2.3 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 180_mid

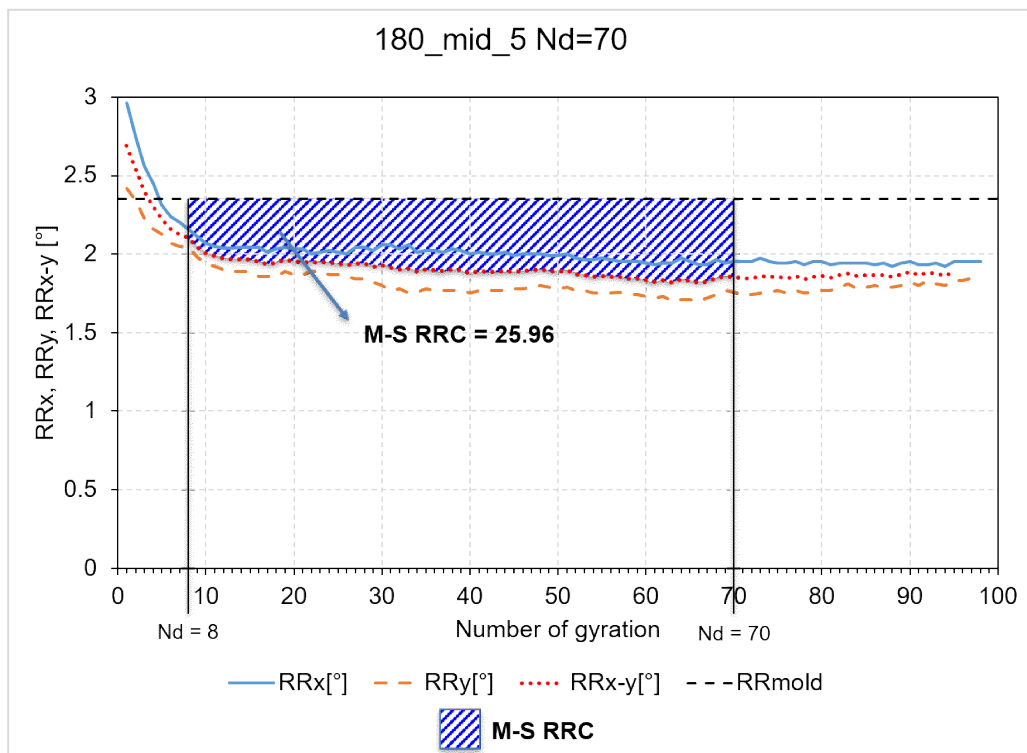


Figura 7.16 – Grafico delle curve delle RR del provino 180_mid_5 e calcolo M-S RRC

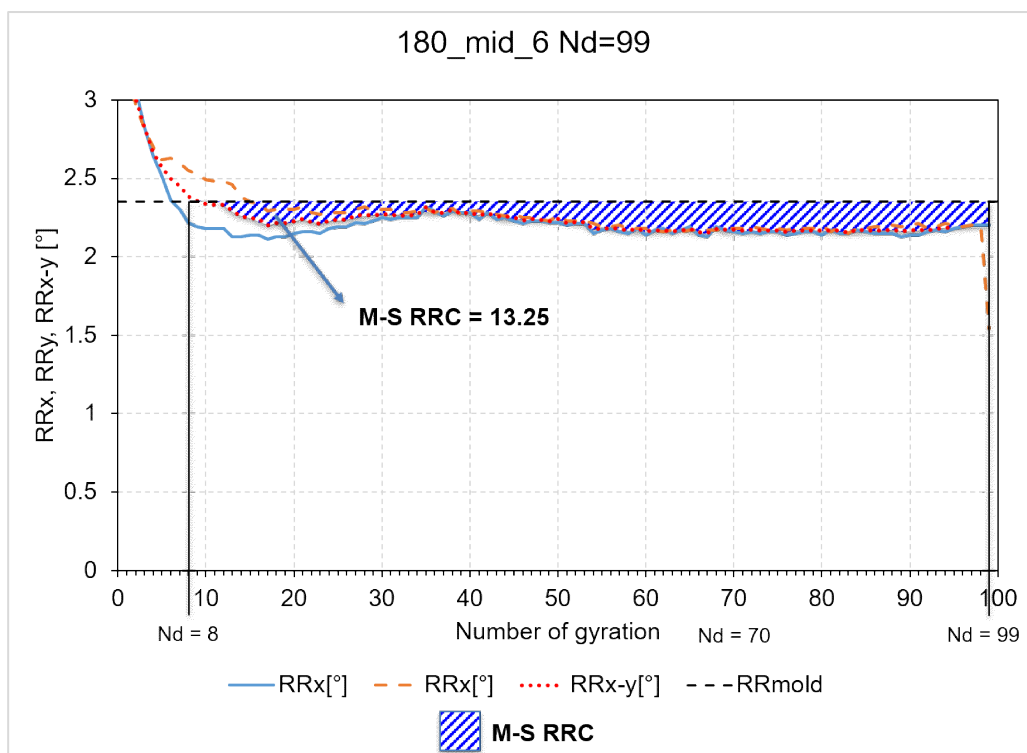


Figura 7.18 – Grafico delle curve delle RR del provino 180_mid_7 e calcolo M-S RRC

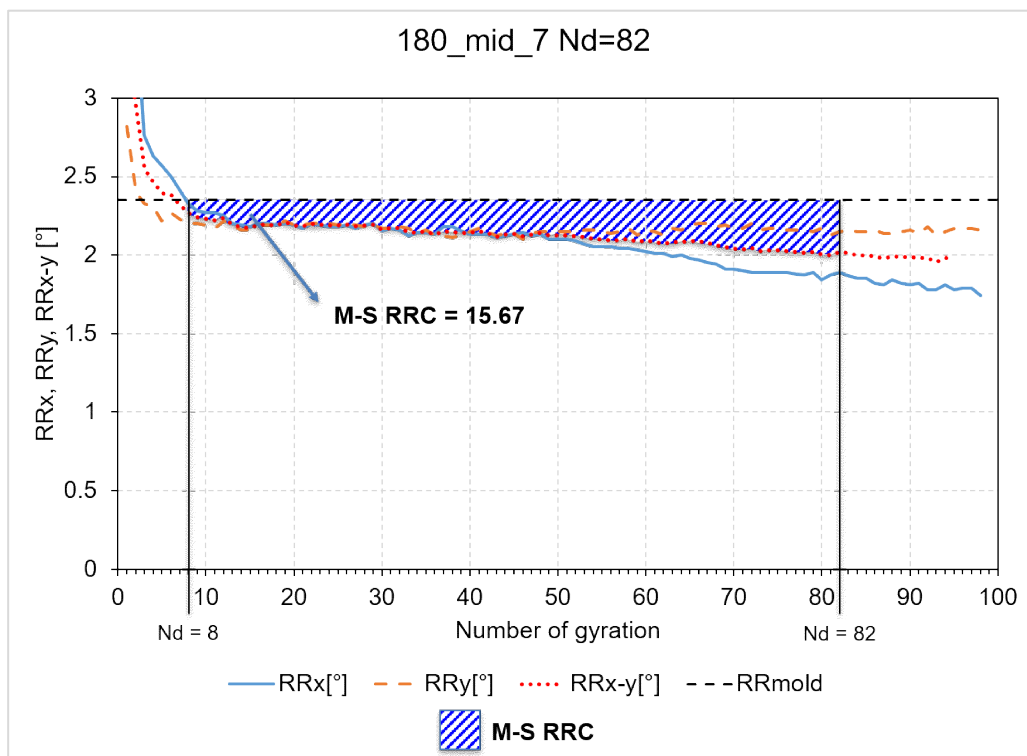


Figura 7.18 – Grafico delle curve delle RR del provino 180_mid_7 e calcolo M-S RRC

7.2.4 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 180_bottom

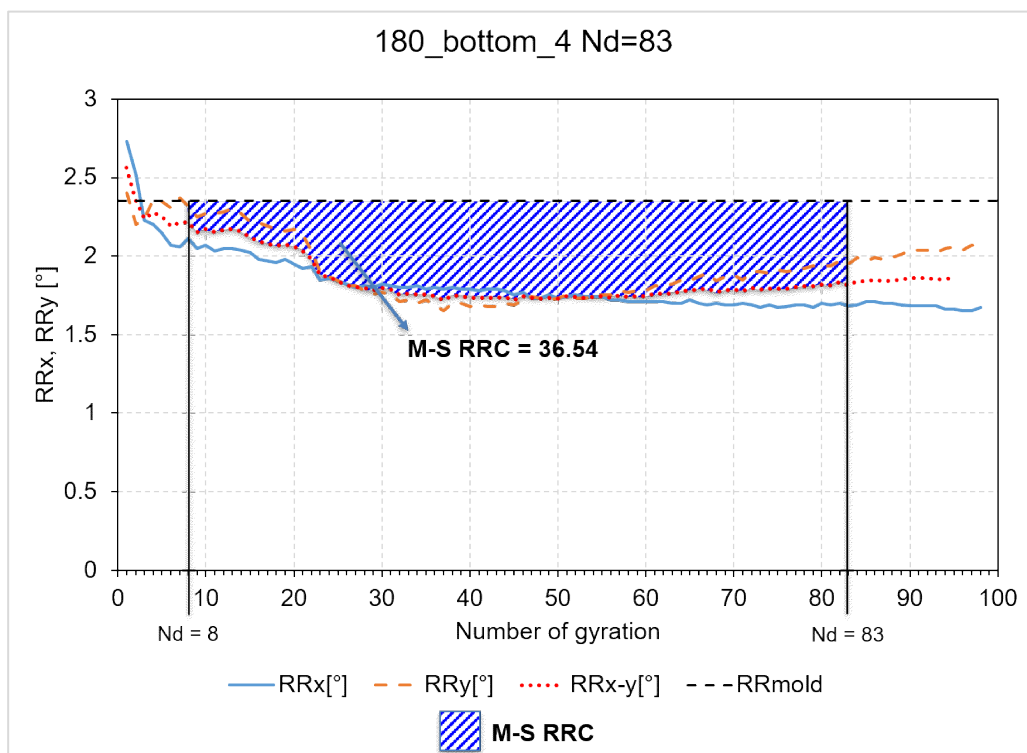


Figura 7.19 – Grafico delle curve delle RR del provino 180_bottom_4 e calcolo M-S RRC

