

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**ANALISI DI METODOLOGIE DI PROVA SPEDITIVE PER LA
VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLE DEFORMAZIONI
PERMANENTI DI CONGLOMERATI BITUMINOSI**

Relatore:

Chiar.mo PROF. EMILIANO PASQUINI

Matricola 2122723

Correlatori:

Chiar.mo PROF. ANDREA BALIELLO

Laureando: ANNA BASSAN

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

INDICE

INTRODUZIONE	5
STATO DELL'ARTE	8
1.1 PAVIMENTAZIONI STRADALI	8
1.2 CONGLOMERATI BITUMINOSI	10
1.3 BITUME MODIFICATO	13
1.4 PROVE SURROGATE	15
1.5 ARTICOLI E PUBBLICAZIONI.....	17
OBIETTIVI.....	27
INDAGINE SPERIMENTALE	29
3.1 MATERIALI	29
3.1.1 <i>Contenuto di legante</i>	30
3.1.2 <i>Densità massima della miscela</i>	31
3.1.3 <i>Densità degli aggregati</i>	33
3.2 CONFEZIONAMENTO PROVINI CILINDRICI E LASTRE	35
3.3 PROVA IDEAL-RT	45
3.4 PROVA HT-IDT	51
3.5 PROVA CCT	63
3.6 PROVA WT.....	68
3.7 PROVA ITSM	74
3.8 SELEZIONE DEI DATI	80
ANALISI DEI RISULTATI.....	88
4.1 RISULTATI.....	88
4.2 CORRELAZIONI.....	94
4.3 SENSITIVITÀ	99
4.3.1 <i>Sensitività: Tipologia di miscela</i>	99
4.3.2 <i>Sensitività: Contenuto di vuoti</i>	103
CONCLUSIONI.....	108
BIBLIOGRAFIA	112
NORME.....	114
INDICE DELLE TABELLE.....	115
INDICE DELLE FIGURE	117
INDICE DELLE FORMULE	120

INTRODUZIONE

Le infrastrutture stradali rappresentano un elemento fondamentale per lo sviluppo economico e sociale di un territorio, garantendo la mobilità di persone e merci.

Negli ultimi 20 anni le pavimentazioni sono state sempre di più sollecitate dal traffico veicolare, a causa dell'incremento dei carichi per asse e del numero di mezzi circolanti lungo la rete viaria. La crescente intensità dei flussi di traffico, associata all'aumento dei carichi trasmessi dai veicoli pesanti e alle sempre più severe condizioni climatiche, comporta la realizzazione di pavimentazioni caratterizzate da elevati livelli di prestazione e resistenza, in grado così di assicurare adeguati livelli di sicurezza, comfort e durabilità durante l'intera vita utile dell'opera. Parallelamente all'incremento dei volumi di traffico, anche la crescente attenzione verso la sostenibilità economica e ambientale delle opere pubbliche ha portato allo sviluppo di nuove strategie progettuali volte a massimizzare la durata delle pavimentazioni e, allo stesso tempo, ridurre i costi associati agli interventi di manutenzione. In tale contesto assume particolare importanza la capacità di prevedere e controllare il comportamento meccanico dei materiali utilizzati nella realizzazione degli strati che compongono la sovrastruttura stradale.

Tra le diverse tipologie di pavimentazione, quelle flessibili rappresentano la soluzione maggiormente adottata nella realizzazione delle reti viarie attuali. Esse sono costituite da una successione di strati con caratteristiche meccaniche differenti, progettati per distribuire progressivamente i carichi veicolari verso il sottofondo. Nell'ambito di questo tipo di pavimentazioni, il conglomerato bituminoso costituisce il materiale maggiormente impiegato per la realizzazione degli strati superficiali e strutturali. Le prestazioni di tali miscele dipendono da numerosi fattori, tra cui le proprietà degli aggregati, le caratteristiche del legante bituminoso, la composizione granulometrica e il contenuto di vuoti d'aria. La corretta progettazione delle miscele risulta pertanto essenziale per garantire un adeguato comportamento meccanico durante l'intera vita utile della pavimentazione.

I principali meccanismi di ammaloramento che interessano le pavimentazioni bituminose possono essere ricondotti a fenomeni di fessurazione da fatica, fessurazione termica, perdita di aderenza, distacco degli aggregati e deformazioni permanenti. Quest'ultime si manifestano attraverso accumuli irreversibili di deformazione dovuti alla ripetuta applicazione dei carichi di traffico e possono portare alla formazione di solchi

longitudinali nella carreggiata, fenomeno comunemente noto come rutting o solcamento. La formazione dei solchi rappresenta una delle principali problematiche che interessano le pavimentazioni flessibili, in quanto essa comporta conseguenze significative sia dal punto di vista funzionale sia da quello della sicurezza stradale. La presenza di avvallamenti nelle corsie di marcia può infatti favorire il ristagno dell'acqua piovana, aumentando il rischio di acquaplaning e riducendo l'aderenza tra pneumatico e superficie stradale. Inoltre, il solcamento determina un peggioramento del confort di guida e può richiedere interventi manutentivi anticipati con conseguente incremento dei costi di gestione dell'infrastruttura.

Il fenomeno del rutting è influenzato da numerosi fattori. Tra questi assumono particolare importanza le proprietà del legante bituminoso, la struttura granulometrica della miscela, il contenuto di vuoti d'aria, il livello di compattazione raggiunto in opera, la temperatura di esercizio e l'entità dei carichi applicati.

La valutazione della resistenza alle deformazioni permanenti costituisce quindi un aspetto fondamentale nella progettazione e nel controllo delle miscele bituminose. A tale scopo sono state sviluppate numerose metodologie sperimentali in grado di simulare con maggiore accuratezza le condizioni di esercizio a cui il materiale è sottoposto durante la vita utile della pavimentazione, consentendo una valutazione il più realistica possibile della resistenza ai principali meccanismi di degrado. Tuttavia, nonostante l'elevata affidabilità delle prove tradizionali, molte di esse presentano alcune limitazioni operative. In particolare, richiedono tempi di esecuzione relativamente lunghi, apparecchiature dedicate e procedure sperimentali spesso complesse. Tali aspetti rendono particolarmente interessante lo sviluppo di metodologie alternative caratterizzate da una maggiore rapidità esecutiva.

Negli ultimi anni è stato sviluppato il test IDEAL-RT (Rapid Shear Rutting Test), una metodologia innovativa finalizzata alla valutazione rapida della suscettibilità al solcamento dei conglomerati bituminosi. La prova si basa sull'applicazione di un carico monotono di compressione sulla superficie curva laterale di provini cilindrici e consente di determinare un indice prestazionale denominato Rutting Tolerance Index (RT_{Index}), correlato alla capacità della miscela di opporsi alle deformazioni permanenti. Grazie alla semplicità esecutiva e alla ridotta durata della prova, l'IDEAL-RT si propone come possibile alternativa alle metodologie convenzionali attualmente in uso.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro di tesi, il cui obiettivo è analizzare la capacità della prova IDEAL-RT di rappresentare il comportamento delle miscele

bituminose nei confronti delle deformazioni permanenti e di individuare eventuali correlazioni con i risultati ottenuti mediante prove standard di riferimento. In particolare, mediante una ricerca congiunta fra l'Università di Padova, l'Università di Perugia e l'Università di Belgrado, vengono confrontati i parametri derivanti dall'IDEAL-RT con quelli ottenuti attraverso le prove HT-IDT (High Temperature Indirect Tensile Test), CCT (Cyclic Compression Test), WTT (Wheel Tracking Test) e ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus), applicate a 16 differenti tipologie di conglomerati bituminosi, sia tradizionali (9 miscele) sia modificati (7 miscele). L'analisi dei risultati sperimentali consente di valutare l'affidabilità dell'IDEAL-RT come metodologia speditiva per la caratterizzazione delle miscele bituminose e di approfondire il potenziale impiego di tale prova nell'ambito della progettazione e del controllo qualitativo delle pavimentazioni stradali.

La tesi si articola in una prima parte dedicata al quadro teorico relativo alle miscele bituminose e alle principali metodologie di prova utilizzate per la loro valutazione. Successivamente vengono presentati e discussi i risultati ottenuti dalle diverse prove eseguite, con particolare attenzione all'analisi delle correlazioni tra i parametri RT_{Index} e gli indicatori derivanti dalle metodologie di riferimento. Infine, vengono formulate le conclusioni del lavoro e le possibili prospettive di approfondimento future.

CAPITOLO 1

STATO DELL'ARTE

1.1 PAVIMENTAZIONI STRADALI

Le pavimentazioni stradali costituiscono la parte superiore del corpo stradale direttamente soggetta all'azione dei carichi veicolari e agli effetti degli agenti atmosferici. La loro funzione principale è quella di garantire una distribuzione efficace dei carichi verso gli strati sottostanti, limitando le tensioni trasmesse al sottofondo e assicurando adeguati livelli di sicurezza, comfort e durabilità durante l'intera vita utile dell'infrastruttura. A tal fine, le pavimentazioni devono soddisfare sia requisiti strutturali, legati alla capacità portante e alla resistenza ai fenomeni di degrado, sia requisiti funzionali, quali regolarità superficiale, aderenza pneumatico-pavimentazione, riduzione della rumorosità e capacità di drenaggio delle acque meteoriche.

Le pavimentazioni stradali possono essere classificate principalmente in rigide e flessibili. Le prime sono caratterizzate dalla presenza di lastre in calcestruzzo cementizio, la cui elevata rigidità consente di distribuire i carichi su ampie superfici. Le pavimentazioni flessibili, invece, sono costituite da una successione di strati granulari e bituminosi che collaborano alla distribuzione progressiva dei carichi verso il sottofondo. Questa tipologia rappresenta la soluzione maggiormente adottata nelle reti stradali moderne grazie alla relativa semplicità costruttiva, alla facilità di manutenzione e alla buona adattabilità alle deformazioni del terreno di fondazione.

Nelle pavimentazioni flessibili, gli strati in conglomerato bituminoso costituiscono il cosiddetto pacchetto bituminoso, nel quale il contenuto di legante aumenta progressivamente dagli strati inferiori verso quelli superficiali. Tale configurazione consente di ottimizzare sia le prestazioni meccaniche sia quelle funzionali della sovrastruttura. Lo strato di base, posto immediatamente sopra gli strati di fondazione, svolge un ruolo fondamentale nella resistenza strutturale della pavimentazione. Esso è generalmente costituito da conglomerati caratterizzati da una granulometria grossolana, elevata capacità portante e ridotto contenuto di bitume, in modo da garantire un efficace trasferimento dei carichi e una buona resistenza alle deformazioni permanenti.

Al di sopra dello strato di base è collocato lo strato di collegamento, comunemente denominato binder, che ha la funzione di raccordare le caratteristiche meccaniche della base con quelle dello strato superficiale. Esso contribuisce sia alla capacità strutturale

dell'insieme sia alla distribuzione degli sforzi indotti dal traffico, presentando caratteristiche granulometriche e contenuti di bitume intermedi rispetto agli strati adiacenti.

Lo strato di usura costituisce la parte superficiale della pavimentazione e rappresenta l'interfaccia diretta tra infrastruttura e traffico veicolare. Oltre a garantire adeguati livelli di aderenza e regolarità, esso deve assicurare una buona resistenza all'azione combinata dei carichi e degli agenti ambientali, quali escursioni termiche, radiazione solare, acqua e fenomeni di gelo-disgelo. Per tali ragioni, è generalmente caratterizzato da una granulometria più fine e da un maggiore contenuto di legante bituminoso rispetto agli strati sottostanti. Essendo lo strato maggiormente esposto alle sollecitazioni esterne, è anche quello che richiede interventi manutentivi più frequenti nel corso della vita utile della pavimentazione.

Le prestazioni delle pavimentazioni flessibili sono strettamente influenzate dal comportamento viscoelastico del conglomerato bituminoso, materiale le cui proprietà dipendono sia dalla temperatura sia dalla velocità di applicazione del carico. Nel tempo, l'azione ripetuta del traffico e l'esposizione alle condizioni ambientali determinano l'insorgenza di diversi fenomeni di degrado. Tra questi fenomeni uno dei più rilevanti è la fessurazione da fatica: essa si manifesta a seguito di un progressivo accumulo del danno dovuto ai carichi ciclici e può compromettere l'integrità strutturale della pavimentazione. Un altro fenomeno particolarmente diffuso è l'ormaiamento, ovvero l'accumulo di deformazioni permanenti lungo le traiettorie di passaggio dei veicoli, causato principalmente da elevate temperature e carichi pesanti. Inoltre, le variazioni termiche possono generare tensioni di trazione che, soprattutto alle basse temperature, danno origine a fenomeni di fessurazione termica.

La comprensione dei meccanismi di degrado e del comportamento meccanico dei conglomerati bituminosi risulta quindi fondamentale per la progettazione di pavimentazioni durevoli, nonché per la definizione di strategie di manutenzione e gestione in grado di garantire livelli prestazionali adeguati durante l'intero ciclo di vita dell'infrastruttura.

1.2 CONGLOMERATI BITUMINOSI

Il conglomerato bituminoso rappresenta uno dei materiali maggiormente impiegato nell'ambito delle infrastrutture viarie. Esso è costituito da una miscela di aggregati lapidei e bitume opportunamente dosati e miscelati al fine di ottenere un materiale idoneo alla realizzazione di pavimentazioni stradali, aeroportuali, piazzali industriali e altre superfici soggette al transito di veicoli.

Dal punto di vista meccanico, il conglomerato bituminoso è un materiale viscoelastoplastico, il cui comportamento dipende dalla temperatura, dall'intensità e dalla durata dei carichi applicati. A basse temperature tende a comportarsi come un materiale elastico e fragile, mentre all'aumentare della temperatura manifesta un comportamento più viscoso e deformabile. Questa caratteristica rende particolarmente importante la corretta progettazione della miscela in funzione delle condizioni climatiche e dei livelli di traffico previsti durante la vita utile della pavimentazione.

I materiali che costituiscono il conglomerato bituminoso sono: aggregati lapidei, filler, legante bituminoso, additivi ed eventuale conglomerato riciclato (fresato).

Gli aggregati costituiscono generalmente oltre il 90% in peso della miscela e rappresentano la fase solida dei conglomerati bituminosi a caldo. Essi possono essere suddivisi in diverse categorie in funzione della loro origine:

- Materiali litici da frantumazione: ottenuti dalla lavorazione di rocce naturali, caratterizzate da elevate proprietà meccaniche, attraverso un processo di frantumazione artificiale ed una successiva vagliatura che consentono di produrre differenti frazioni granulometriche; vengono utilizzati principalmente per gli strati superficiali.
- Sottoprodotti dell'industria: quali scorie d'altoforno, ceneri volanti e altri materiali derivanti da processi produttivi.
- Aggregati artificiali: ottenuti mediante processi industriali ad alta temperatura, vengono aggiunti al legante o in miscela, laddove gli aggregati naturali non risultano sufficienti, al fine di andare a migliorare delle specifiche prestazioni.
- Materiali riciclati (fresato d'asfalto): derivanti prevalentemente dalla fresatura in sito di vecchi strati bituminosi della pavimentazione; il fresato contiene sia aggregati sia bitume residuo e può essere reinserito nella produzione di nuove miscele, riducendo così il consumo di materie prime vergini e migliorando la

sostenibilità del processo produttivo. I quantitativi di materiale riciclato dipendono dallo strato da realizzare e sono stabiliti sulla base dello studio della miscela.