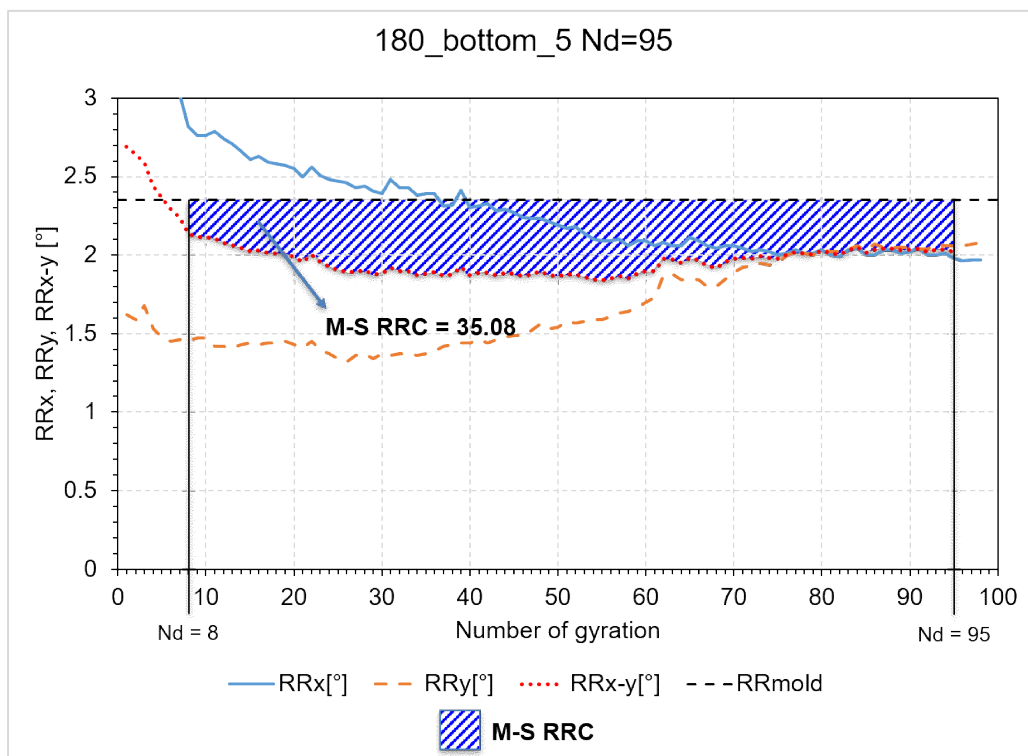


Figura 7.20 - Grafico delle curve delle RR del provino 180_bottom_5 e calcolo M-S RRC

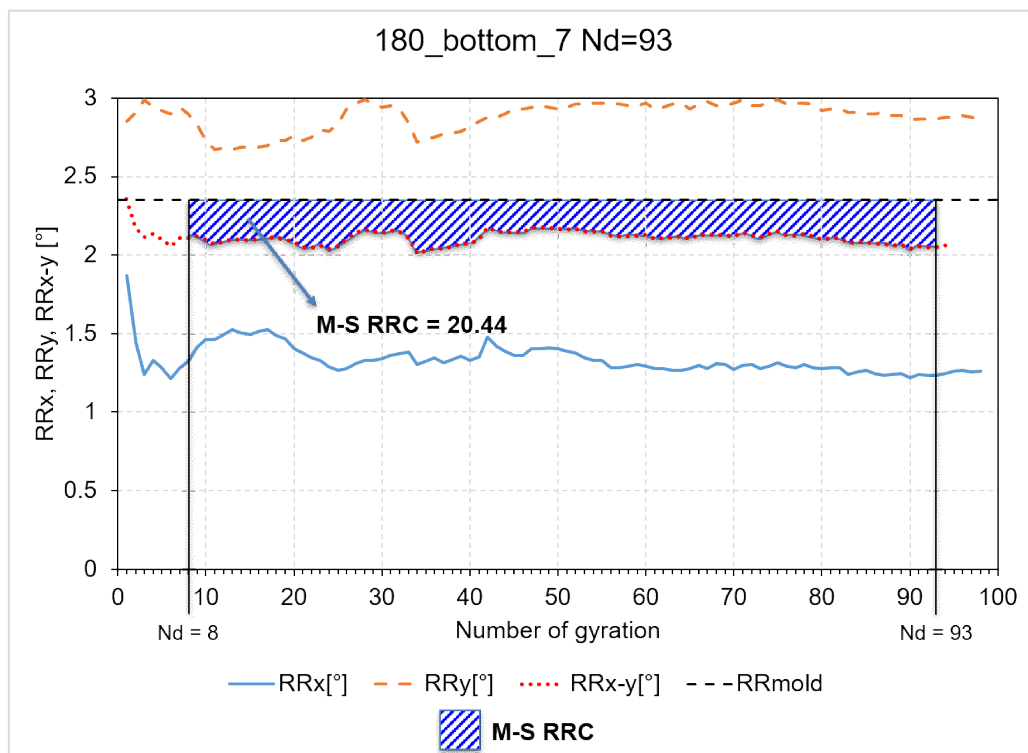


Figura 7.21 - Grafico delle curve delle RR del provino 180_bottom_7 e calcolo M-S RRC

7.2.5 Curve RR e calcolo M-S RRC - provini 180_top

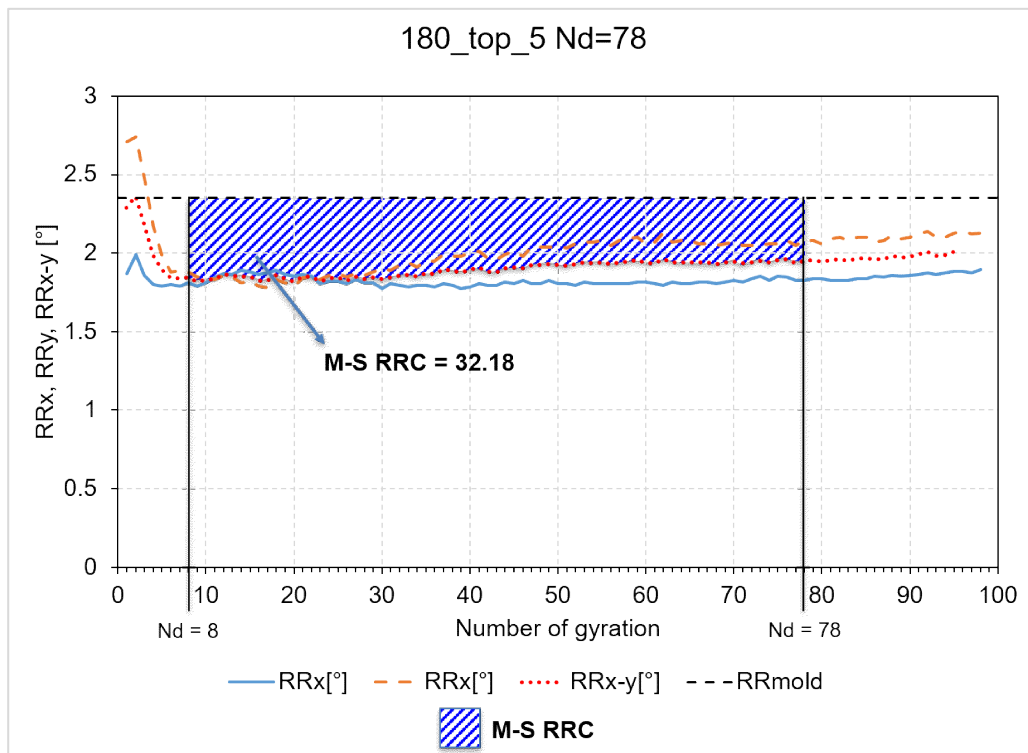


Figura 7.22 - Grafico delle curve delle RR del provino 180_top_5 e calcolo M-S RRC

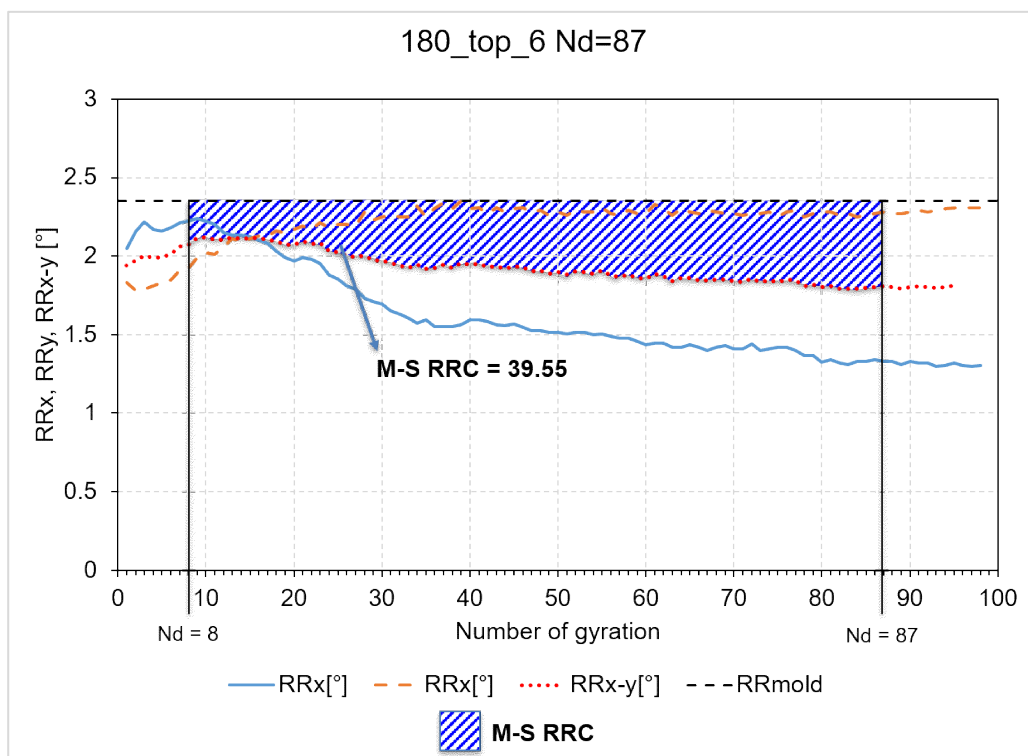


Figura 7.22 - Grafico delle curve delle RR del provino 180_top_6 e calcolo M-S RRC