Il secondo componente fondamentale è il bitume, un materiale termoplastico derivato prevalentemente dalla raffinazione del petrolio greggio. Secondo la norma UNI EN 12597 il bitume è definito come un *“Materiale teoricamente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell’asfalto nativo completamente o quasi completamente solubile in toluene, molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente”*. Il bitume viene generalmente ottenuto come residuo della distillazione frazionata del petrolio: durante questo processo le diverse componenti del greggio vengono separate sfruttando le differenti temperature di ebollizione, il residuo più pesante costituisce la base per la produzione dei leganti bituminosi. Le proprietà del bitume risultano essere particolarmente importanti per il comportamento complessivo della pavimentazione. Durante la produzione del conglomerato deve mantenersi sufficientemente fluido alle temperature di lavorazione (tra i 130°C e i 180°C) in modo da consentire il ricoprimento, con una pellicola di spessore adeguato, della superficie di tutti gli aggregati. In esercizio, invece, deve possedere una rigidità sufficiente alle alte temperature per contrastare le deformazioni permanenti e allo stesso tempo mantenere un’adeguata flessibilità alle basse temperature per evitare fenomeni di fessurazione termica.

Per garantire adeguate prestazioni durante l’intera vita utile della pavimentazione, il conglomerato bituminoso deve possedere una serie di caratteristiche fondamentali:

- Elevata capacità portante necessaria per sopportare i carichi trasmessi dal traffico senza subire cedimenti strutturali;
- Elevata resistenza alla deformazione permanente e alla formazione di ormaie;
- Resistenza alla fatica, per evitare la comparsa di fessurazioni dovute ai carichi ripetuti;
- Resistenza alla fessurazione termica;
- Adeguata impermeabilità o, nel caso di conglomerati drenanti, elevata capacità di drenaggio delle acque meteoriche;
- Elevata aderenza pneumatico-pavimentazione per garantire la sicurezza della circolazione;
- Durabilità nel tempo e resistenza all’invecchiamento;
- Sostenibilità ambientale ed economicità del ciclo produttivo.

La produzione del conglomerato bituminoso avviene all'interno di specifici impianti industriali e il processo produttivo comprende diverse fasi. In primo luogo, gli aggregati vengono selezionati, dosati ed essiccati all'interno di appositi tamburi essiccatori così da eliminare l'umidità presente. Successivamente vengono riscaldati e separati nelle varie classi granulometriche. Il bitume viene mantenuto in serbatoi riscaldati a una temperatura controllata per preservarne la lavorabilità. Una volta raggiunte le condizioni ottimali, aggregati e bitume vengono introdotti nel mescolatore dove avviene la formazione della miscela. Terminata la miscelazione, il conglomerato viene trasferito nei silos di stoccaggio temporaneo e successivamente scaricato sui mezzi di trasporto che provvederanno a trasportarlo nei luoghi della messa in opera. Durante questa fase è fondamentale mantenere adeguate temperature per evitare raffreddamenti eccessivi che comprometterebbero la lavorabilità della miscela. La qualità finale del manto stradale non dipende solo dalle caratteristiche dei materiali utilizzati, ma anche dalla corretta esecuzione delle operazioni di produzione, trasporto, stesa e compattazione.

1.3 BITUME MODIFICATO

I bitumi modificati sono leganti bituminosi le cui proprietà reologiche vengono alterate durante il processo produttivo mediante l'aggiunta di uno o più agenti chimici, detti modificanti. Lo scopo della modifica è migliorare specifiche caratteristiche del bitume tradizionale, ottenendo prestazioni superiori sia del legante sia delle miscele bituminose nella quali esso viene impiegato. Il risultato finale è una maggiore qualità e durabilità delle pavimentazioni, o più in generale delle altre applicazioni ingegneristiche che utilizzano materiali bituminosi.

Le principali proprietà che si intendono migliorare mediante la modifica del bitume riguardano:

- La suscettibilità termica, ossia la variazione delle proprietà meccaniche al variare della temperatura;
- La rigidità e la resistenza alle deformazioni permanenti alle alte temperature;
- L'elasticità e la capacità di recupero delle deformazioni;
- L'adesione tra bitume e aggregati;
- La resistenza all'invecchiamento e all'ossidazione;
- La resistenza alla fatica e alla fessurazione termica.

In particolare, un bitume modificato deve mantenere un'adequata consistenza alle elevate temperature estive, evitando fenomeni di rifluimento e formazione di ormaie e, al tempo stesso, conservare sufficiente flessibilità alle basse temperature per contrastare la comparsa di fessure e cricche da ritiro termico. Inoltre, deve presentare una maggiore capacità di adesione agli aggregati lapidei e una minore sensibilità ai processi di invecchiamento dovuti all'azione dell'ossigeno, dell'acqua e delle radiazioni solari.

Per soddisfare tali requisiti, l'industria chimica ha sviluppato numerose tipologie di modificanti, ciascuna caratterizzata da specifici effetti sulle proprietà del legante. Tra i più diffusi si possono citare i polimeri elastomerici, i polimeri termoplastici, le gomme ricavate da pneumatici fuori uso, le cere sintetiche e vari additivi chimici utilizzati per migliorare la lavorabilità e la durabilità delle miscele.

Le tecnologie maggiormente impiegate per migliorare le prestazioni dei leganti bituminosi possono essere ricondotte a due principali approcci:

- Bitume modificato con polimeri (PmB – Polymer Modified Bitumen);

- Modifica diretta dei conglomerati bituminosi (PmA – Polymer Modified Asphalt).

Sebbene entrambe le metodologie abbiano l'obiettivo di incrementare le prestazioni meccaniche e la durabilità delle pavimentazioni, esse differiscono significativamente per le modalità di applicazione, gli impianti richiesti e i meccanismi di funzionamento.

Nell'ambito di tale tesi sono state esaminate 7 miscele differenti realizzate con il metodo PmB, pertanto, nel seguito si procederà brevemente a descrivere tale metodo.

La tecnologia PmB, comunemente definita Metodo Wet, consiste nella modifica diretta del bitume attraverso l'aggiunta di uno o più polimeri all'interno di un apposito impianto di produzione del legante modificato. L'efficacia della modifica è dovuta principalmente al fenomeno dell'inversione di fase che si ottiene aggiungendo il polimero immediatamente dopo il processo di raffinazione del petrolio o comunque prima della produzione del conglomerato bituminoso. Il bitume modificato viene successivamente trasportato all'impianto di produzione della miscela mediante l'utilizzo di camion dotati di miscelatori in grado di mantenere il bitume ad una temperatura compresa tra i 170°C e i 190°C, successivamente sarà depositato in silos di stoccaggio muniti anch'essi di miscelatori.

Oltre ai vantaggi elencati in precedenza, l'aggiunta dei polimeri nel bitume permette di prolungare la vita utile delle pavimentazioni, passando da una durata utile di circa 4 anni nel caso di un bitume tradizionale, fino a 8 anni di operatività nel caso di utilizzo del metodo PmB. Tra gli svantaggi si evidenziano invece i maggiori costi di produzione e trasporto, nonché la necessità di impianti dedicati e sistemi di stoccaggio specifici. Tuttavia, grazie all'allungamento della vita utile, il nuovo bitume permette di risparmiare sulle eventuali spese di manutenzione e monitoraggio, dunque, nonostante le spese di produzione e messa in opera siano maggiori, nel tempo se ne vedranno i benefici.

1.4 PROVE SURROGATE

Le prove surrogate rappresentano una categoria di prove prestazionali semplificate con l'obiettivo di fornire una valutazione indiretta delle proprietà meccaniche delle miscele bituminose mediante procedure sperimentali semplici, rapide ed economiche.

A differenza delle prove fondamentali, che consentono di determinare i parametri costitutivi della miscela sulla base della teoria meccanica dei materiali, e delle prove simulate, che riproducono in laboratorio le condizioni di carico e ambientali cui la pavimentazione è soggetta in esercizio, le prove surrogate non ricostruiscono in modo completo lo stato tensionale reale. Esse forniscono, però, indici prestazionali che consentono di stimare le prestazioni della miscela.

L'interesse verso le prove surrogate deriva dalla necessità di disporre di metodi di prova caratterizzati da elevata semplicità operativa, ridotti tempi di esecuzione e costi contenuti, tali da renderli idonei non solo nelle fasi di progettazione delle miscele (mix-design), ma anche nelle attività di controllo qualità durante la produzione. Infatti, mentre le prove fondamentali e simulate richiedono generalmente strumentazioni costose e procedure sperimentali articolate, le prove surrogate possono essere eseguite mediante apparecchiature comunemente disponibili nei laboratori. Affinché tali prove possano essere considerate affidabili, devono tuttavia presentare un'elevata ripetibilità e riproducibilità dei risultati, oltre ad avere una significativa correlazione con prove prestazionali di riferimento o con il comportamento reale delle pavimentazioni.

Nell'ambito della valutazione della resistenza alle deformazioni permanenti, le prove surrogate comprendono una serie di metodi sperimentali finalizzati a stimare la suscettibilità della miscela bituminosa ad accumulare deformazioni plastiche permanenti sotto l'azione dei carichi ripetuti. Sebbene tali prove non riproducano integralmente le condizioni di traffico e lo stato tenso-deformativo sviluppato nella pavimentazione durante l'esercizio, esse consentono di ottenere parametri prestazionali correlabili con la resistenza all'ormaiamento. Tra le prove surrogate maggiormente studiate in letteratura rientrano la prova HT-IDT e la prova IDEAL-RT. Una loro descrizione più dettagliata sarà riportata nel *Capitolo 3 – Indagine sperimentale*.

Lo sviluppo di un metodo di prova affidabile non dipende esclusivamente dalla definizione dell'indice prestazionale da determinare, ma richiede la standardizzazione dell'intero protocollo sperimentale. Questo comprende numerosi parametri che possono influenzare significativamente il risultato della prova, quali il metodo di compattazione

dei provini, il contenuto di vuoti d'aria, le dimensioni e le modalità di preparazione dei campioni (taglio, carotaggio, ecc.), le condizioni di condizionamento della miscela prima della compattazione, il condizionamento dei provini alla temperatura di prova e le condizioni di carico adottate durante l'esecuzione del test (temperatura, velocità di applicazione del carico e livello di sollecitazione). La variazione di uno o più di tali parametri può modificare sensibilmente la risposta meccanica della miscela, compromettendo la capacità della prova di rappresentare efficacemente la resistenza all'ormaiamento. Per questo motivo risulta fondamentale definire protocolli sperimentali rappresentativi delle reali condizioni di esercizio delle pavimentazioni.

Accanto alle prove surrogate, vengono frequentemente impiegate prove di tipo simulativo, quali l'Asphalt Pavement Analyzer (APA) e l'Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT). Tali metodi riproducono più fedelmente l'azione dei carichi veicolari, consentendo una valutazione diretta delle deformazioni permanenti sviluppate nel tempo. In particolare, il test HWTT permette di valutare simultaneamente la profondità di ormaia e la sensibilità all'umidità della miscela mediante il passaggio di una ruota caricata. Sebbene tali prove offrano una maggiore rappresentatività del comportamento in esercizio, esse risultano generalmente più onerose, richiedono tempi di prova più lunghi e procedure sperimentali più complesse, rendendole poco adatte nelle attività di controllo qualità.

Infine, le prove fondamentali, quali il modulo dinamico, il Flow Number e il Repeated Load Permanent Deformation (RLPD), consentono di caratterizzare il comportamento viscoelastico della miscela e la sua risposta ai carichi ciclici attraverso parametri meccanici di base.

Le prove surrogate si configurano come un compromesso tra semplicità operativa e capacità predittiva, purché siano adeguatamente validate mediante correlazioni con prove fondamentali, prove simulate o prestazioni osservate in campo.

1.5 ARTICOLI E PUBBLICAZIONI

Nel seguente capitolo si riportano alcuni articoli e pubblicazioni che trattano i principali argomenti inerenti al presente studio.

Di seguito si riporta l'elenco generale delle pubblicazioni inserite, riguardanti l'implementazione di prove prestazionali semplici per la valutazione delle prestazioni a fessurazione e ormaiamento delle miscele bituminose nell'ambito del controllo qualità.

Anno	Autore	Titolo	Fonte	Origine
2024	G. Vamsikrishna et al.	Rutting and Cracking Performance of Asphalt Mixtures for 150 mm and 100 mm Diameter Samples Using Simple Performance Tests	American Society of Civil Engineers	India
2024	N. G. Elias et al.	Rutting Mechanical Tests for Balanced Design of Airfield Asphalt Mixtures	Federal Aviation Administration	USA
2023	I. Boz et al.	Simple and Practical Tests for Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures in the Balanced Mix Design Process	Virginia Transportation Research Council	USA
2026	A. J. Taylor et al.	Validation of Rapid Rutting Test Procedures Using Plant Mixes from the 2021 NCAT Test Track	National Center for Asphalt Technology	USA
2023	G. Vamsikrishna e D. Singh	Comparison of Rutting Resistance of Plant Produced Asphalt Mixes Using Hamburg Wheel Tracker and Surrogate Simple Performance Tests: IDEAL-RT and HT-IDT	American Society of Civil Engineers	India
2023	G. Vamsikrishna e D. Singh	Exploring potential of Marshall-RT as simple performance test to evaluate rutting resistance of asphalt mixtures	Taylor & Francis	India
2025	I. Boz et al.	Interlaboratory Study for the Indirect Tensile at High Temperature Test and Ideal Rutting Test	Virginia Transportation Research Council	USA

Tabella 1: Elenco delle pubblicazioni analizzate

Il primo articolo citato è tratto dall'archivio dell'ASCE (American Society of Civil Engineers), pubblicato nel 2024 da G. Vamsikrishna et al., dal titolo “Rutting and Cracking Performance of Asphalt Mixtures for 150 mm and 100 mm Diameter Samples Using Simple Performance Tests”, risultato di uno studio sviluppato in India, presso l'Indian Institute of Technology Bombay.

La presente ricerca ha analizzato le prestazioni di miscele bituminose in termini di resistenza all'ormaiamento e resistenza alla fessurazione utilizzando campioni di diametro pari a 150 mm e 100 mm, mediante prove prestazionali semplificate. Sono state analizzate nove diverse miscele prodotte in impianti provenienti da diverse località dell'India. Le miscele raccolte sono state progettate mediante il metodo Marshall,

utilizzando differenti dimensioni nominali massime degli aggregati, pari a 13,2 mm, 19 mm e 26,5 mm, e differenti tipologie di legante: leganti non modificati, leganti modificati con gomma riciclata e bitume modificato con polimeri. I campioni sono stati compattati in laboratorio mediante compattatore giratorio, sia quelli di diametro pari a 100 mm sia di diametro 150 mm, fino a raggiungere un'altezza di 65 mm per le miscele con dimensione nominale massima degli aggregati pari o inferiore a 19 mm e un'altezza di 95 mm per le miscele con dimensione nominale massima degli aggregati pari a 26,5 mm. Inoltre, tutti i campioni sono stati compattati fino a raggiungere un contenuto di vuoti pari al 7%. A scopo investigativo sono inoltre state eseguite prove di resistenza a trazione indiretta (ITS). Nel complesso, i risultati hanno evidenziato che i criteri di accettazione attualmente disponibili, sviluppati per campioni di diametro pari a 150 mm, non possono essere applicati direttamente ai campioni di diametro pari a 100 mm. In tale studio vengono quindi proposti dei criteri preliminari di accettazione specifici per i campioni da 100 mm, basati sull'analisi delle prestazioni sperimentali. Le prove IDEAL-CT e IDEAL-RT sono state condotte rispettivamente a 25°C e 50°C su campioni di diametro pari a 150 mm e 100 mm. Sulla base dell'analisi sperimentale condotta sono state formulate le seguenti conclusioni:

- I valori di resistenza a trazione indiretta e di resistenza all'ormaiamento (espressa attraverso la resistenza a taglio τ_f e l'indice RT_{index}) ottenuti sui campioni da 100 mm sono risultati sistematicamente superiori rispetto a quelli misurati sui campioni da 150 mm. Al contrario la resistenza alla fessurazione (CT_{index}) è risultata maggiore nei campioni da 150 mm rispetto a quelli da 100 mm.
- È stata osservata una forte correlazione lineare tra i risultati ottenuti sui campioni di diametro pari a 150 mm e 100 mm.
- Per la prova IDEAL-CT, diversi autori hanno proposto criteri minimi di accettazione per il CT_{index} in funzione della tipologia di miscela bituminosa, ad esempio Zhout et al. (2020) raccomandano un valore minimo di CT_{index} pari a 90 come soglia di accettazione per miscele dense bituminose. Utilizzando la relazione ottenuta tra $CT_{index150}$ e $CT_{index100}$ si è determinato un criterio preliminare di accettazione per i campioni da 100 mm pari a $CT_{index100} = 50$. L'applicazione congiunta dei criteri esistenti per $CT_{index150}$ e di quelli sviluppati per $CT_{index100}$ consente di classificare le miscele bituminose in modo equivalente. Pertanto, la prova IDEAL-CT può essere eseguita anche su campioni di diametro pari a 100

mm per valutare la resistenza alla fessurazione delle miscele bituminose, purché vengano adottati criteri di accettazione opportunamente calibrati.

- Nel caso della prova IDEAL-RT, come criterio di accettazione del RT_{index} , per i provini di diametro pari a 150 mm si è adottato un valore di $RT_{index} = 65$. Dalla forte correlazione emersa tra $RT_{index150}$ e $RT_{index100}$, a tale valore limite di 65 è emerso che corrisponde un valore di $RT_{index100} = 110$.

Il secondo estratto è tratto dal progetto AAPTTP finanziato dalla National Asphalt Pavement Association (NAPA) e la Federal Aviation Administration (FAA), condotto presso l'Università del Nevada (USA) da N. G. Elias et al.. L'obiettivo del seguente progetto è quello di definire le specifiche delle prove meccaniche di laboratorio per la valutazione dell'ormaiamento da integrare nel quadro della Balanced Mix Design della FAA per le pavimentazioni aeroportuali flessibili, sia nella fase di progettazione della miscela sia durante la produzione. Tale fenomeno, infatti, assume un'importanza ancora maggiore nelle pavimentazioni aeroportuali, poiché gli aeromobili esercitano carichi sulle ruote e pressioni di gonfiaggio degli pneumatici significativamente superiori rispetto a quelli tipici delle infrastrutture stradali.

Il seguente studio comprende sia campioni miscelati e compattati in laboratorio sia campioni costituiti da miscele prodotte in impianto e successivamente ricompattate in laboratorio di diverse miscele aeroportuali, entrambi valutati a due livelli di vuoti d'aria:

- 5% di vuoti, i provini destinati alle prove HWTT, HT-IDT e IRT sono stati ricavati mediante taglio fino a uno spessore di 62 mm, mentre quelli destinati alla prova APA sono stati compattati direttamente fino a uno spessore di 75 mm;
- 7% vuoti, tutti i provini sono stati compattati direttamente fino a uno spessore di 62 mm.

Attualmente sono previste tre opzioni dall'attuale FAA Advisory Circular 150/5370-10H per le miscele utilizzate nello strato di usura (P-401) e quelle usate per la superficie delle banchine o nello strato di base (P-403), destinate ad aeroporti utilizzati da aeromobili con peso lordo pari o superiore a 60.000 lb:

- APA con pressione del tubo pari a 250 psi e carico sulla ruota di 250 lb, a una temperatura di prova di 64°C e contenuto di vuoti di progetto: a tale criterio si attribuisce un limite massimo di profondità dell'orma ≤ 10 mm dopo 4000 cicli.

- APA con pressione del tubo pari a 100 psi e carico sulla ruota di 100 lb, temperatura di prova di 64°C e contenuto di vuoti di progetto: profondità dell'orma ≤ 5 mm dopo 8000 cicli.
- HWTT (in acqua) a 50°C e con 7% di vuoti (nel caso in cui l'APA non sia disponibile): profondità dell'orma ≤ 10 mm dopo 20000 passaggi.

Dal presente studio sono emerse le seguenti conclusioni:

- Esistono delle forti correlazioni tra le prove APA (Asphalt Pavement Analyzer), e le prove surrogate HT-IDT e IRT;
- Per tutte le miscele considerate è stata osservata una migliore resistenza all'ormaiamento quando le prove sono state eseguite al livello inferiore di vuoti, ad eccezione della prova HWTT. I risultati di tale prova hanno infatti evidenziato andamenti incoerenti tra campioni con differenti livelli di vuoti e differenti modalità di preparazione: i campioni con 5% di vuoti hanno mostrato profondità dell'ormaia superiori rispetto ai campioni con 7% di vuoti, suggerendo che il metodo di preparazione dei provini (taglio oppure compattazione diretta) abbia esercitato un'influenza significativa sui risultati della prova. Il gradiente di vuoti generato dal taglio e l'accumulo di pressione interstiziale dell'acqua all'interno del provino hanno influenzato sensibilmente i risultati, evidenziando l'effetto del metodo di preparazione sulla profondità dell'ormaia. Si è infatti osservato che l'infiltrazione d'acqua nei provini tagliati ha provocato fenomeni di stripping, con conseguente aumento della profondità dell'ormaia e comportamenti incoerenti rispetto ai differenti livelli di vuoti. Viene per tale motivo raccomandato di eseguire la prova HWTT, nel caso di provini immersi in acqua, esclusivamente su provini compattati direttamente al 7% di vuoti, in modo tale da evitare risultati incoerenti causati dall'infiltrazione dell'acqua dallo stripping nei provini tagliati.
- Si è osservata una robusta correlazione lineare tra le due prove monotone HT-IDT e IRT. Le forti correlazioni riscontrate confermano l'idoneità delle prove surrogate, che risultato particolarmente vantaggiose per una più semplice applicazione durante la produzione. Nonostante i campioni siano stati testati a due differenti livelli di vuoti e a un ampio intervallo di temperature ambientali, le correlazioni tra le diverse prove sono rimaste molto solide. Questo risultato suggerisce che sia possibile derivare i criteri di una prova a partire da quelli di

un'altra, purché entrambe siano eseguite allo stesso contenuto di vuoti e alla medesima temperatura di prova.

- D'altra parte, i risultati della prova HWTT non hanno evidenziato correlazioni robuste rispetto alle altre prove meccaniche di laboratorio per la valutazione dell'ormaiamento, sia nel caso dei provini ottenuti mediante taglio sia in quelli compattati direttamente.

Il terzo report è presentato da I. Box et al. e pubblicato dal Virginia Transportation Research Council nel 2023, dal titolo "Simple and Practical Tests for Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures in the Balanced Mix Design Process". Lo scopo dello studio era quello di valutare la fattibilità dell'utilizzo delle prove a carico monotono come strumenti di screening del potenziale di ormaiamento delle miscele bituminose destinate agli strati superficiali delle pavimentazioni nello Stato della Virginia. Sono state analizzate 17 miscele prodotte in impianto mediante la prova APA e tre prove monotone:

- La prova di trazione indiretta ad alta temperatura (HT-IDT);
- La prova rapid rutting (IRT);
- La prova di stabilità e scorrimento Marshall (MS).

Su un gruppo di miscele selezionate è stato eseguito un insieme di prove fondamentali di ormaiamento in aggiunta alla prova APA:

- Dynamic Modulus Test;
- Confined Flow Number (FN);
- Stress Sweep Rutting (SSR).

Nel presente studio sono state inoltre valutate quattro temperature differenti al fine di determinare la temperatura critica di prova delle prove monotone considerate: la temperatura di 64°C, corrispondente alla temperatura di prova utilizzata per il test APA, la temperatura di 54,4°C poiché rappresenta la temperatura massima media su 7 giorni calcolata sulla base delle condizioni climatiche della Virginia, e le temperature di 49°C e 40°C. In conclusione, è emerso che la temperatura più appropriata per valutare il potenziale di ormaiamento mediante le prove monotone considerate corrisponde a 54,4°C.

Sulla base delle miscele analizzate nello studio, l'analisi comparativa tra le prove monotone e la prova APA ha evidenziato che le prove HT-IDT e HT-RT forniscono caratteristiche di valutazione delle prestazioni analoghe o superiori rispetto all'APA,

presentando inoltre caratteristiche di ripetibilità simili. I risultati della prova IRT hanno portato a classificare le prestazioni delle miscele nello stesso modo delle prove APA, Hamburg Wheel Test e FN. Si è infine osservato che la prova HT-IDT è la più sensibile alle variazioni della composizione delle miscele e che rappresenta la migliore alternativa alla prova APA nell'ambito del BMD (Balanced Mix Design) della Virginia.

Il quarto report è tratto dal National Center for Asphalt Technology, dal titolo "Validation of Rapid Rutting Test Procedures Using Plant Mixes from the 2021 NCAT Test Track", i cui autori sono A. J. Taylor et al.. In questo studio sono state eseguite due prove rapide di deformazione permanente (HT-IDT e IDEAL-RT) e due prove tradizionali a tracciamento di ruota (HWTT e APA), al fine di valutare la resistenza all'ormaiamento di 14 miscele.

Gli obiettivi principali dello studio erano:

- Valutare le relazioni tra le prove wheel-tracking e prove rapide di rutting in presenza di materiali e additivi differenti;
- Proporre valori soglia preliminari per le prove rapide e confrontarli con le prestazioni in campo sul Test Track;
- Confrontare i risultati tra miscele riscaldate (re-heated PMLC) e miscele prodotte in sito (production PMLC) in relazione alle prove rapide di rutting.

Lo studio è stato quindi suddiviso in due fasi:

- I. Produzione dei provini e successiva esecuzione delle prove rapide (HT-IDT e IDEAL-RT) e HWTT su 14 miscele durante la fase di produzione;
- II. Esecuzione delle prove rapide (HT-IDT e IDEAL-RT) su miscele riscaldate e compattate in laboratorio (PMLC), confrontandole con i risultati delle prove wheel tracking (APA e HWTT).

Sono state utilizzate 14 miscele superficiali differenti provenienti da sei stati e caratterizzate da differenti componenti, inclusi diversi additivi, tipi di legante, contenuti di legante, contenuti di RAP e gradazioni di aggregati. Tutti i provini preparati per questo studio sono stati ottenuti da queste miscele prodotte in impianto e compattate in laboratorio (Plant Mixed Lab Compacted, PMLC) con due condizioni di invecchiamento:

- "Production PMLC": provini compattati immediatamente dopo il campionamento, senza permettere alla miscela di raffreddarsi o essere nuovamente riscaldata.

- “Re-heated PMLC” (RH PMLC): provini ottenuti da miscele prodotte in impianto e successivamente riscaldate;

Questi due protocolli di invecchiamento sono stati valutati per analizzare, come detto prima, l’effetto delle diverse condizioni di invecchiamento sulla resistenza alla deformazione permanente, in particolare per le miscele contenenti additivi.

I principali risultati possono essere riassunti come segue:

- Confronto tra risultati RH PMLC e Production PMLC:
 - In media, i valori della prova HT-IDT sono risultati leggermente più alti per le miscele PMLC riassemblate rispetto a quelle di produzione, probabilmente a causa del tempo aggiuntivo in forno durante il processo di riassemblaggio.
 - Non è stato osservato nessun trend coerente nel confronto tra valori RT_{index} delle miscele PMLC di produzione e riassemblate, sia tramite analisi delle medie sia tramite t-tests statistici.
 - Le differenze di profondità dell’ormaia nel test HWTT tra produzione e riassemblaggio sono risultate inferiori a 1,0 mm, perciò non considerabili come differenze rilevanti.
- Correlazione tra prove:
 - L’analisi di correlazione di Pearson ha mostrato che sia HT-IDT sia IDEAL-RT presentano correlazioni di tipo potenza “molto forte” e “forte” con la profondità dell’ormaia HWTT rispettivamente per miscele RH PMLC e PMLC di produzione. Tutte e tre le prove sono state eseguite alla stessa temperatura (50°C).
 - La profondità dell’ormaia APA per le miscele RH PMLC non ha mostrato correlazioni forti con gli altri tre parametri nelle condizioni di questo studio (64°C – 100 lb/100 psi), in contraddizione con tutti i risultati ottenuti e descritti nei report riportati in precedenza.
 - È stata osservata una correlazione lineare molto forte tra HT-IDT e RT_{index} per entrambe le condizioni di invecchiamento delle miscele.
- Valori soglia delle prove rapide:
 - Sulla base delle correlazioni con HWTT, i valori preliminari di soglia HT-IDT sono stati determinati pari a 18,5 psi (RH PMLC) e 22,2 psi (production PMLC),

- I valori preliminari di soglia di RT_{index} sono stati determinati pari a 60,2 e 74,8 rispettivamente per RH e production PMLC.
- Relazioni laboratorio-campo sul Test Track:
 - Le relazioni tra i risultati di laboratorio e ormaia in campo hanno mostrato un'elevata dispersione, nonostante questo i trend risultato coerenti: una maggiore resistenza in laboratorio corrisponde a una minore ormaia in campo.
 - Le basse profondità di ormaia in campo rispetto ai valori soglia suggeriscono che i criteri di laboratorio delle prove rapide potrebbero essere conservativi.

Nel quinto studio, riportato dall'American Society of Civil Engineers, sviluppato da G. Vamsikrishna e D. Singh ("Comparison of Rutting Resistance of Plant Produced Asphalt Mixes Using Hamburg Wheel Tracker and Surrogate Simple Performance Tests: IDEAL-RT and HT-IDT") sono state esaminate otto miscele prodotte in impianto, caratterizzate da differenti dimensioni nominali massime degli aggregati e da differenti tipi di legante bituminoso, con lo scopo di valutare la resistenza all'ormaiamento attraverso una prova simulativa (HWTT, 60°C) e due prove prestazionali surrogate semplificate (HT-IDT e IDEAL-RT, 50°C). Tutte le prove sono state eseguite su campioni compattati con compattatore giratorio a un contenuto di vuoti pari a 7%. I risultati hanno mostrato correlazioni eccellenti delle due prove semplificate con il parametro RRI (Rutting Resistance Index). Tale parametro, derivato dalla prova HWTT, incorpora simultaneamente l'effetto della profondità dell'ormaia e l'effetto non lineare del numero di passaggi sulla formazione dell'ormaia, definito come:

$$RRI = N^{0,3} \left(1 - \frac{RD}{25,4} \right) \quad (Formula\ 1)$$

Dove N rappresenta il numero di passaggi necessari per raggiungere una profondità dell'ormaia di 12,5 mm (oppure assume valore pari a 20.000), mentre RD rappresenta la profondità dell'ormaia a 20.000 passaggi (oppure 12,5 mm per le miscele che raggiungono tale valore prima dei 20.000 passaggi).