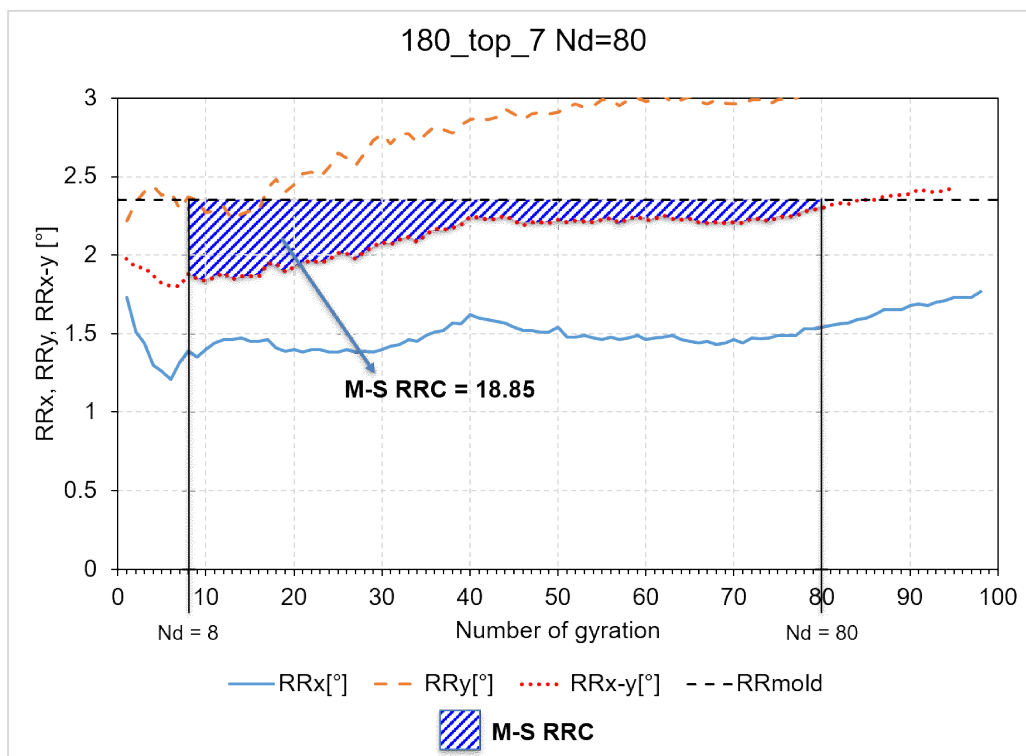


Figura 7.23 - Grafico delle curve delle RR del provino 180_top7 e calcolo M-S RRC

Dall'analisi delle curve delle Relative Rotations (RR) si osserva come, in tutti i casi considerati, l'andamento della componente RRx-y si mantenga al di sotto del limite rigido imposto dalla fustella, precedentemente assunto costante e pari a $2,35^\circ$. Questo comportamento evidenzia che il materiale, durante la fase di compattazione, non raggiunge condizioni di vincolo tali da compromettere la libertà di rotazione relativa degli aggregati all'interno del sistema.

Di seguito vengono riportati i grafici relativi ai valori di M-S RRC calcolati per l'insieme dei provini realizzati durante la campagna sperimentale. I risultati sono organizzati in funzione della tipologia di provino, distinguendoli in base all'altezza, al fine di consentire un confronto diretto tra le diverse configurazioni analizzate.

Tale suddivisione permette di evidenziare con maggiore chiarezza l'influenza dello spessore del provino sul parametro M-S RRC, facilitando l'interpretazione dei dati e l'individuazione di eventuali tendenze o differenze significative tra i casi di studio.