È stata inoltre osservata un'eccellente correlazione tra le due prove surrogate. Per garantire una buona resistenza all'ormaiamento sono stati proposti i seguenti valori minimi preliminari (alla temperatura di prova di 50°C):

- Per il parametro τ_f (resistenza al taglio) IDEAL-RT: valore minimo pari a 1,0 MPa;

- Per il parametro RT_{index} : valore minimo pari a 65;
- Per la resistenza HT-IDT: valore minimo pari a 135 kPa.

Tali criteri possono essere utilizzati per determinare se una miscela supera o meno i requisiti prestazionali relativi all'ormaiamento. Tra le prove surrogate analizzate la prova IDEAL-RT è risultata l'alternativa più efficace e promettente al HWTT. Nel complesso però, entrambe le sue prove surrogate si sono dimostrate adatte alla classificazione delle miscele in funzione della loro resistenza all'ormaiamento. Pertanto, in tale report, si suggerisce un loro utilizzo sia per l'approvazione delle miscele asfaltiche prodotte in laboratorio e in impianto, sia per le attività di controllo qualità.

Il sesto studio, condotto sempre dagli stessi autori del precedente report, dal titolo "Exploring potential of Marshall-RT as simple performance test to evaluate rutting resistance of asphalt mixtures", ha evidenziato un'ulteriore correlazione della prova IDEAL-RT con il test monotono Marshall-RT. L'obiettivo di tale studio era infatti quello di sviluppare un semplice test monotono Marshall-RT per valutare la resistenza alla deformazione permanente delle miscele bituminose durante la fase di mix design e produzione in impianto. Inoltre, gli autori hanno confrontato, al fine di stabilire delle correlazioni, tale prova con i parametri ottenuti dai test FN, HWTT e IDEAL-RT. In questo studio sono state raccolte nove miscele bituminose prodotte in diversi impianti in India: tutte le miscele sono state progettate utilizzando il metodo di mix design Marshall e tutti i campioni sono stati compattati ad un contenuto di vuoti pari a 7% utilizzando un compattatore giratorio Superpave. La configurazione della prova Marshall-RT è simile alla prova IDEAL-RT eccetto per il supporto inferiore: tale prova combina il dispositivo Marshall (in basso) e il dispositivo IDT (in alto). La prova è stata eseguita su campioni di diametro pari a 150 mm a 50°C applicando una velocità di deformazione fissa di 50 mm/minuto tramite una striscia di carico superiore di 19 mm. In conclusione, il test Marshall-RT ha mostrato una correlazione molto buona con i test di rutting fondamentali (FN), simulativi (HWTT) e semplici (IDEAL-RT), ciò indica che tale test può potenzialmente valutare la resistenza al rutting delle miscele asfaltiche. Per quanto riguarda i risultati del test IDEAL-RT, si è osservata una buona correlazione con i test di rutting HWTT e APA. Infine, gli autori hanno proposto dei criteri preliminari di soglia per le due prove prestazionali semplici, Marshall-RT e IDEAL-RT, pari rispettivamente a 5 kN per P_{max} (carico di picco), 14 kN·mm (lavoro per il danno da deformazione) per WP_{max} e pari a 90 per RT_{index} .

Infine, si riporta un settimo studio pubblicato dal Virginia Transportation Research Council e condotta da I. Boz et al., dal titolo “Interlaboratory Study for the Indirect Tensile at High Temperature Test and Ideal Rutting Test”. In questo studio sono state valutate la sensibilità delle prove HT-IDT e IDEAL-RT a fattori quali l’ambiente di condizionamento dei provini e la velocità di carico. Per il primo fattore sono emerse differenze significative nel tempo di condizionamento dei provini tra bagno d’acqua e camera climatica: i provini condizionati in un bagno d’acqua raggiungono la temperatura di prova target più rapidamente rispetto a quelli condizionati in una camera ambientale. Inoltre, i provini condizionati in un bagno d’acqua presentano costantemente valori degli indici inferiori rispetto ai provini condizionati in una camera ambientale, indicando un effetto sostanziale dell’ambiente di condizionamento sui risultati delle prove HT-IDT e IDEAL-RT. Questa conclusione sottolinea l’importanza di specificare e controllare l’ambiente di condizionamento nel protocollo di prova. Si è invece osservato che la velocità di carico non influenza significativamente i risultati dei due test: questa conclusione è valida per un intervallo di velocità di carico compreso tra 46 e 54 mm/min.

CAPITOLO 2

OBIETTIVI

L'obiettivo principale di questa tesi è quello di analizzare l'attuale panorama sperimentale per l'analisi delle deformazioni permanenti dei conglomerati bituminosi, che comprende diversi metodi d'indagine eseguiti mediante prove standard (sia speditive che prestazionali) confrontandolo con la recente prova IDEAL-RT al fine di stabilire possibili correlazioni e procedure operative per la valutazione della resistenza ai fenomeni di ormaimento alle alte temperature di esercizio.

In particolare, lo studio tratta tali aspetti valutando la prova High Temperature Indirect Test (HT-IDT) e la prova Cyclic Compression Test (CCT), la prova Wheel Tracking (WWT) in comparazione al semplice Rapid Shear Rutting Test (IDEAL-RT). A tali prove si è aggiunto, a scopo investigativo, anche il test ITSM per la valutazione della rigidità (in configurazione di trazione indiretta). Analizzando 16 differenti tipologie di conglomerati bituminosi (9 con bitume tradizionale, 7 con bitume modificato), ogni test è eseguito per determinare diversi parametri caratteristici, che vengono poi confrontati con i due parametri caratteristici della prova IDEAL-RT (RT_{index} e $RT_{index,7\%}$).

A corredo del processo valutativo, le risultanze sperimentali e le correlazioni vengono poi studiate in termini di sensitività rispetto alla tipologia di miscela (tradizionale vs. modificata) e al contenuto di vuoti.

Le eventuali correlazioni con significatività statistica che saranno individuate saranno quindi prese a riferimento come elemento di stima della resistenza alle deformazioni permanenti (tramite parametri noti quali deformazione cumulativa, creep, ecc.) a partire dall'esecuzione di prove speditive di tipo IDEAL-RT, con notevole risparmio di tempo e complessità operativa.

La metodologia sperimentale adottata in questa tesi è illustrata in *Figura 1*.

I dettagli relativi ai materiali e alle proprietà volumetriche sono riportati nel *Capitolo 3 – Indagine sperimentale*.

All'interno del database sperimentale costituito dalle 16 miscele, ottenuto congiuntamente dalle unità operative del progetto, il presente elaborato tratta la parte sperimentale, sviluppata presso il Laboratorio per Materiali da Costruzione – Sezione Sperimentale Stradale del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova, che riguarda lo studio di 4 conglomerati selezionati.

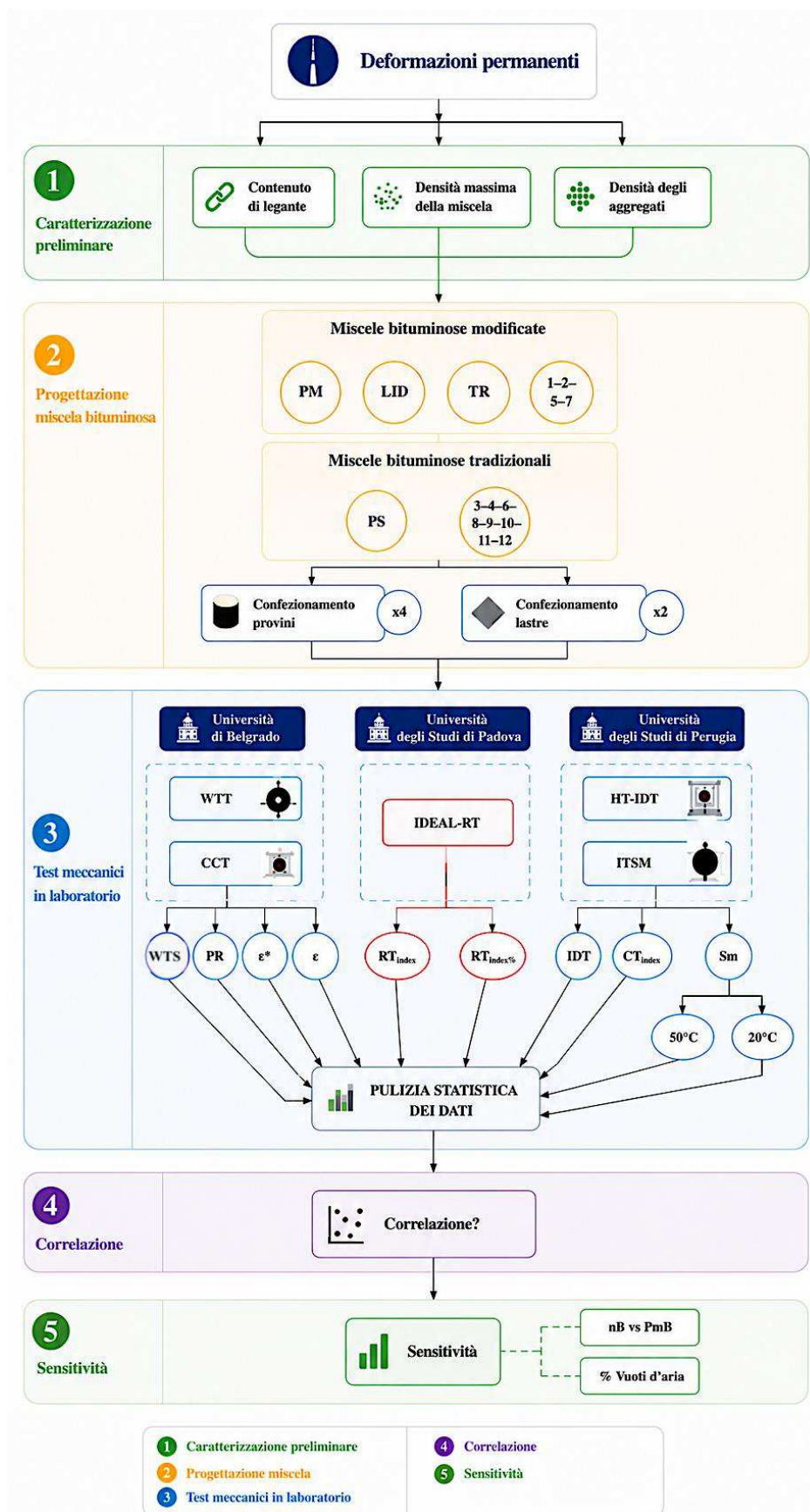


Figura 1: Schema della metodologia sperimentale

CAPITOLO 3

INDAGINE SPERIMENTALE

In questo capitolo vengono analizzate e descritte le fasi operative della ricerca. Vengono inoltre analizzati i dati e descritte le prove effettuate presso l'Università degli Studi di Perugia e l'Università di Belgrado.

3.1 MATERIALI

In *Tabella 2* vengono riportate le principali caratteristiche delle miscele bituminose utilizzate nelle prove sperimentali. I materiali analizzati provengono da tre differenti impianti di produzione e presentano composizioni diversificate in termini di tipologia di legante, contenuto di materiale riciclato (RAP) e composizione granulometrica, al fine di includere nel database conglomerati piuttosto diversi.

Codice	Sito/impianto campionamento	Bitume	Fresato su totale aggregati (%)	Bitume su miscela (%)	Bitume su aggregato (%)	Filler (%)
PS	Veneto Strade	Standard	25	5,1	5,4	7,9
PM	Veneto Strade	Modificata	0	4,9	5,2	7,2
LID	Lidarno Modificata	Modificata	-	-	-	-
TR	Trovati Modificata	Modificata	28	5,1	5,4	8

Tabella 2 – Materiali

Prima dell'esecuzione delle prove meccaniche le miscele bituminose sono state sottoposte a una serie di prove preliminari di caratterizzazione, al fine di determinare le principali proprietà volumetriche e compositive. In particolare, sono stati valutati il contenuto di legante mediante estrazione, la densità massima teorica della miscela e la densità degli aggregati, secondo le procedure previste dalle normative europee di riferimento. Ciò funzionalmente alle successive fasi di produzione, che hanno previsto la compattazione dei conglomerati ad uno specifico target del contenuto di vuoti.

Come noto, infatti, è possibile esprimere la configurazione interna dei conglomerati bituminosi in termini di rapporti volumetrici e ponderali tra le diverse componenti: solida (aggregati), semisolida/legante (bitume) e gassosa (aria). Si può immaginare la struttura della miscela come un raggruppamento di particelle sferoidali nella quali gli elementi con

dimensioni minori occupano gli spazi lasciati liberi dagli elementi di dimensioni più elevate. Ogni elemento è ricoperto dal legante: una parte del bitume penetra all'interno della porosità superficiale permeabile all'acqua, mentre una quota parte rimanente va a formare una sottile pellicola di ricoprimento; il primo è definito "bitume assorbito" mentre il secondo è detto "bitume efficace". I vuoti residui del conglomerato sono dati dal volume intergranulare occupato dall'aria. In *Figura 2* è possibile osservare una schematizzazione di quanto appena descritto.

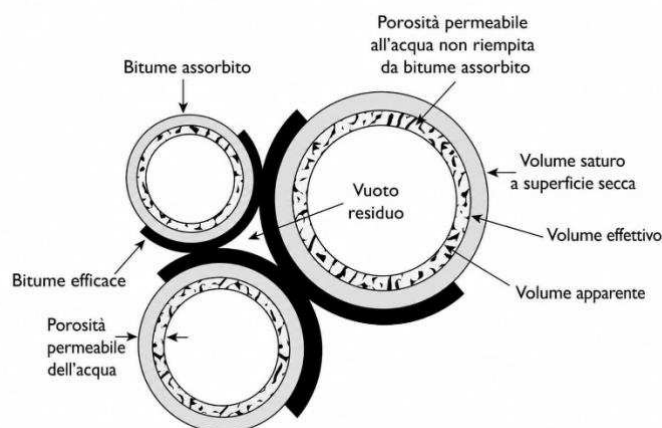


Figura 2: Composizione interna del conglomerato bituminoso

Data una generica porzione di miscela di massa M e volume V , è possibile associare a ogni fase componente i corrispondenti valori di volume e di massa, come spiegato di seguito.

3.1.1 CONTENUTO DI LEGANTE

Il contenuto di bitume è stato determinato mediante prova di estrazione secondo la norma EN 12697-39. La prova descritta nella seguente normativa consente quindi di andare a determinare il contenuto di legante delle miscele bituminose mediante la combustione della miscela in una fornace. I risultati ottenuti vengono riportati in *Tabella 3*:

	Frame weight W_t (g)	Combined weight W_{t+s} (g)	Sample weight $W_{s,w}$ (g)	Final weight (g)	Aggregate weight W_a (g)	Weight loss W_{loss} (g)	Bitumen (by mix) B_{mix} (%)	Bitumen (by aggregate) $B_{aggregate}(\%)$
PS	4723,4	5994,2	1270,8	1198,3	1198,3	72,5	5,71	6,05
PM	4726,9	5802,2	1075,3	1022,3	1022,3	53	4,93	5,18
LID	4700,5	6124,6	1424,1	1346,7	1346,7	77,4	5,44	5,75
TR	4699,4	5738,2	1038,8	978,7	978,7	60,1	5,79	6,14

Tabella 3 – Estrazione del bitume

Per calcolare la massa totale della miscela bituminosa prima della combustione $W_{s,w}$, espressa in grammi, si è utilizzata la seguente formula:

$$W_s = W_{t+s} - W_t \quad (\text{Formula 2})$$

Dove:

- W_s = massa totale della miscela bituminosa prima della combustione (g);
- W_{t+s} = massa della miscela bituminosa, del cestello portacampione e della vaschetta di raccolta prima della combustione (g);
- W_t = massa del cestello portacampione e della vaschetta di raccolta (g).

Per il calcolo del contenuto di legante del campione (B, %) si è utilizzata la seguente formula:

$$B_{mix} = \frac{W_s - W_a}{W_s} \times 100 = \frac{W_{loss}}{W_s} \times 100 \quad (\text{Formula 3})$$

$$B_{aggregate} = \frac{W_{loss}}{W_a} \times 100 \quad (\text{Formula 4})$$

Dove:

- B_{mix} = contenuto di legante della miscela bituminosa espresso come percentuale in massa della miscela bituminosa (%);
- $B_{aggregate}$ = contenuto di legante della miscela bituminosa espresso come percentuale in massa degli aggregati (%);
- W_a = massa totale degli aggregati rimanenti dopo la combustione (g);
- W_{loss} = perdita di massa (g).

In *Tabella 2* sono riportati i valori di B_{mix} e $B_{aggregate}$ riportati nelle schede tecniche delle miscele i cui valori risultano essere compatibili con quelli ottenuti tramite estrazione e riportati in *Tabella 3*. Nel caso della miscela TR le differenze nei risultati possono essere attribuite alle normali tolleranze di produzione e alle incertezze sperimentali associate alla procedura di estrazione.

3.1.2 DENSITÀ MASSIMA DELLA MISCELA

La densità massima delle miscele bituminose (massa priva di vuoti) è stata determinata attraverso due diversi metodi:

1. Metodo volumetrico (secondo la norma EN 12697-5-A);
2. Metodo matematico (secondo la norma EN 12697-5-C).

La densità massima, insieme alla densità apparente, è stata successivamente utilizzata per calcolare il contenuto di vuoti d'aria nei provini compattati. Nella procedura volumetrica la densità massima delle miscele bituminose viene determinata a partire dal volume del campione privo di vuoti e dalla sua massa secca (massa in aria dopo essiccazione). Nella procedura matematica, invece, la densità massima della miscela bituminosa viene calcolata in base alla sua composizione (contenuto di legante e contenuto di aggregati) e alle densità dei materiali costituenti.

La procedura volumetrica consiste nel:

1. Pesare il picnometro vuoto, ottenendo la massa M_1 (noto il volume del picnometro V_P);
2. Inserire il campione secco nel picnometro e portarlo a temperatura ambiente, pesare nuovamente il picnometro ottenendo la massa M_2 ;
3. Riempire il picnometro con acqua e collocarlo in un bagno termostato a una temperatura uniforme;
4. Estrarre il picnometro dal bagno termostato e pesarlo, ottenendo la massa M_3 .

La densità massima teorica della miscela bituminosa viene calcolata mediante:

$$\rho_{mv} = \frac{M_2 - M_1}{V_P - \left(\frac{M_3 - M_2}{\rho_w} \right) \times 10^{-6}} \quad (Formula\ 5)$$

Dove il volume del picnometro è definito come:

$$V_P = \frac{M_2 - M_1}{\rho_w} \times 10^{-6} \quad (Formula\ 6)$$

In *Tabella 4* si riportano i risultati ottenuti per le quattro miscele.

	M_1 (pycnometer) (g)	M_2 (pyk+sample) (g)	M_3 (pyk+sample+H ₂ O) (g)	M_4 (pyk+H ₂ O) (g)	ρ_w (g/cm ³)	ρ_{wv} (g/cm ³)
PS	226,3	301,5	950,5	905,2	1,00	2,52
PM	226,3	316,5	963,6	905,2	1,00	2,84
LID	226,3	290,2	944,0	905,2	1,00	2,55
TR	226,3	306,2	953,0	905,2	1,00	2,49

Tabella 4 - Densità massima (metodo volumetrico)

Con il metodo matematico è invece possibile esprimere la composizione della miscela in termini percentuali rispetto alla massa totale della miscela: percentuale di aggregati +

percentuale di legante = 100% (in massa). La densità massima della miscela bituminosa è data dalla seguente equazione:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{p_a}{\rho_a}\right) + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)} \quad (\text{Formula 7})$$

Dove:

- ρ_{mc} = densità massima teorica della miscela (g/cm³);
- P_a = percentuale di aggregato della miscela (% in massa);
- ρ_a = densità apparente dell'aggregato (g/cm³);
- P_b = percentuale di legante bituminoso nella miscela (% in massa);
- ρ_b = densità del legante a 25°C (g/cm³).

Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

	Bitumen (by mix) P_b (%)	Bitumen density ρ_b (g/cm ³)	Aggregate (by mix) P_a (%)	Aggregate density ρ_a (g/cm ³)	ρ_{mc} (g/cm ³)
PS	5,71	1,02	94,29	2,67	2,58
PM	4,93	1,02	95,07	2,65	2,57
LID	5,44	1,02	94,56	2,64	2,55
TR	5,79	1,02	94,21	2,62	2,53

Tabella 5: Densità massima (metodo matematico)

3.1.3 DENSITÀ DEGLI AGGREGATI

Le proprietà volumetriche degli aggregati sono state determinate mediante prova al picnometro secondo la norma EN 12697-6. La densità apparente di un provino bituminoso compatto viene determinata a partire dalla sua massa, ottenuta mediante pesatura del provino asciutto in aria, e dal suo volume, ottenuto dalla sua massa in aria e dalla sua massa in acqua. I risultati ottenuti dalla procedura SSD (Saturated Surface Dry) sono riportati in *Tabella 6*:

	M_1 (SSD) (g)	M_2 (pyk+sample+H ₂ O) (g)	M_3 (pyk+H ₂ O) (g)	ρ_w (g/cm ³)	ρ_{SSD} (g/cm ³)
PS	113,8	1601,7	1530,4	0,9982	2,67
PM	100,8	1593,3	1530,4	0,9982	2,65

LID	158,1	1628,7	1530,4	0,9982	2,64
TR	159,5	1629,1	1530,4	0,9982	2,62

Tabella 6: Calcolo della densità degli aggregati

Per il calcolo della densità apparente dei provini mediante il metodo SSD si è utilizzata la seguente formula:

$$\rho_{SSD} = \frac{M_1}{M_4 - M_2} \times \rho_w \quad (Formula\ 8)$$

Dove:

- ρ_{SSD} = densità apparente (g/cm³);
- M_1 = massa del provino asciutto (g);
- $M_4 = M_3 + M_1$ = massa del provino saturo con superficie asciugata (g);
- M_2 = massa del provino immerso in acqua (g);
- ρ_w = densità dell'acqua alla temperatura di prova (g/cm³).

3.2 CONFEZIONAMENTO PROVINI CILINDRICI E LASTRE

Per ciascuna miscela sono stati realizzati, presso il laboratorio dell'Università degli Studi di Padova, quattro provini cilindrici e due lastre.

I provini cilindrici sono stati compattati mediante compattatore giratorio in conformità con la Norma Europea UNI EN 12697-31: tale compattazione si ottiene combinando un'azione di taglio rotatoria e una forza risultante verticale applicata da una testa meccanica. Questa tecnica di compattazione risulta essere uno dei metodi attualmente più utilizzati in laboratorio, poiché capace di simulare i meccanismi di addensamento (traslazioni e rotazioni) che vengono generati dai mezzi di cantiere. Tale metodo viene utilizzato per:

- Determinare il contenuto di vuoti d'aria di una miscela per un determinato numero di giri oppure per ricavare una curva densità (o contenuto di vuoti) in funzione del numero di giri;
- La preparazione di provini aventi un'altezza definita e/o una densità prefissata, destinati a successive prove meccaniche.

La miscela bituminosa viene posta all'interno di uno stampo cilindrico (fustella), di dimensioni note, delimitato da inserti e inclinata rispetto alla verticale. La compattazione avviene mediante l'azione simultanea di una pressione normale, applicata per mezzo di un pistone a comando idraulico, e dell'azione di taglio derivante dalla rotazione della fustella stessa intorno all'asse verticale. Si genera così una superficie conica di rivoluzione avente vertice O e un angolo al vertice pari a 2ϕ (Figura 3), dove $\phi = 21,8$ mrad ($= 1,25^\circ$).

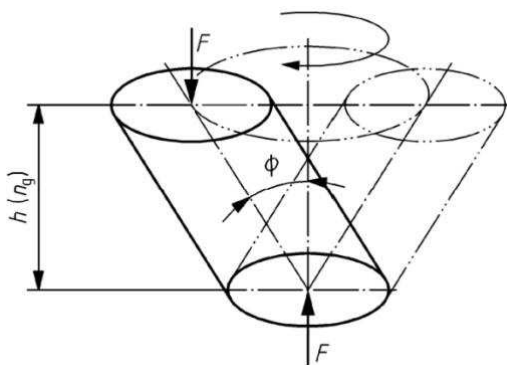


Figura 3: Diagramma di movimento del provino di prova (Fonte: UNI EN 12697-31)

Dove:

- F = forza risultante verticale;

- $h(n_g)$ = altezza del provino dopo un numero di rotazioni n_g ;
- φ = angolo.

La rotazione della fustella avviene per mezzo di un motore elettrico e di un idoneo sistema di cuscinetti accoppiati. Nella seguente prova di è adottato un valore di pressione di 600 kPa e una velocità di rotazione di 30 giri/min.

La massa della miscela da introdurre nello stampo è stata calcolata a partire dalla densità richiesta (definita nel capitolo precedente 3.1) e dal volume dei provini cilindrici secondo la *Formula 9*:

$$M = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h_{min} \cdot \rho_{M,7\%} \quad (Formula\ 9)$$

Dove:

- M = massa della miscela da introdurre nello stampo (g);
- D = diametro interno dello stampo (mm);
- h_{min} = altezza minima del provino compattato (mm);
- $\rho_{M,7\%}$ = densità massima della miscela (g/cm^3).

In considerazione delle prove sperimentali previste, nella presente sperimentazione si è deciso di produrre campioni cilindrici aventi 150 mm di diametro, altezza pari a 62 mm, aventi una percentuale di vuoti pari al 7% (prescrizioni previste per la prova standardizzata HT-IDT, che costituirà le successive fasi di analisi). Si riportano in *Tabella 7* i valori calcolati, per ciascuna miscela, della massa di progetto (il valore maggiorato del 10% è quanto effettivamente riscaldato per tenere conto di eventuali perdite di materiale nelle fasi operative precedenti alla compattazione).

	$\rho_{M,7\%} (g/cm^3)$	$M (g)$	$M_{+10\%} (g)$
PS	2,333	2557	2812
PM	2,641	2894	3183
LID	2,315	2536	2790
TR	2,316	2537	2791

Tabella 7: Valori calcolati di M

Per prima cosa le masse $M_{+10\%}$ delle diverse miscele sono state poste in forno per un tempo minimo di 3h, rispettivamente alle temperature di:

- $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per la miscela PS;
- $170^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per le miscele PM, LID e TR.

Le fustelle invece sono state riscaldate, alle stesse temperature, per un tempo pari a 30 minuti.

In *Figura 4* e *5* una foto del compattatore giratorio utilizzato e di un provino ottenuto a seguito della prova.



Figura 4: Compattatore giratorio presente presso il laboratorio dell'Università di Padova



Figura 5: Esempio provino ottenuto con il compattatore giratorio

La prova effettiva di compattazione dei provini cilindrici è stata preceduta da un primo tentativo di compattazione a giri imposti (300 giri) utilizzando gli stessi valori di M definiti in *Tabella 7*. Ciò al fine di eseguire uno screening iniziale delle capacità di compattazione delle miscele oggetto di studio. Nel grafico sottostante (*Figura 6*) è possibile osservare la curva di addensamento ottenuta per le quattro miscele compattate a 300 giri. Tale curva è espressa in funzione del grado di compattazione C:

$$C(n) = 100 - V(n) \quad (\text{Formula 10})$$

Dove $V(n)$ rappresenta la percentuale dei vuoti.

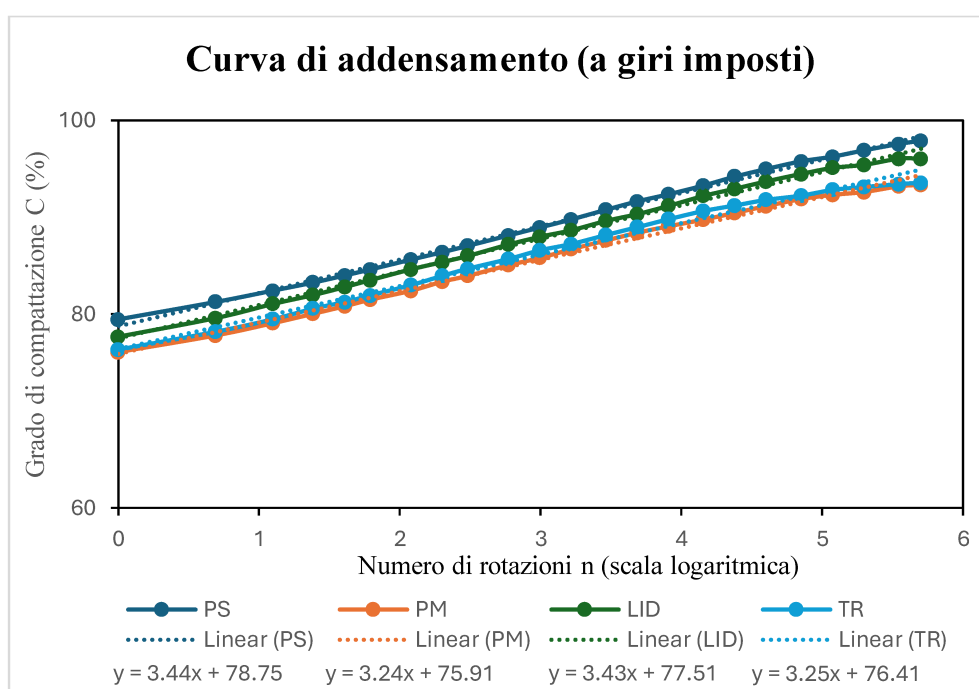


Figura 6: Variazione della percentuale di vuoti in funzione del numero di giri

In *Figura 6* sono inoltre riportate le funzioni lineari delle linee di tendenza di ciascuna miscela: il coefficiente angolare rappresenta la lavorabilità k , ovvero l'attitudine di una miscela bituminosa ad essere messa in opera al fine di raggiungere un prefinito livello di addensamento. Al crescere o al diminuire di tale parametro viene associato un corrispondente aumento o decremento del gradiente di addensamento e dunque il raggiungimento, più o meno velocemente, del livello di compattazione prefinito.