7.2.6 Riepilogo parametro M-S RRC

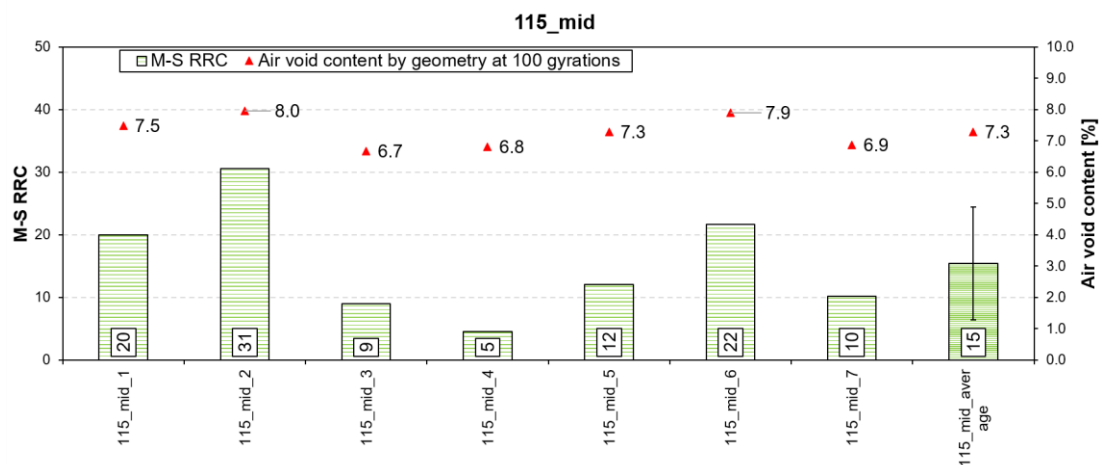


Figura 7.24 – Grafico riassuntivo dei valori M-S RRC inerente ai provini 115_mid

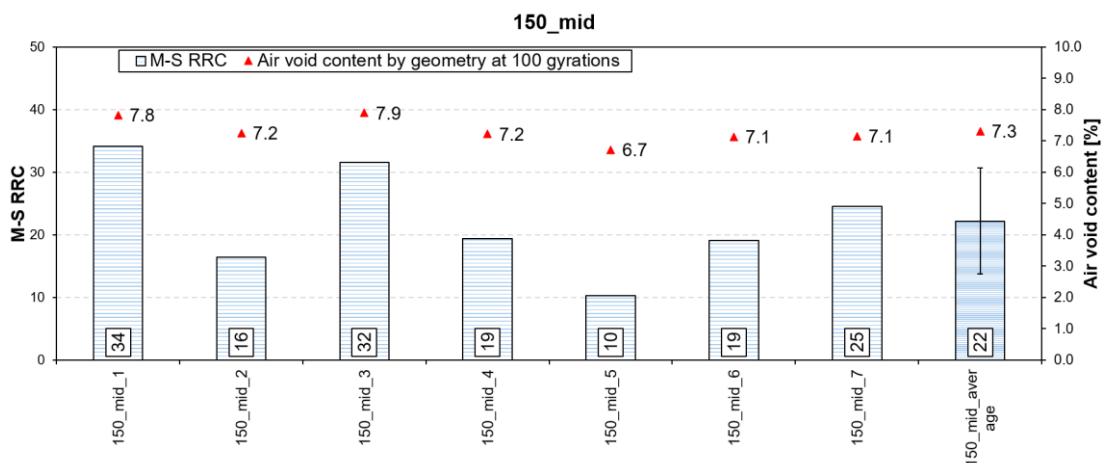


Figura 7.25 – Grafico riassuntivo dei valori M-S RRC inerente ai provini 150_mid

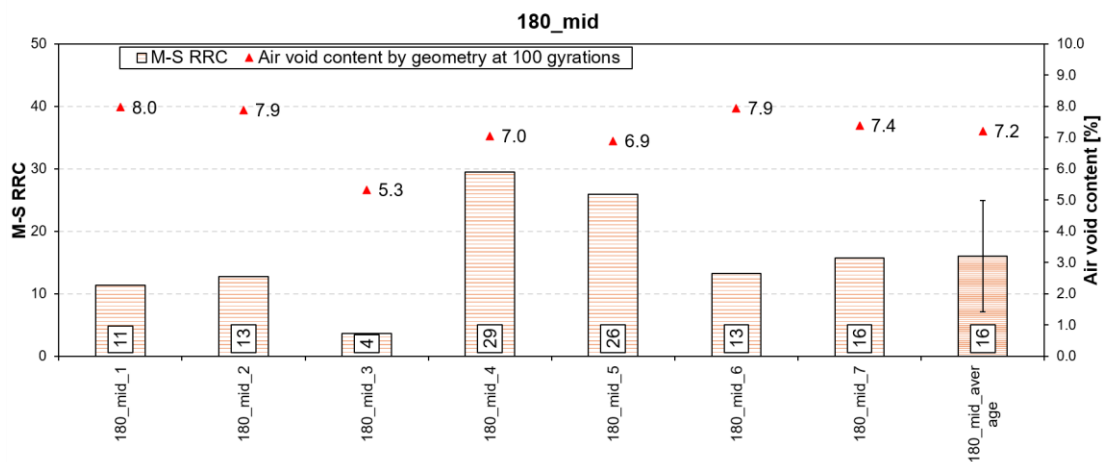


Figura 7.26 – Grafico riassuntivo dei valori M-S RRC inerente ai provini 180_mid

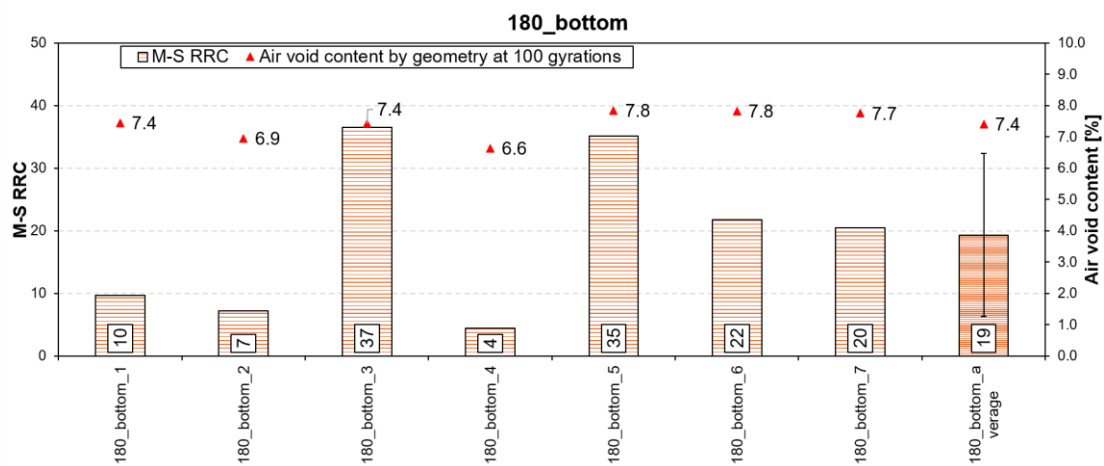


Figura 7.27 – Grafico riassuntivo dei valori M-S RRC inerente ai provini 180_bottom

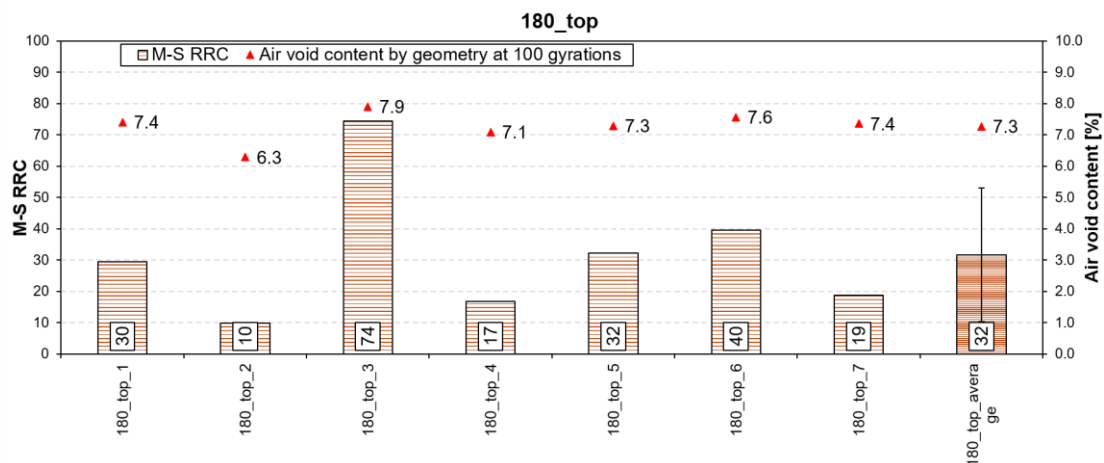


Figura 7.28 – Grafico riassuntivo dei valori M-S RRC inerente ai provini 180_top

7.2.7 Analisi dei risultati - valori M-S RRC

Analizzando i valori di M-S RRC riportati nei grafici precedentemente illustrati, si osserva come, nei provini di altezza pari a 180 mm, il sensore registri movimenti più intensi quando posizionato nella regione superiore del campione, ovvero in prossimità della piastra di carico della pressa. Tale comportamento si traduce in valori di M-S RRC più elevati rispetto a quelli riscontrati nelle altre posizioni.

Al contrario, nelle regioni centrale e inferiore del provino, il sensore evidenzia spostamenti più contenuti durante la fase di compattazione, con conseguente riduzione dei valori di M-S RRC rispetto al caso precedente.

Questo andamento suggerisce che gli aggregati collocati nella parte superiore del provino siano maggiormente influenzati dall'azione diretta del carico applicato, risultando più coinvolti nel processo di compattazione. Di conseguenza, tali elementi subiscono spostamenti più significativi al fine di raggiungere una configurazione caratterizzata da un elevato grado di addensamento, mentre le porzioni più profonde del campione risentono in misura minore degli effetti immediati del processo di compattazione.

7.3 Compaction Energy Index (CEI)

Nel presente paragrafo vengono illustrati e analizzati i valori del Compaction Energy Index (CEI) determinati per ciascun provino esaminato. La stima di tale parametro si basa sull'elaborazione dei dati acquisiti direttamente dalla pressa giratoria durante la fase di compattazione.

In particolare, il macchinario registra, a ogni ciclo di rotazione, la variazione di altezza del provino, conseguente all'azione della pressione verticale applicata. A partire da tali misurazioni è possibile costruire la curva di compattazione, che descrive l'evoluzione del processo di densificazione del materiale.

La costruzione di tale curva consente di determinare il valore del Compaction Energy Index (CEI), il quale, come detto precedentemente nel paragrafo 3.5.3, viene determinato come l'area sottesa da tale curva all'interno di un intervallo di riferimento prestabilito, che va da $N_{initial}$ a N_{design} . Come si vedrà nel seguito, questo parametro risulta particolarmente significativo per la valutazione della lavorabilità delle miscele bituminose e del loro comportamento durante il processo di compattazione.

7.3.1 CEI - provini con sensore esterno

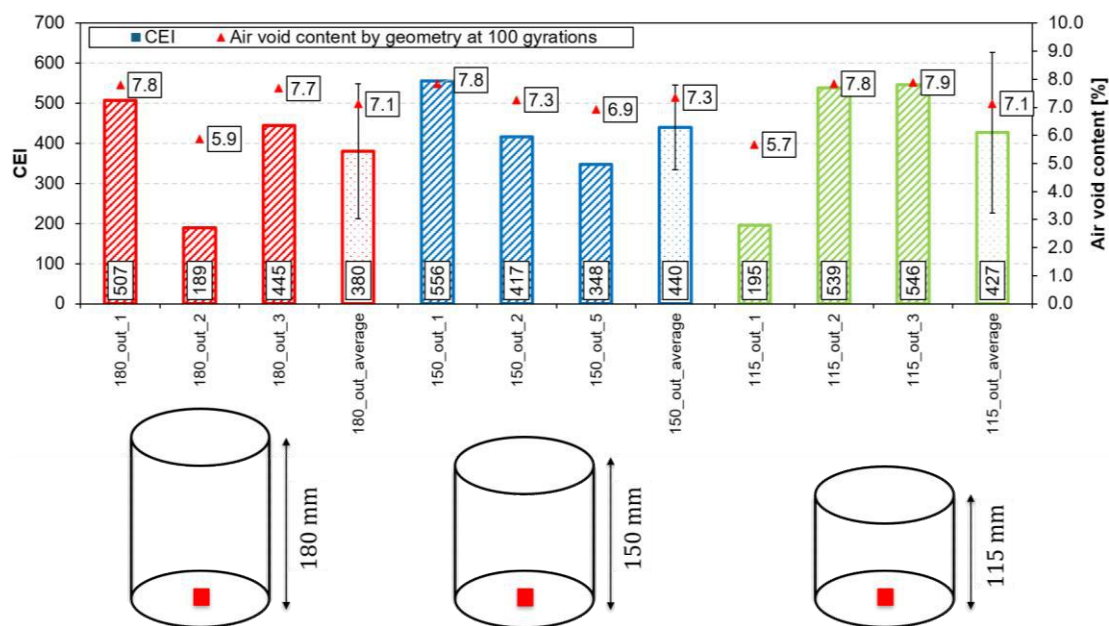


Figura 7.29 – Grafico valori CEI per i provini con sensore esterno e relazione con indice di vuoti

7.3.2 CEI - provini con sensore interno

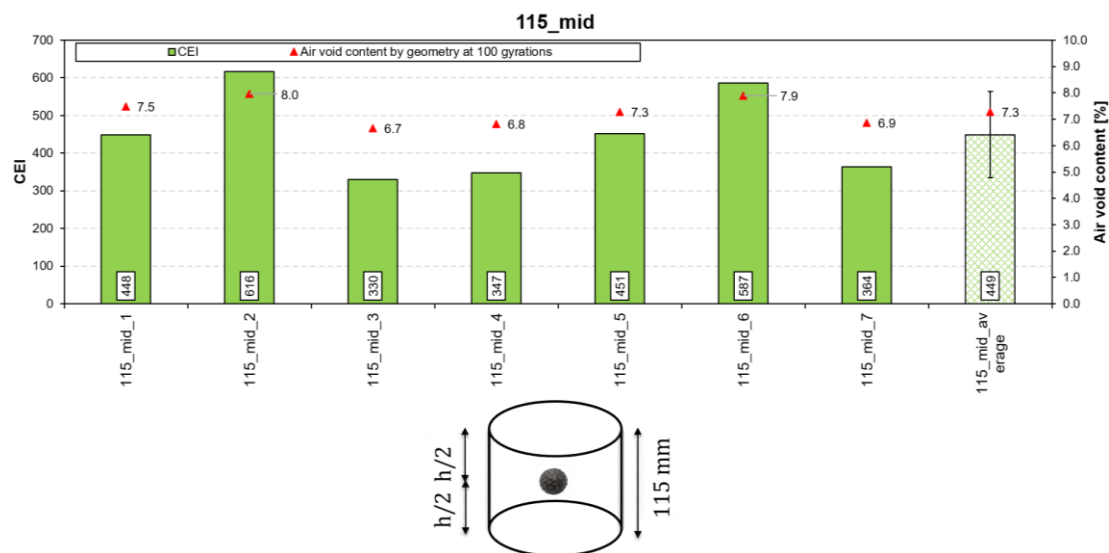


Figura 7.30 – Grafico valori CEI per i provini 115_mid in relazione con l'indice di vuoti