La percentuale di vuoti dopo un determinato numero di giri n_g è stata calcolata come:

$$V(n_g)\% = 100 \left[\frac{\rho_{max} - \rho(n_g)}{\rho_{max}} \right] \quad (\text{Formula 11})$$

Dove:

- $V(n_g)$ = contenuto di vuoti dopo un numero di giri n_g (%);

- ρ_{max} = densità massima della miscela (g/cm^3);
- $\rho(n_g)$ = densità dopo n_g , calcolata come il rapporto tra la massa del campione e il volume del provino.

Da una prima analisi, nonostante la singola ripetizione (impossibilità di valutare la ripetibilità), si è ritenuto che le curve di compattazione fossero tutte abbastanza simili: non risultano evidenti sensibili differenze dovute alla tipologia di miscela (PS: tradizionale; PM, LID, TR: modificate).

Per le successive compattazioni, si è quindi proceduto impostando la procedura ad altezza imposta per l'ottenimento del target sopracitato (d: 150 mm, h: 62 mm, v: 7%). In *Figura 7, 8, 9 e 10* si riportano le curve di addensamento ottenute per ciascun provino realizzato e i relativi valori di lavorabilità ottenuti.

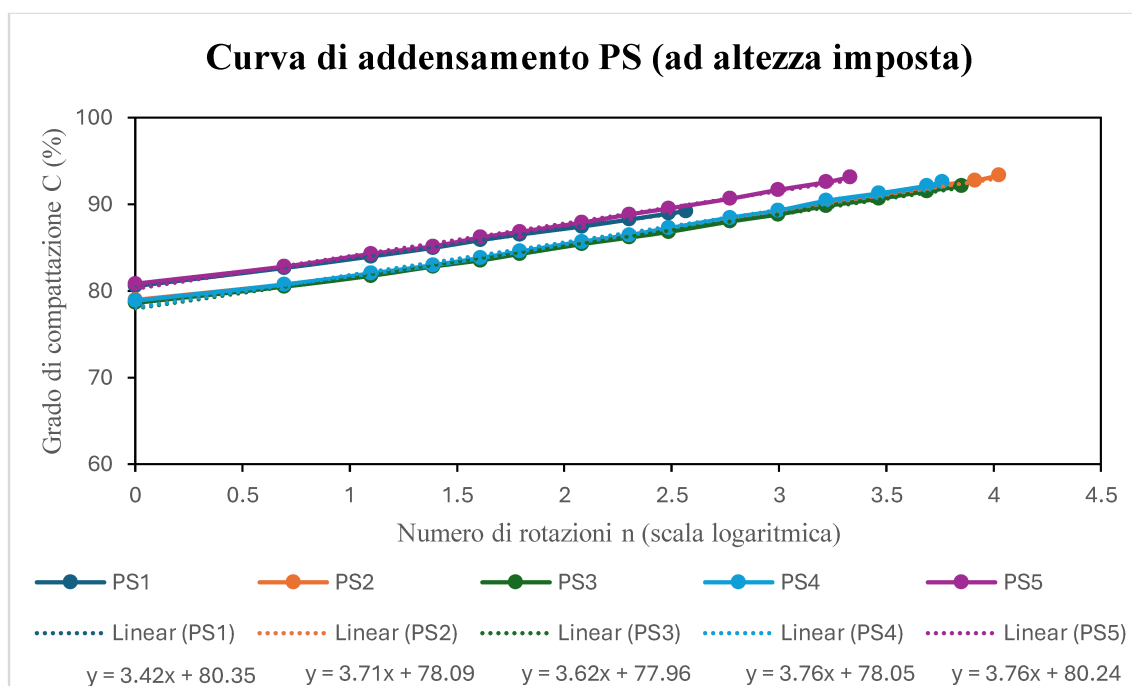


Figura 7: Curva di addensamento PS

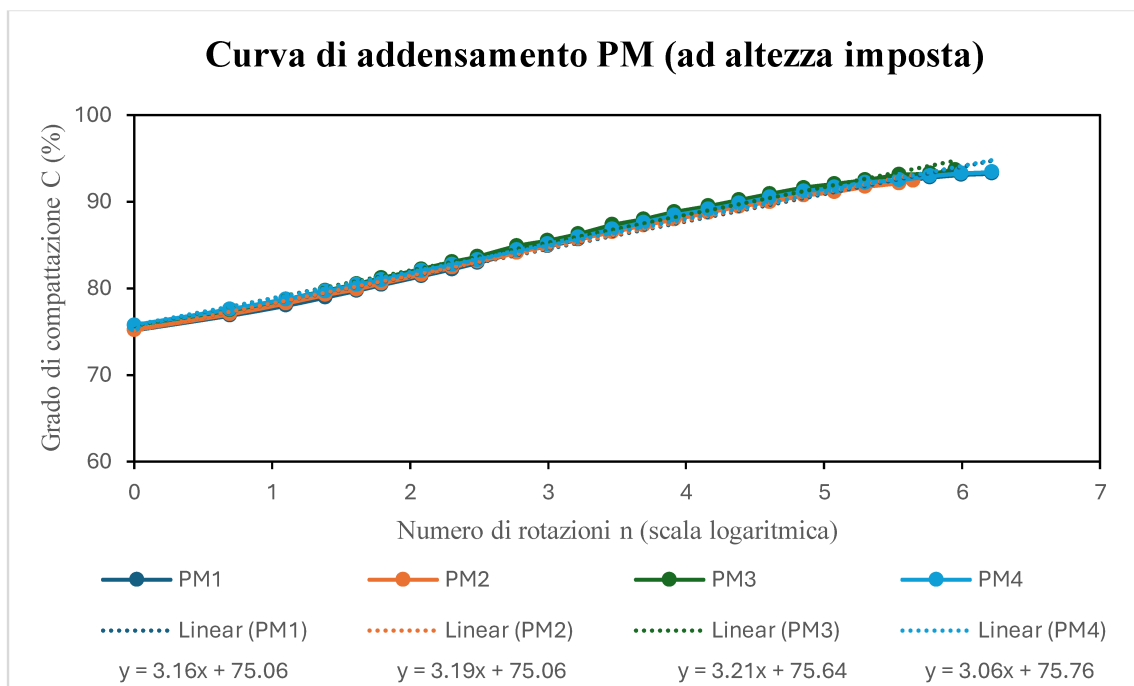


Figura 8: Curva di addensamento PM

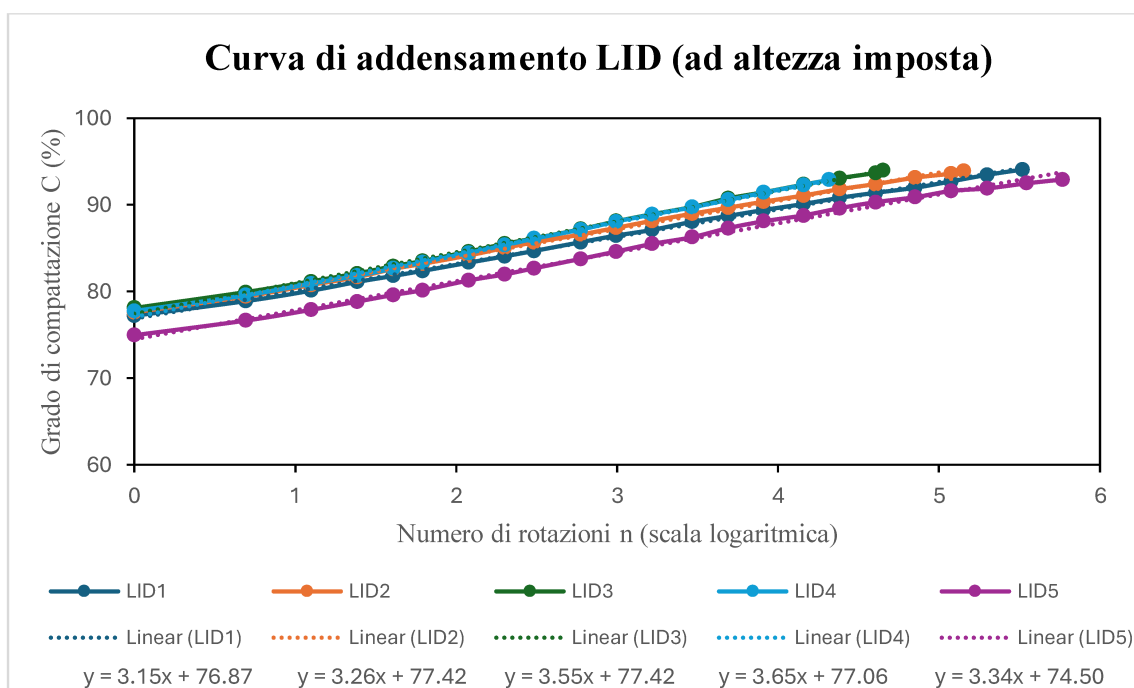


Figura 9: Curva di addensamento LID

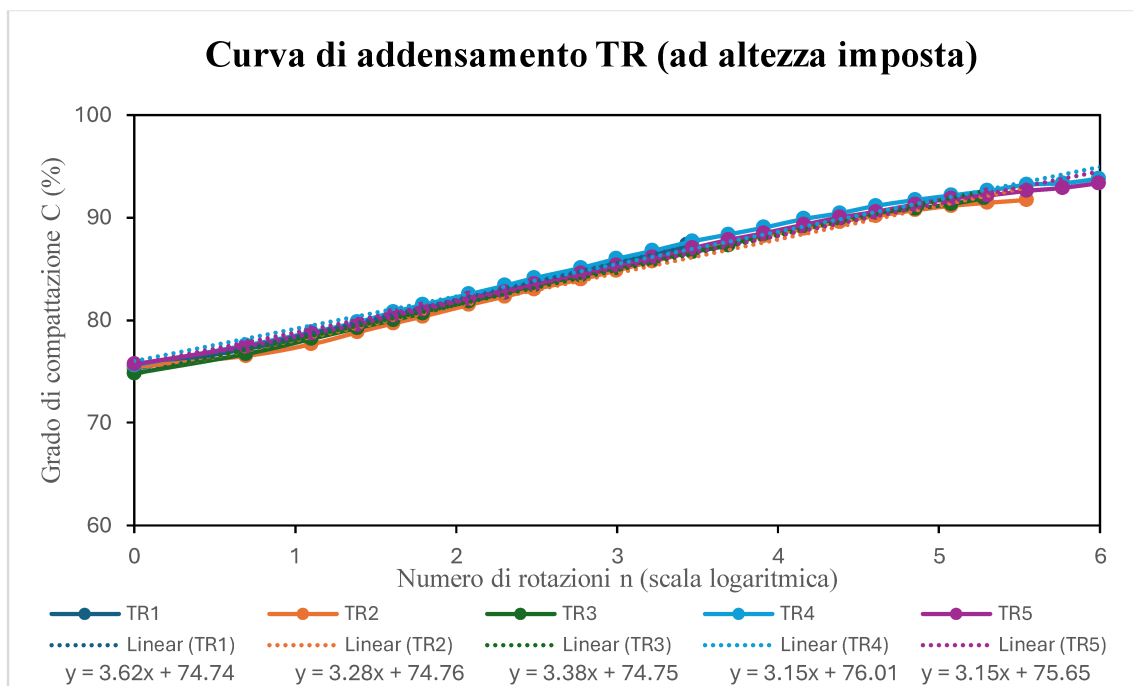


Figura 10: Curva di addensamento TR

A seguito della compattazione, ciascun provino è stato pesato, ne è stata misurata l'altezza con il calibro (ottenuta come la media dell'altezza misurata in quattro diversi punti) e sono quindi state calcolate la densità effettiva e la percentuale di vuoti. In *Tabella 8* si riportano i valori ottenuti.

	Peso (g)	h (mm)	Vol (cm ³)	D (g/cm ³)	D _{max} (g/cm ³)	Vuoti (%)
PS1	2553,9	64,3	1136	2,248	2,52	10,8%
PS2	2556,0	61,5	1086	2,354	2,52	6,6%
PS3	2559,0	62,4	1103	2,321	2,52	7,9%
PS4	2560,0	62,1	1097	2,334	2,52	7,4%
PS5	2559,0	61,7	1091	2,346	2,52	6,9%
PM1	2896,1	61,9	1094	2,648	2,84	6,8%
PM2	2894,7	62,4	1103	2,625	2,84	7,6%
PM3	2896,0	61,6	1089	2,660	2,84	6,3%
PM4	2896,5	61,8	1092	2,653	2,84	6,6%
LID1	2537,6	61,3	1083	2,343	2,49	5,9%

LID2	2537,1	61,4	1085	2,338	2,49	6,1%
LID3	2539,5	61,4	1085	2,340	2,49	6,0%
LID4	2538,5	62,1	1098	2,313	2,49	7,1%
LID5	2539,5	61,7	1089	2,331	2,49	6,4%
TR1	2516,9	65,5	1158	2,174	2,49	12,7%
TR2	2538,7	62,9	1112	2,284	2,49	8,3%
TR3	2531,5	62,6	1106	2,289	2,49	8,1%
TR4	2538,5	61,1	1079	2,353	2,49	5,5%
TR5	2538,5	61,8	1093	2,323	2,49	6,7%

Tabella 8: Calcolo dei vuoti effettivi

Per il confezionamento delle lastre si è utilizzato un compattatore a rullo conforme alla norma UNI-EN 12697-33 (*Figura 11*). Tale dispositivo permette di realizzare lastre rettangoli di spessore predefinito, riproducendo l'azione dinamica dei rulli: la miscela bituminosa viene compattata in uno stampo mediante un carico applicato da un rullo liscio in acciaio che effettua dei passaggi a velocità costante; il tavolo su cui viene collocato lo stampo si muove avanti e indietro sotto il rullo rotante.



Figura 11: Compattatore a rullo presente presso il laboratorio dell'Università di Padova

La massa della miscela da introdurre nello stampo è stata calcolata come:

$$M = L \cdot l \cdot s \cdot \rho_{m,7\%} \quad (\text{Formula 12})$$

Dove:

- M = massa della lastra (g);
- L = lunghezza interna dello stampo (= 400 mm);
- l = larghezza interna dello stampo (= 300 mm);
- s = spessore finale della lastra (= 30 mm);
- $\rho_{m,7\%}$ = densità della miscela bituminosa calcolata per un contenuto di vuoti pari al 7% (nel caso della miscela PS pari al 4%). In particolare, le densità e il conseguente numero di vuoti, in questa fase sono state calibrate sulla base delle curve di compattazione dei conglomerati (prove preliminari a 300 giri con pressa giratoria), allineandosi alle presunte proprietà volumetriche ottenibili ai 100 giri, in accordo con quanto comunemente eseguito per la realizzazione delle lastre (secondo standard di riferimento).

Si riportano in *Tabella 9* i valori calcolati, per ciascuna miscela, della massa da inserire nello stampo e il valore della massa che invece è stato riscaldato (valore di M maggiorato del 10%).

	$\rho_{M,7\%} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$M \text{ (g)}$	$M_{+10\%} \text{ (g)}$
PS	2,409	8671	9538
PM	2,641	9508	10459
LID	2,315	8333	9166
TR	2,316	8337	9170

Tabella 9: Valori calcolati di M

Una volta riscaldate le masse, rispettivamente a una temperatura di 150°C, per la miscela PS, e di 170°C, per le miscele PM/LID/TR, e averle poste negli stampi, si è eseguita una compattazione con carichi variabili da 3 a 27 kN fino al raggiungimento dell'altezza richiesta per le lastre (30 mm).

Allo stesso modo di quanto fatto per i provini, si sono poi misurate le altezze delle lastre (ottenute dalla media di quattro misurazioni per lastra) e il rispettivo peso, in modo da

poter definire la densità e la percentuale di vuoti effettivi. In *Tabella 10* si riportano i valori calcolati:

	Peso (g)	h (mm)	Vol (cm ³)	D (g/cm ³)	D _{max} (g/cm ³)	Vuoti (%)
PS1	8619,5	31,0	3715	2,320	2,52	7,9%
PS2	8635,5	30,4	3644	2,370	2,52	6,0%
PM1	9471,0	31,2	3741	2,532	2,84	10,8%
LID1	8245,5	31,1	3733	2,209	2,49	11,3%
LID2	8215,5	30,9	3704	2,218	2,49	10,9%
TR1	8261,0	30,9	3711	2,226	2,49	10,6%
TR2	8302,5	30,2	3630	2,287	2,49	8,1%

Tabella 10: Calcolo dei vuoti effettivi

3.3 PROVA IDEAL-RT

Nella norma ASTM D8360-22 viene descritto il metodo di prova standard per la determinazione dell'Indici di tolleranza all'ormaiamento, RT_{Index} (Rutting Tolerance Index), delle miscele bituminose mediante Ideal Rutting Test. Tale prova viene eseguita applicando un carico di compressione monotono lungo un piano diametrico verticale di un provino cilindrico posizionato al centro dell'apparecchiatura di prova. Il carico viene applicato in modo da ottenere e mantenere per tutta la durata della prova una velocità media costante di spostamento lungo la linea di carico. Durante la prova vengono misurati sia il carico applicato che lo spostamento: i dati ottenuti vengono utilizzati per il calcolo del RT_{Index} , che può essere utilizzato durante la progettazione della miscela o il controllo qualità per individuare miscele suscettibili all'ormaiamento.

L'apparecchiatura IRT comprende (Figura 12):

- Dispositivo di carico assiale;
- Cella di carico;
- Listello superiore di carico;
- Base inferiore di supporto;
- Dispositivo di misura della deformazione;
- Sistema di acquisizione dati.

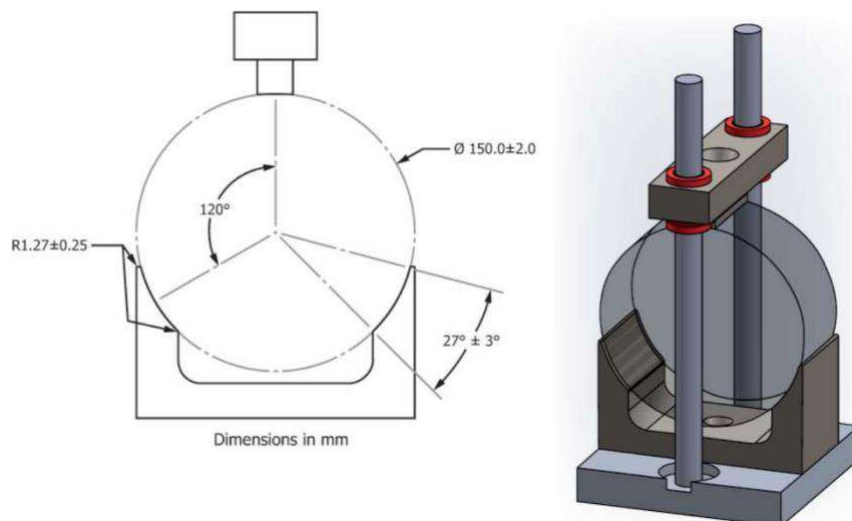


Figura 12: Apparecchiatura prova IDEAL-RT

La resistenza al taglio viene calcolata a partire dal carico massimo misurato mediante la seguente relazione:

$$\tau_f = 0,356 \times \frac{P_{max}}{t \times w} \quad (Formula\ 13)$$

Dove:

- τ_f = resistenza al taglio (MPa);
- $P_{\max}$ = carico massimo applicato (N);
- t = spessore del provino (m);
- w = larghezza del listello superiore di carico (=0,0191 m).

L'Indice di tolleranza all'ormaiamento viene calcolato mediante:

$$RT_{Index} = 6,618 \times 10^{-5} \times \frac{\tau_f}{1 Pa} \quad (Formula\ 14)$$

Dove:

- RT_{Index} = indice di tolleranza all'ormaiamento;
- τ_f = resistenza al taglio (MPa);

È inoltre possibile stimare l'indice RT_{Index} riferito al 7% dei vuoti:

$$RT_{Index,7\%} = 0,446e^{0,1186AV} \times RT_{Index} \quad (Formula\ 15)$$

Dove:

- $RT_{Index,7\%}$ = indice di tolleranza all'ormaiamento corretto al 7% di vuoti;
- RT_{Index} = indice calcolato con la *Formula 14*;
- AV = contenuto di vuoti d'aria del provino (%).

In generale è possibile affermare che valori più elevati di RT_{Index} indicano una maggiore capacità della miscela di resistere alle deformazioni permanenti, mentre valori più bassi indicano una maggiore suscettibilità alla formazione di ormaie.

Si riportano in *Tabella 11* i valori ottenuti a seguito della prova, effettuata sui campioni compattati al 7% (diametro di 150 mm, altezza di 62 mm), e gli indici calcolati per ciascun provino cilindrico realizzato per le quattro miscele PS, PM, LID e TR; mentre nelle *Figure 13, 14, 15 e 16* vengono rappresentate le corrispettive curve carico-spostamento.

Provino	Spessore t (mm)	Carico $P_{\max}$ (kN)	τ_f (Pa)	RT_{Index}	Spostamento (mm)	Vuoti AV (%)	$RT_{Index,7\%}$
PS_1	62,61	6,309	187813,8	124,3	15,094	8	143,2
PS_2	62,85	4,404	1306150,5	86,4	6,254	8,5	105,6
PS_6	62,65	5,126	1525015,1	100,9	5,749	8,2	119,0
PS_7	62,47	5,631	1680217,2	111,2	5,353	7,8	125,1
PM_1	62,51	12,125	3615337,8	239,3	3,858	7,8	269,1
PM_4	62,56	12,078	3598445,4	238,1	4,912	8	274,3
PM_5	63,545	15,496	4545219,4	-	3,513	5,4	-
PM_6	62,34	14,199	4245292,2	281,0	4,339	7,5	305,0
LID_1	62,625	11,741	3494411,0	231,3	4,587	7,9	263,2
LID_2	62,59	10,58	3150629,6	208,5	4,747	7,9	237,3

LID_7	62,29	12,737	3811232,5	252,2	3,674	7,4	270,6
LID_8	62,14	11,911	3572675,8	236,4	4,128	7,3	250,6
TR_2	62,465	9,27	2766047,4	183,1	4,471	7,5	198,7
TR_3	62,33	9,386	2806726,2	185,7	4,634	7,5	201,6
TR_6	62,42	9,725	2903905,5	192,2	5,128	7,7	213,6
TR_7	62,62	10,498	3124713,0	206,8	4,646	7,9	235,4

Tabella 11: Risultati prova IDEAL-RT (Perugia)

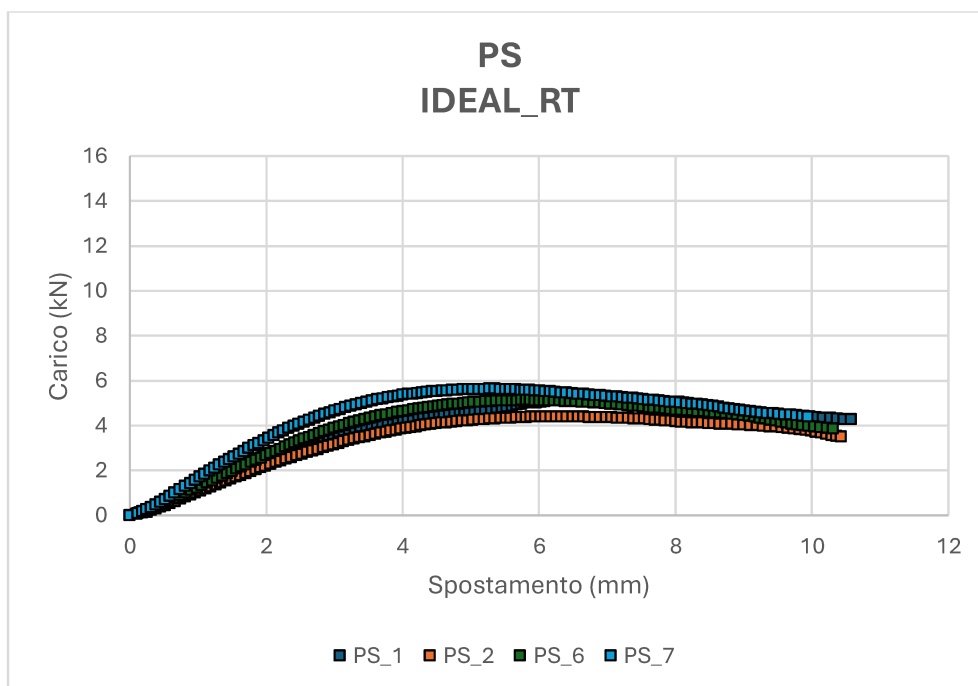


Figura 13: Curva carico-spostamento provini miscela PS

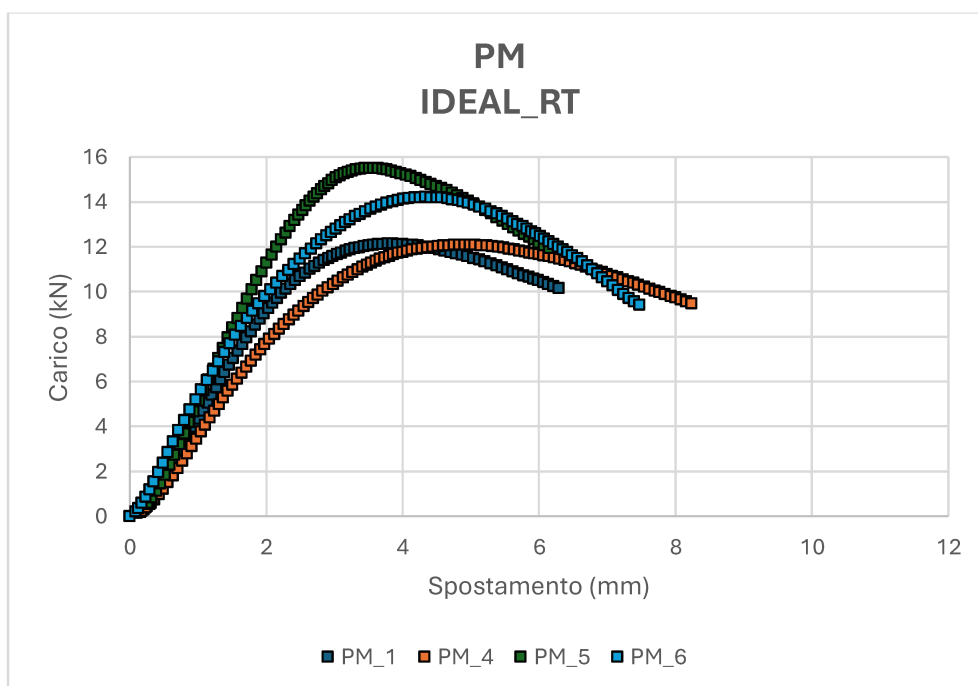


Figura 14: Curva carico-spostamento provini miscela PM

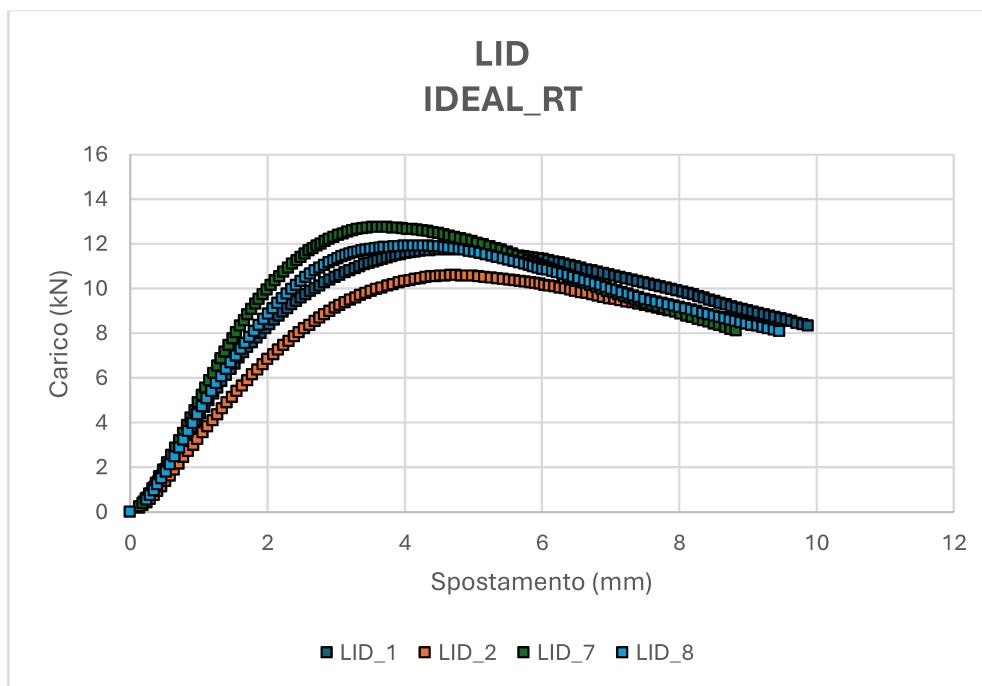


Figura 15: Curva carico-spostamento provini miscela LID

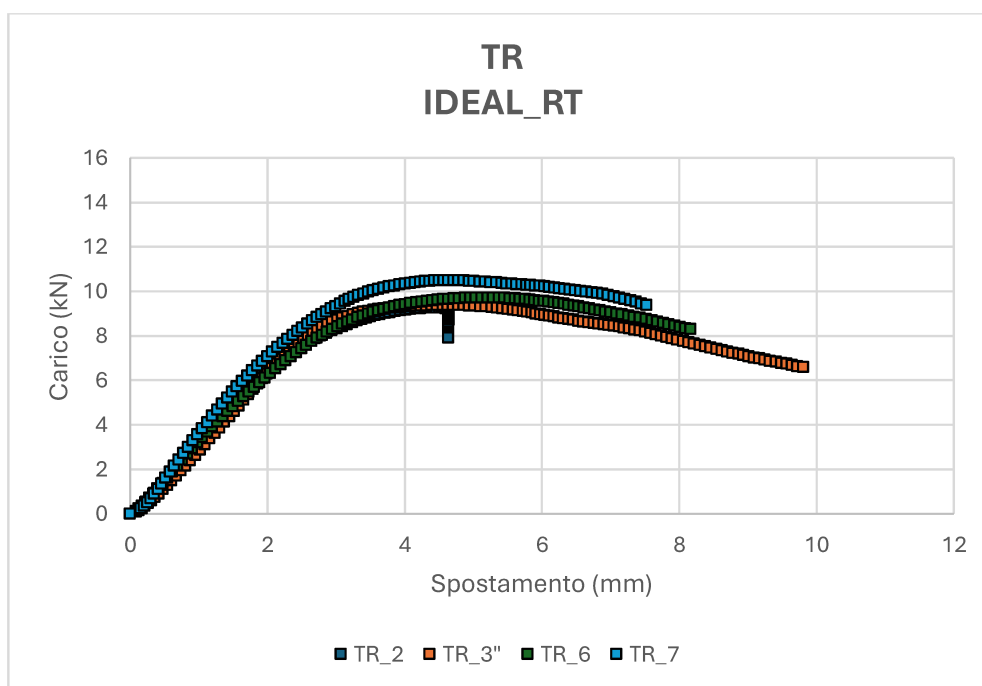


Figura 16: Curva carico-spostamento provini miscela TR

Dai risultati ottenuti è possibile osservare che per la miscela tradizionale PS si sono ottenuti valori della resistenza al taglio, e di conseguenza dei due parametri RT_{index} e $RT_{index,7\%}$, più bassi rispetto a quelli osservati per le tre miscele modificate, come atteso. Per le miscele PM e LID si sono ottenuti valori di tali parametri molto simili, mentre per la miscela TR valori più bassi, ma comunque superiori rispetto alla miscela tradizionale.