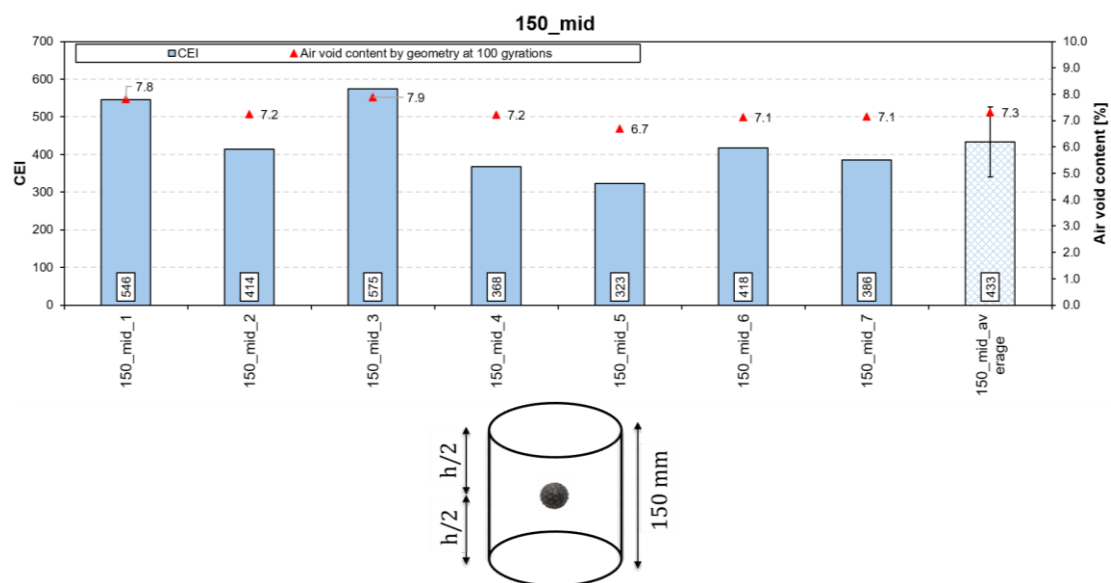


Figura 7.31 – Grafico valori CEI per i provini 150_mid in relazione con l'indice di vuoti

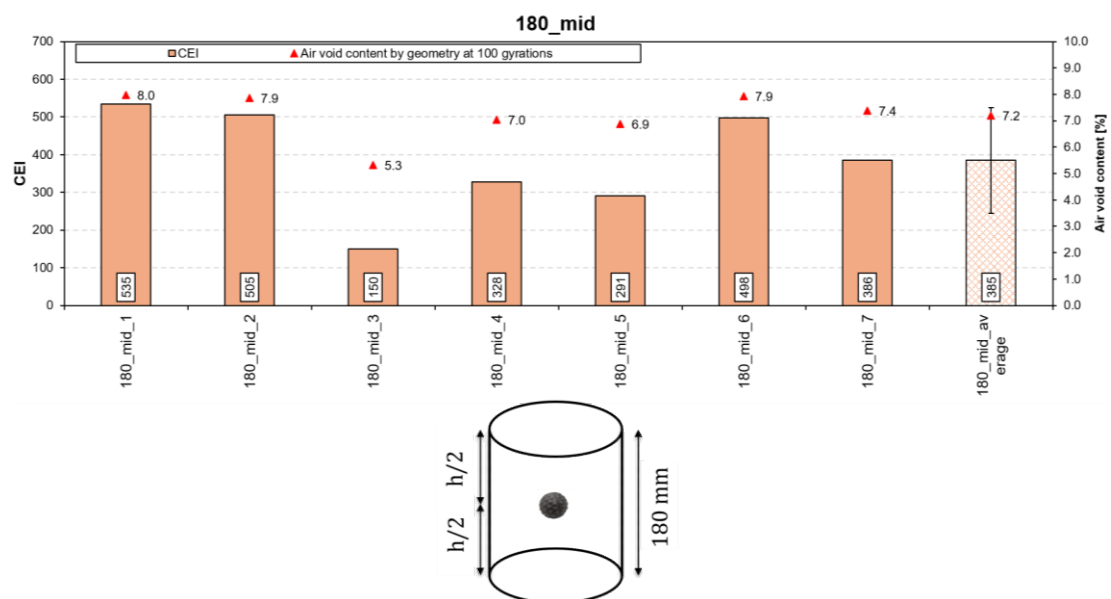


Figura 7.32 – Grafico valori CEI per i provini 180_mid in relazione con l'indice di vuoti

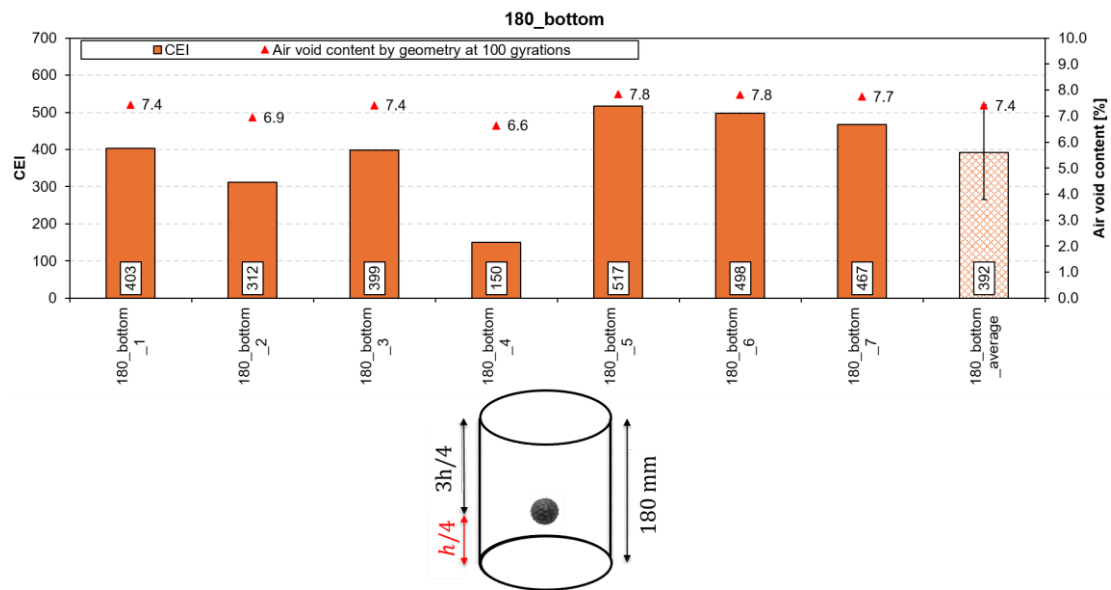


Figura 7.33 – Grafico valori CEI per i provini 180_bottom in relazione con l'indice di vuoti

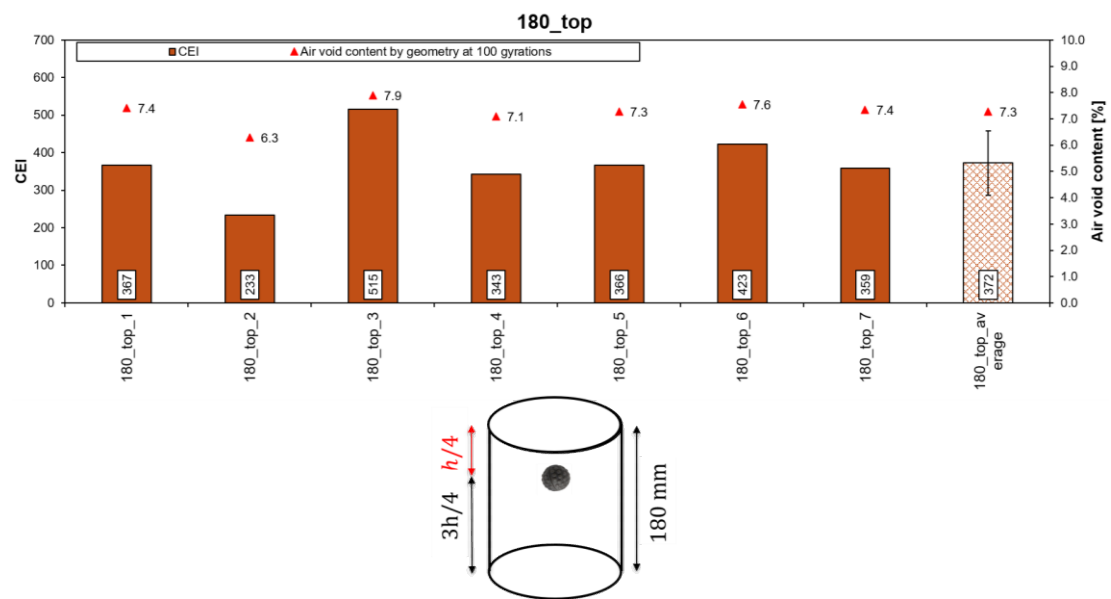


Figura 7.34 – Grafico valori CEI per i provini 180_top in relazione con l'indice di vuoti

7.3.3 Analisi dei risultati - CEI

Quello che si intende analizzare dai grafici precedentemente riportati è principalmente il confronto tra i valori del CEI relativi ai provini di altezza pari a 115 mm e 150 mm -rappresentativi degli spessori comunemente realizzati in sito - e quelli relativi ai provini di altezza pari a 180 mm, che invece rappresentano configurazioni con spessori maggiori.

Dall'analisi del primo grafico, relativo alle prove eseguite con sensore esterno, e considerando in particolare i valori medi ottenuti dalle tre prove per ciascuna tipologia di provino, si osserva come tali valori risultino tra loro coerenti. Ciò evidenzia come la lavorabilità della miscela non risulti significativamente influenzata dall'incremento dello spessore dello strato: anche nel caso di provini di maggiore altezza, infatti, il comportamento in fase di compattazione, dal punto di vista della lavorabilità, rimane sostanzialmente invariato, indicando che l'aumento di materiale da compattare non compromette il processo.

Analogamente, per quanto concerne le prove effettuate con sensore posizionato all'interno del provino, i valori di CEI si mantengono sostanzialmente in linea con quelli ottenuti in assenza del sensore, indipendentemente dall'altezza del provino considerata.

Il confronto diretto tra i valori medi di CEI ottenuti nelle prove con sensore esterno e quelli relativi alle prove con sensore interno (Figura 7.35) consente di affermare che la presenza del sensore non influisce in maniera significativa sul processo di compattazione. L'assenza di differenze rilevanti tra i due insiemi di dati indica, infatti, che il sensore si integra efficacemente all'interno della miscela, senza costituire un ostacolo alla densificazione del materiale.

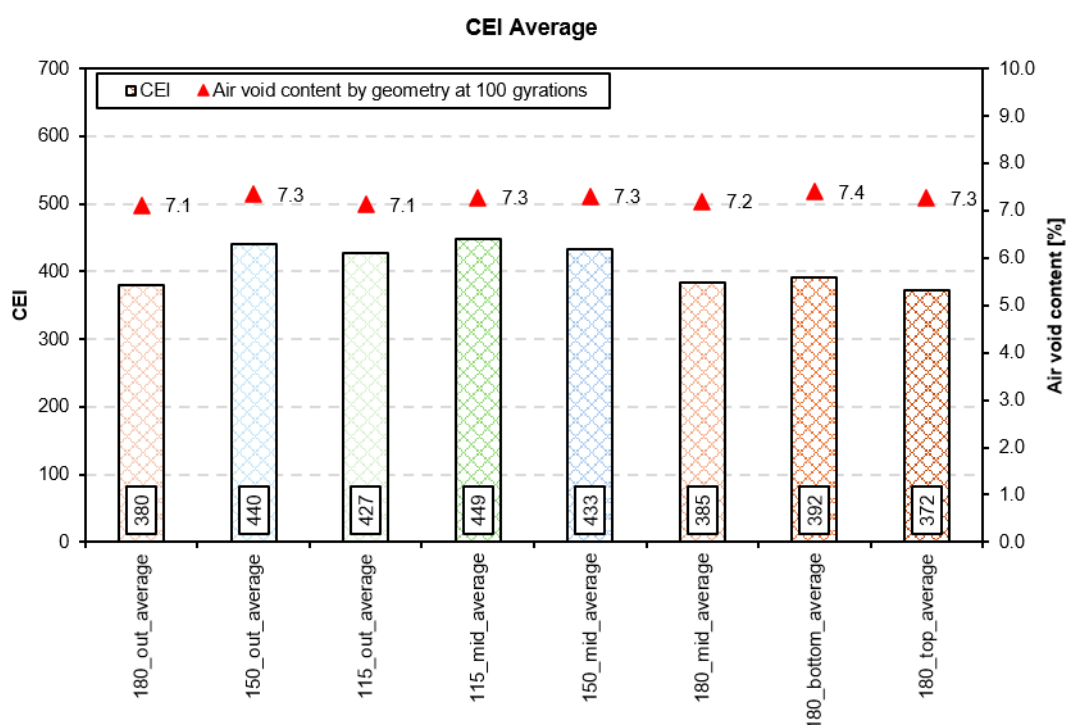


Figura 7.35 – Grafico in cui vengono messi in relazione i valori medi del CEI delle diverse tipologie di provino

7.4 Analisi volumetrica

Come già evidenziato, l'analisi del contenuto di vuoti al termine della compattazione è stata condotta esclusivamente sui provini privi di sensore interno. Tale scelta metodologica è legata alla necessità, nel caso dei provini strumentati, di procedere alla rottura del campione per il recupero del dispositivo, rendendo di fatto impossibile lo svolgimento di ulteriori analisi sullo stesso.

L'indagine è stata effettuata considerando tre differenti porzioni di ciascun provino, corrispondenti alle zone inferiore, centrale e superiore. Questa suddivisione ha consentito di analizzare in maniera dettagliata la distribuzione dei vuoti lungo l'asse verticale del campione, fornendo una rappresentazione più completa e articolata del comportamento del materiale.

In particolare, l'analisi così strutturata ha permesso di evidenziare eventuali variazioni del contenuto di vuoti in funzione della profondità, mettendo in luce possibili

disomogeneità nel grado di compattazione tra le diverse regioni del provino. Tali informazioni risultano di fondamentale importanza, in quanto consentono di valutare l'efficacia del processo di compattazione non solo in termini globali, ma anche a livello locale.

Inoltre, i risultati ottenuti forniscono indicazioni utili per comprendere come gli effetti della compattazione si distribuiscano all'interno dello strato di conglomerato bituminoso, permettendo di individuare eventuali criticità legate alla realizzazione di strati di maggiore spessore rispetto a quelli convenzionali. In questo modo, l'analisi dei vuoti si configura come uno strumento essenziale per la verifica dell'omogeneità e della qualità del materiale compattato.

7.4.1 Risultati dell'analisi volumetrica

L'analisi dell'indice dei vuoti è stata condotta su tre provini per ciascuna tipologia di altezza considerata, al fine di garantire un'adeguata rappresentatività e affidabilità dei risultati ottenuti.

I grafici riportati di seguito presentano i valori dell'indice dei vuoti relativi alle tre porzioni in cui ciascun provino è stato suddiviso, ovvero la parte superiore (*top*), centrale (*mid*) e inferiore (*bottom*). All'interno di ogni singolo grafico sono quindi riportati, per ciascuna altezza, i risultati ottenuti sui tre provini analizzati, consentendo un confronto diretto sia tra le diverse zone del provino sia tra i campioni appartenenti alla stessa configurazione sperimentale.

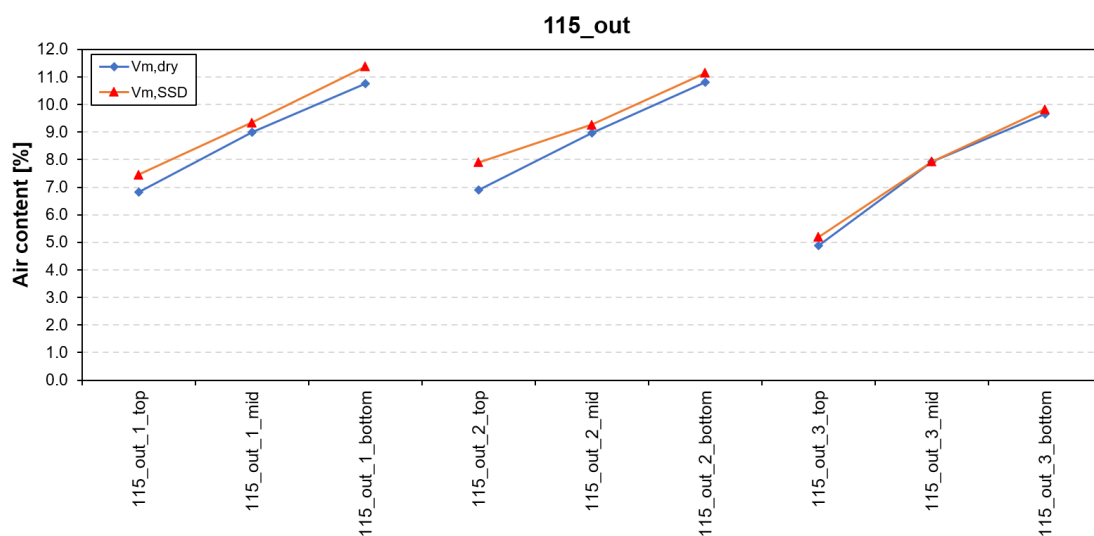


Figura 7.36 – Grafico dell'indice dei vuoti dei provini 115_out_1, 115_out_2 e 115_out_3

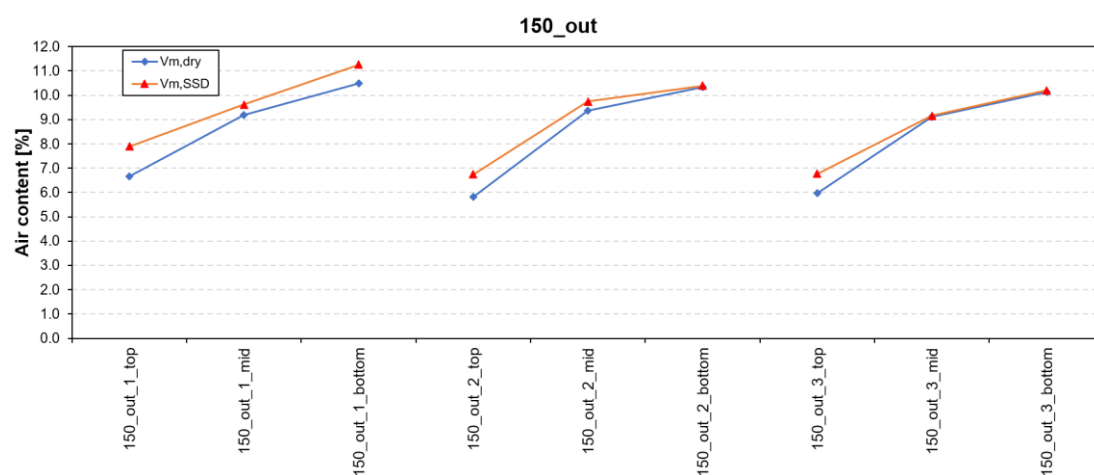


Figura 7.37 – Grafico dell'indice dei vuoti dei provini 150_out_1, 150_out_2 e 150_out_3

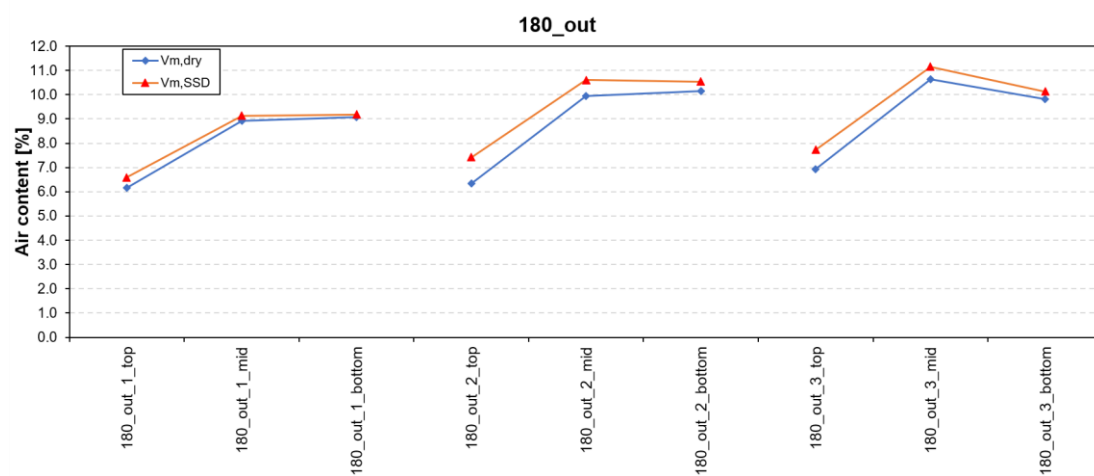


Figura 7.38 – Grafico dell'indice dei vuoti dei provini 180_out_1, 180_out_2 e 180_out_3

Analizzando il confronto tra i provini di differenti altezze pari a 180 mm e quelli di altezza 150 mm e 115 mm, si osserva come il contenuto di vuoti d'aria, nei campioni da 180 mm, presenti un andamento complessivamente coerente con quello rilevato nelle altre due tipologie di provino, evidenziando una distribuzione lungo l'asse verticale qualitativamente analoga.

Nel dettaglio:

- nella porzione superiore del provino si riscontra una riduzione dell'indice dei vuoti, indicativa di un più elevato grado di compattazione, attribuibile all'azione diretta del carico applicato dalla piastra superiore della pressa giratoria;
- nella regione inferiore, in prossimità della base, si osserva invece un incremento del contenuto di vuoti, riconducibile a una minore efficacia nella trasmissione degli sforzi di compattazione lungo lo spessore del materiale.

Un'analisi più approfondita evidenzia tuttavia alcune differenze locali. In particolare, nella zona inferiore, i provini di altezza pari a 180 mm mostrano valori dell'indice dei vuoti complessivamente inferiori rispetto a quelli riscontrati nei provini di altezza minore, suggerendo un grado di compattazione relativamente più elevato in tale regione, pur rimanendo inferiore rispetto a quello osservato nella porzione superiore del medesimo provino.

Al contrario, nella regione centrale, i provini di maggiore altezza presentano valori dell'indice dei vuoti leggermente superiori rispetto ai campioni di altezza pari a 115 mm e 150 mm. Ciò evidenzia una minore efficacia del processo di compattazione in questa zona intermedia, verosimilmente imputabile a fenomeni di dissipazione dell'energia di compattazione e alla conseguente attenuazione degli effetti del carico applicato.

Nel complesso, i risultati ottenuti indicano che l'incremento dello spessore del provino non comporta modifiche sostanziali nella distribuzione dei vuoti lungo la direzione verticale, ma determina variazioni localizzate nel grado di compattazione, con particolare criticità nella regione centrale, che si configura come la più sensibile agli effetti di attenuazione dello stato tensionale indotto durante il processo.

7.5 CEI vs. M-S RRC

Nel presente paragrafo viene analizzata la relazione esistente tra il Compaction Energy Index (CEI) e il parametro M-S RRC. A tal fine, si riporta di seguito il grafico in cui i due parametri sono messi in relazione: sull'asse delle ordinate sono rappresentati i valori di M-S RRC, mentre sull'asse delle ascisse sono riportati i corrispondenti valori di CEI.

I punti presenti all'interno del grafico rappresentano le coppie di valori relative a ciascuna singola prova sperimentale. Tali dati sono stati successivamente sottoposti a interpolazione, la quale è stata rappresentata mediante una retta, al fine di evidenziare l'andamento della correlazione tra le due grandezze considerate.

Nella legenda associata al grafico sono inoltre distinti i dati relativi alle diverse tipologie di provino, consentendo di individuare eventuali differenze di comportamento in funzione delle configurazioni sperimentali adottate.

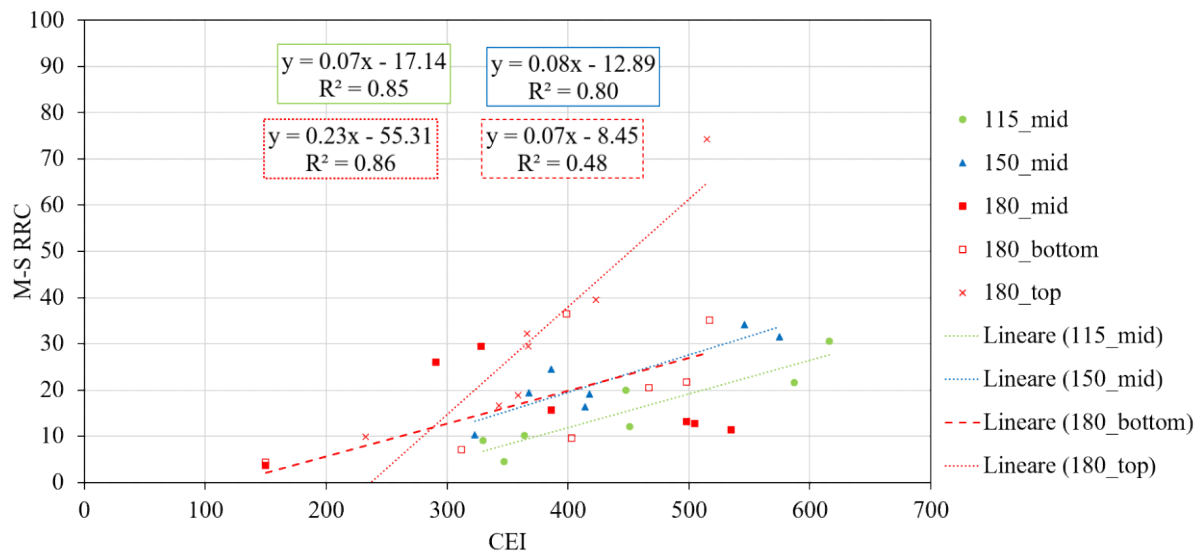


Figura 7.39 – Grafico relazione CEI - M-S RRC

Analizzando il grafico sopra citato si evidenzia l'esistenza di una chiara correlazione di tipo direttamente proporzionale tra i due parametri: all'aumentare del CEI, infatti, si registra un incremento dei valori di M-S RRC.

Tale relazione può essere interpretata alla luce del significato fisico delle due grandezze. In particolare, valori più elevati di M-S RRC indicano una maggiore mobilità relativa degli aggregati — e quindi del sensore — all'interno del provino durante la fase di compattazione, mentre il materiale evolve verso una configurazione caratterizzata da un grado di addensamento più elevato.

La maggiore mobilitazione degli elementi granulari implica tuttavia un aumento dell'energia richiesta per consentire il riarrangiamento degli aggregati e il raggiungimento della condizione di massima densificazione. Questo maggiore fabbisogno energetico si traduce direttamente in un incremento del Compaction Energy Index (CEI), il quale assume quindi valori più elevati rispetto ai casi in cui i movimenti degli aggregati risultano più limitati.

In conclusione, la relazione osservata tra CEI e M-S RRC evidenzia come i due parametri siano strettamente correlati e descrivano in maniera coerente il comportamento del materiale durante il processo di compattazione, fornendo indicazioni complementari sia in termini di mobilità interna degli aggregati sia di energia richiesta dal sistema per raggiungere la configurazione di massima densità.

8. Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente elaborato di tesi si inserisce in un contesto di ricerca più ampio, relativo allo studio degli aggregati intelligenti (*SmartRock*), sviluppato e portato avanti presso il Dipartimento di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche.

All'interno di tale ambito, l'attività di ricerca non si limita all'individuazione di soluzioni innovative per il monitoraggio e il controllo del processo di compattazione, ma si estende anche allo sviluppo di nuove metodologie di impiego e all'introduzione di parametri avanzati, finalizzati a una più approfondita interpretazione e valorizzazione dei dati acquisiti da tali dispositivi.

In questa prospettiva si colloca, ad esempio, la definizione del parametro M-S RRC (*Mold-Sensor Relative Rotation Capacity*), il quale rappresenta un indicatore innovativo per l'analisi del comportamento rotazionale degli aggregati durante il processo di compattazione.

L'obiettivo della sperimentazione è stato condurre un'analisi statistica della lavorabilità delle miscele bituminose mediante l'impiego di aggregati intelligenti. Le prove sono state eseguite su provini con differenti altezze, al fine di analizzare e confrontare i risultati ottenuti. Al termine della campagna sperimentale, si è rilevato che:

- Dall'analisi dei dati registrati durante le prove, emerge che tutte le prove hanno mostrato una curva RR_x-y al di sotto del limite rigido della fustella
- Analizzando il confronto tra provini di diverse altezze in termini di CEI:
 - i provini da 180 mm presentano un valore di CEI molto simile a quello calcolato per i provini da 150 mm e 115 mm;
 - analizzando i casi in cui il sensore è incorporato all'interno del provino, si osserva che il CEI rimane coerente con quello determinato in assenza del sensore per tutte le altezze dei provini.

- In termini di contenuto di vuoti d'aria, i provini da 180 mm mostrano un andamento sostanzialmente simile a quello dei campioni da 115 mm e 150 mm;
- Dal confronto dei valori di M-S RRC emerge che per i provini da 180 mm, il sensore ha registrato movimenti maggiori quando posizionato nella parte superiore;

Confrontando il rapporto tra CEI e M-S RRC, si può osservare che a un aumento del CEI corrisponde un incremento proporzionale della M-S RRC. Questa relazione proporzionale tra CEI e MS-RRC può essere spiegata dal fatto che valori più elevati di M-S RRC indicano un maggiore movimento degli aggregati (e quindi del sensore) all'interno del provino durante la compattazione, mentre questi raggiungono la configurazione che consente la massima densità.

Tale mobilitazione richiede il dispendio di una maggiore quantità di energia; questa condizione si riflette in un aumento del valore di CEI che, rispetto ai casi in cui il movimento degli aggregati è più limitato, risulta quindi più elevato.

Dall'analisi dei dati ottenuti al termine della campagna sperimentale emerge come la realizzazione di strati di spessore maggiore rispetto a quelli tradizionalmente adottati risulti, in linea generale, tecnicamente fattibile. I valori dei parametri utilizzati per la valutazione della lavorabilità e del grado di compattazione mostrano infatti un buon livello di coerenza con quelli determinati per i provini caratterizzati da altezze inferiori. Limitatamente ai risultati ottenuti in ambito di laboratorio, il confronto tra i parametri derivanti dalle prove su provini a maggior spessore e quelli relativi ai provini di altezza standard non evidenzia differenze significative tali da costituire un limite all'adozione di tali soluzioni.

Tuttavia, è opportuno evidenziare che, sebbene la pressa giratoria utilizzata in laboratorio sia concepita per simulare le azioni esercitate da un rullo compattatore, tale corrispondenza non risulta pienamente rappresentativa della realtà operativa. Per tale

motivo, lo studio di queste soluzioni deve essere necessariamente integrato con dati provenienti da campagne sperimentali *in situ*.

In definitiva, i risultati conseguiti supportano la possibilità di approfondire ulteriormente lo studio e lo sviluppo di queste soluzioni innovative al fine di ammodernare le tecniche costruttive nel settore delle pavimentazioni flessibili.

9. Bibliografia

- [1] Renato Cannarozzo, Lanfranco Cucchiaroni, William Meshieri, (2018), “Misure, rilievo, progetto. Per costruzioni, ambiente e territorio. Vol. 3”, 196-199
- [2] Felice A. Santagata, (2016) “STRADE – Teoria e Tecnica delle Costruzioni Stradali – Vol– Progettazione”
- [3] Jiqing Zhu , Björn Birgisson, Niki Kringos (2014), “Polymer modification of bitumen: Advances and challenges”, *European Polymer Journal*
- [4] Wangjie Wu, Maria Chiara Cavalli, Wei Jiang, Nicole Kringos (2024), “Differing perspectives on the use of high-content SBS polymer-modified bitumen”, *Elsevier, Construction and Building Materials*
- [5] Nellensteyn F.J., “The constitution of asphalt”, *Journal of the Institute of Petroleum Technologists*, Vol. 10, pp. 311–323, 1924.
- [6] A. Rosinger. Beitrage zur kolloidchemie des asphalts. *Kolloid-Zeitschrift*, 15: 177–179, 1914
- [7] Hanani Mohamed Radzi, Ratnasamy Muniandy, Salihudin Hassim, T. H. Law, Fauzan Mohd Jakarni (2019), “An overview of asphalt mix designs using various compactors”, *Purpose-led Publishing*
- [8] Y. Cheng, H. Bi, Y. Gong, Y. Jiao, X. Yang, “Comparative research on Superpave Gyratory Compaction method and Marshall Compaction method in the mix design of AC16,” *Test Materials and Electrical Engineering (TMEE)*, Changchun, China, 2019.
- [9] S. Liu, H. Huang, T. Qiu, L. Gao, Comparison of laboratory testing using SmartRock and discrete element modeling of ballast particle movement, *Journal of Materials in Civil Engineering* 29 (3) (2017) D6016001
- [10] S. Liu, H. Huang, T. Qiu, J. Kwon, Effect of geogrid on railroad ballast particle movement, *Transportation Geotechnics* 9 (2016) 110–122.
- [11] X. Wang, S. Shen, H. Huang, L. C. Almeida, “Characterization of particle movement in Superpave gyratory compactor at meso-scale using SmartRock sensors,” *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 206–214, 2018.
- [12] ASTM D8541, 2024. Standard Test Method for Determination of Relative Rotation to Evaluate the Workability of Asphalt Mixture Using Wireless Particle-Size Sen

- [13] Omar Guazzaroni, Lorenzo Paolo Ingrassia, Amedeo Virgili, Andrea Graziani, Francesco Canestrari, (2025) “Particle-size sensors of different geometry to assess the workability of asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, Elsevier
- [14] H.-C. Dan, D. Yang, L.-H. Zhao, S.-P. Wang, Z. Zhang, Meso-scale study on compaction characteristics of asphalt mixtures in Superpave gyratory compaction using SmartRock sensors, *Construction and Building Materials* 262 (2020) 120874.
- [15] S. Yu, S. Shen, R. Steger, X. Wang, Effect of warm mix asphalt additive on the workability of asphalt mixture: From particle perspective, *Construction and Building Materials* 360 (2022) 129548.
- [16] R. Ma, Z. Wang, Study on the compaction performance and its key influencing factors of asphalt mixture based on intelligent sensing techniques, *Journal of Sensors* 2023 (2023) 2224322.
- [17] X. Wang, H. Huang, E. Tutumluer, J.S. Tingle, S. Shen, Monitoring particle movement under compaction using smartrock sensor: A case study of granular base layer compaction, *Transportation Geotechnics* 34 (2022) 100764.
- [18] Y. Xiao, M. Wang, X. Wang, J. Ren, W. Wang, X. Chen, Evaluating gyratory compaction characteristics of unbound permeable aggregate base materials from meso-scale particle movement measured by smart sensing technology, *Materials* 14 (15) (2021) 4287.
- [19] N. Wang, F. Chen, T. Ma, Y. Luan, J. Zhu, Compaction performance of cold recycled asphalt mixture using SmartRock sensor, *Automation in Construction* 140 (2022) 104377.
- [20] X. Wang, S. Shen, H. Huang, Z. Zhang, 2019. Towards smart compaction: Particle movement characteristics from laboratory to the field, *Construction and Building Materials* 218 (2019) 323–332.
- [21] X. Wang, S. Shen, H. Huang, 2021. Meso-scale kinematic responses of asphalt mixture in both field and laboratory compaction, *Transportation Research Record* 2675 (9) (2021) 1631–1642.
- [22] H.C. Dan, D. Yang, X. Liu, A.P. Peng, Z. Zhang, 2020. Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading, *Construction and Building Materials* 247 (2020) 118592.
- [23] H.C. Dan, Z. Zhang, H. Shan, W. Cao, 2023. Preliminary characterization on the dynamic mechanism of asphalt mixture under on-site vibratory compaction, *Construction and Building Materials* 400 (2023) 132695.

- [24] Z. Zhang, H. Dan, S. Li, W. Li, 2023. Optimizing asphalt surface course compaction: Insights from aggregate triaxial acceleration responses, *Materials* 16 (22) (2023) 7239.
- [25] Choubane, B., Page, G. C., and Musselman, J. A. Investigation of Water Permeability of Coarse Graded Superpave Pavements. Publication FL/DOT/SMO/97-416. Florida Department of Transportation, State Materials Office, Gainesville, FL, 1997.
- [26] Russell, J. Effect of Pavement Thickness on Superpave Mix Permeability and Density. Wisconsin Department of Transportation, Madison, WI, 2005.
- [27] Cooley, L. A. Jr., and Williams, K. L. Evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Lift Thickness. Burns Cooley Dennis, Inc, Jackson, MI, 2009.
- [28] Bluetooth AHRS IMU sensor WT901BLE, datasheet, WitMotion Shenzhen Co., Ltd
- [29] ASTM D8541, 2024. Standard Test Method for Determination of Relative Rotation to Evaluate the Workability of Asphalt Mixture Using Wireless Particle-Size Sensors.
- [30] UNI EN 12697-31 (2019), “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria”
- [31] Rassegna del bitume, SITEB “Associazione Italiana Bitume Asfalto strade), n. 72 (2012), 121-122
- [32] UNI EN 12697-8 (2019), “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi”
- [33] UNI EN 13108-1:(2016), “Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 1: Conglomerato bituminoso prodotto a caldo”