In *Tabella 12* si riportano invece i valori degli indici ottenuti dall'Università di Belgrado.

Provino	RT_{Index}	RT_{Index,7%}	Vuoti AV (%)
1-1	99,5	93,8	6
1-3	93,8	80,3	5,5
1-5	96,8	88	6
1-7	91,4	80,1	5,7
2-4	128,2	115,1	5,9
2-5	114,5	99,2	5,6
2-6	86,6	88,6	7
2-7	98,2	91,4	6,2
3-1	76,9	69,9	6
3-2	76,8	66,5	5,6
3-3	76,8	69,8	6
3-4	77,1	71,7	6,2
4-5	86,8	86,8	6,8
4-6	89,1	85,9	6,5
4-7	83,3	81,3	6,6
4-8	87	85,9	6,7
5-1	97,8	103,7	7,3
5-5	99,3	107,8	7,5
5-6	84,5	98,4	8,1
5-7	113,6	120,5	7,3
6-3	152,5	140,2	6,1
6-4	151,8	146,4	6,5
6-7	120,2	115,9	6,5
6-8	129,1	121,5	6,3
7-4	191,1	197,8	7,1
7-6	166,1	189,1	7,9
7-8	196,2	213	7,5
8-1	99,7	82,4	5,2
8-2	91,3	76,3	5,3
8-5	109,1	90,1	5,2
8-8	106,1	87,7	5,2
9-2	78,6	70,6	5,9
9-4	77,6	72,2	6,2
9-6	75,3	69,2	6,1
9-8	84,9	77,1	6
10-1	59,3	60,7	7
10-2	62	64,9	7,2
10-4	68,3	71,6	7,2
10-5	59,1	60,5	7
11-2	62,7	61,2	6,6
11-4	66,8	65,1	6,6
11-6	70	69,1	6,7
11-8	68,1	68,8	6,9

12-1	83,5	88,5	7,3
12-2	78,2	80	7
12-5	79,5	82,3	7,1
12-6	79,6	80,5	6,9

Tabella 12: Valori indici miscele di Belgrado

I valori di resistenza al taglio ottenuti mediante la prova IDEAL-RT, per tutte le miscele analizzate superiori al valore di soglia minimo di $\tau_f = 0,85$ MPa, valore raccomandato da Zhou et al. (2020) come criterio di accettazione basato sulla correlazione tra profondità dell'ormaia misurata con l'APA e la resistenza al taglio IDEAL-RT.

Si osserva che i valori ottenuti per il parametro RT_{index} risultano essere superiori rispetto a quelli presentati nello studio di G. Vamsikrishna e D. Singh (2023, ASCE), in cui i valori di RT_{index} delle miscele trattate variano tra 43 e 123, oppure a quelli presentati nel report successivo, sempre di G. Vamsikrishna e D. Singh (2023, T&F), dove variano da 41 a 165. Si ricorda che un valore più elevato di RT_{index} indica una maggiore resistenza al rutting delle miscele asfaltiche.

3.4 PROVA HT-IDT

La prova HT-IDT è un metodo di prova standard utilizzato per determinare la resistenza a trazione indiretta (IDT) delle miscele bituminose. Tale parametro viene determinato caricando un provino cilindrico lungo il suo piano diametrale verticale a una velocità di deformazione e a una temperatura di prova specificate. Il carico massimo al momento della rottura viene registrato e utilizzato per calcolare la resistenza IDT del provino.

I valori della resistenza IDT possono essere utilizzati per valutare la qualità delle miscele analizzate in combinazione con le prove di progettazione della miscela al fine di stimare il potenziale di:

- Formazione di ormaie (rutting);
- Fessurazione (cracking).

L'apparecchiatura necessaria per eseguire la seguente prova consiste in (*Figura 17 e 18*):

- Dispositivo di carico, capace di applicare un carico di compressione a velocità di deformazione controllata misurando contemporaneamente carico e deformazione;
- Listello di carico, di larghezza pari a $19,05 \pm 0,3$ mm (nel caso di provini con diametro di 150 mm): il listello inferiore deve essere fissato a una base dotata di due aste guida verticali perpendicolari, il listello superiore deve invece poter scorrere liberamente lungo le guide;



Figura 17: Apparecchiatura prova HT-IDT



Figura 18: Centralina utilizzata per la prova

La prova è stata eseguita sui provini cilindrici compattati al 7%, aventi diametro pari a 150 mm e un'altezza di 62 mm. La temperatura standard più comunemente utilizzata a cui portare il provino prima della prova IDT è di 25°C, tuttavia nella seguente sperimentazione i provini sono stati lasciati all'interno di una camera climatica ad una temperatura di 50°C per un periodo di almeno 3 ore. Successivamente il provino è stato posizionato sul listello di carico inferiore, si è abbassato il listello superiore fino a stabilire un contatto con il provino, verificando che i listelli fossero paralleli e centrati sul piano diametrale verticale. Si è poi avviata la prova applicando un carico di compressione verticale crescente fino al raggiungimento del carico massimo. La prova consiste nell'imporre una velocità di avanzamento del piatto (velocità di deformazione) pari a 50,8 mm/min, il che equivale ad imporre una forza di trazione indiretta con velocità prestabilita.

La resistenza a trazione indiretta (IDT) viene calcolata mediante la seguente formula:

$$IDT = \frac{2000 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (Formula\ 16)$$

Dove:

- IDT = resistenza a trazione indiretta (MPa);
- P = carico massimo applicato al momento della rottura (kN);
- t = altezza del provino immediatamente prima della prova (mm);
- D = diametro del provino (mm).

La *Formula 16* rappresenta la tensione di trazione massima sviluppata lungo il piano diametrale verticale del provino durante la prova di compressione indiretta.

Durante tutta la prova vengono misurati quindi sia il carico applicato che lo spostamento lungo la linea di carico LLD (Load-Line Displacement). Si è imposto un limite di corsa pari a 90,0 mm.

I dati acquisiti vengono inoltre utilizzati per il calcolo del CT_{Index} , ottenuto utilizzando l'energia di rottura, la pendenza post-picco della curva carico-spostamento e la tolleranza alla deformazione corrispondente al 75% del carico massimo.

Il CT_{Index} rappresenta un indicatore prestazionale della resistenza alla fessurazione delle miscele bituminose. In generale valori elevati di CT_{Index} indicano maggiore resistenza alla fessurazione e di conseguenza è possibile prevedere una minore quantità di fessure in esercizio, viceversa, valori bassi indicano una maggiore suscettibilità alla formazione e propagazione delle fessure.

Il lavoro di rottura (W_f) viene calcolato come l'area sottesa dalla curva carico-spostamento (*Figura 19*) utilizzando la regola dei trapezi secondo la *Formula 17*:

$$W_f = \sum_{i=1}^{n-1} \left[(l_{i+1} - l_i) P_i + \frac{1}{2} (l_{i+1} - l_i) (P_{i+1} - P_i) \right] \quad (Formula 17)$$

Dove:

- W_f = lavoro di rottura (J);
- P_i = carico applicato (kN) al passo i ;
- P_{i+1} = carico applicato (kN) al passo $i+1$;
- l_i = spostamento LLD (mm) al passo i ;
- l_{i+1} = spostamento LLD (mm) al passo $i+1$.

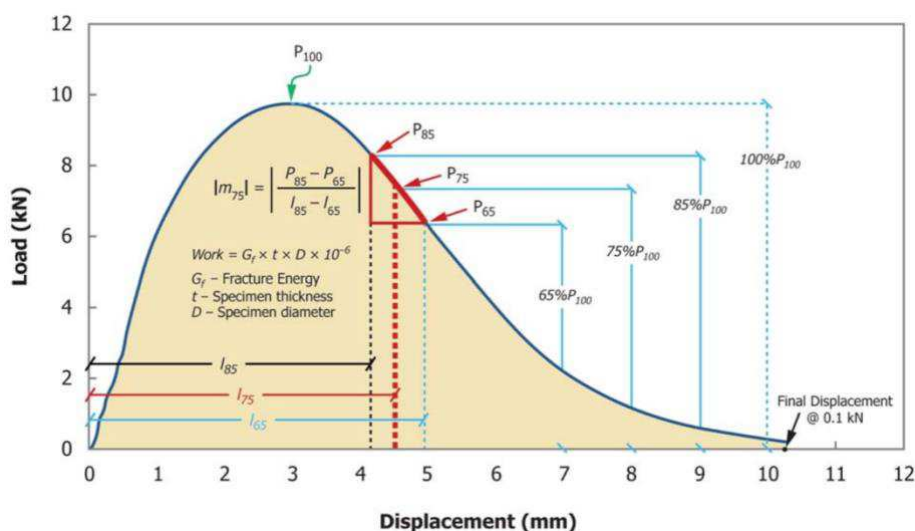


Figura 19: Curva Carico-Spostamento. Fonte: ASTM D8225-19

L'energia di rottura (G_f) viene calcolata dividendo il lavoro di rottura per l'area della sezione resistente del provino, ottenuta dal prodotto tra diametro e spessore:

$$G_f = \frac{W_f}{D \cdot t} \times 10^6 \quad (Formula 18)$$

Dove:

- G_f = energia di rottura (J/m^2);
- W_f = lavoro di rottura (J);
- D = diametro del provino (mm);
- t = spessore del provino (mm).

L'energia di rottura rappresenta l'energia necessaria per produrre la frattura del provino per unità di superficie resistente. Valori elevati di tale parametro corrispondono a una maggiore resistenza alla fessurazione. Si riporta in *Figura 20* un esempio di un provino fessurato a seguito della prova.



Figura 20: Provino a seguito della prova HT-IDT

La pendenza post-picco ($|m_{75}|$) è la pendenza della tangente alla curva carico-spostamento nella zona corrispondente al 75% del carico massimo, sul ramo discendente della curva dopo il picco: essa descrive la velocità con cui il materiale perde capacità portante dopo l'innesco della frattura. Generalmente, all'aumentare della rigidità della miscela aumenta anche la velocità di propagazione della fessura, determinando una più rapida riduzione del carico e un incremento del parametro $|m_{75}|$: ciò comporta una diminuzione della resistenza a fessurazione. Si definisce, invece, lo spostamento l_{75} come il valore dello spostamento misurato sul ramo discendente della curva quando il carico si riduce al 75% del carico massimo registrato.

L'indice di tolleranza alla fessurazione (CT_{Index}) viene calcolato utilizzando i parametri ottenuti dalla curva carico-spostamento secondo la seguente relazione:

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \cdot \frac{l_{75}}{D} \cdot \frac{G_f}{|m_{75}|} \cdot 10^6 \quad (Formula\ 19)$$

Dove:

- CT_{Index} = indice di tolleranza alla fessurazione;
- G_f = energia di rottura (J/m²);
- $|m_{75}|$ = valore assoluto della pendenza post-picco (N/m);
- l_{75} = spostamento corrispondente al 75% del carico massimo sul ramo discendente (mm);
- D = diametro del provino (mm);
- t = spessore del provino (mm).

Il rapporto l_{75}/D è definito come la tolleranza alla deformazione e rappresenta la capacità della miscela di deformarsi sotto carico. Una miscela caratterizzata da valori di tale rapporto elevati, presenta una maggiore capacità deformativa e, di conseguenza, una migliore resistenza alla fessurazione rispetto a una miscela con valori inferiori.

Il parametro CT_{Index} , quindi, combina tre aspetti fondamentali del comportamento a frattura:

1. Energia assorbita prima della rottura (G_f);
2. Capacità di deformarsi dopo il picco di carico (l_{75});
3. Velocità di degradazione della resistenza dopo la rottura (m_{75}).

Per questo motivo tale indicatore è considerato un indice prestazionale efficace per confrontare la durabilità a fessurazione di differenti miscele asfaltiche.

Per calcolare il valore di tale indice per i diversi provini si è utilizzata la seguente formula semplificata, derivata dalla norma europea di riferimento per la determinazione della resistenza a trazione indiretta dei conglomerati:

$$CT_{Index} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{D \cdot IDT}{l} \quad (\text{Formula 20})$$

La seguente prova è stata eseguita presso tutte e tre le Università: le Università degli Studi di Padova e Perugia hanno effettuato la prova sulle quattro miscele PS, PM, LID e TR, mentre l'Università di Belgrado ha trattato le altre 12 miscele. Si riportano in *Tabella 13* e *14* i risultati ottenuti, mentre in *Tabella 15* i valori calcolati degli indici HT-IDT e CT_{Index} solo per i provini considerati a seguito della pulizia dei dati.

Provino	Spessore t (mm)	Carico di picco P (kN)	Spostamento l (mm)
PS_1	64,3	2,722	3,703
PS_2	61,5	3,149	3,342
PS_3	62,4	3,002	3,602
PS_4	62,1	2,920	3,483

PS_5	61,7	3,347	3,610
PS_6	62,67	3,405	3,419
PS_7	62,795	3,187	4,061
PS_8	62,465	4,036	3,875
PS_9	62,39	2,600	3,752
PM_1	61,9	6,301	3,255
PM_2	62,4	6,711	3,508
PM_3	61,6	6,358	3,571
PM_4	61,8	6,353	3,361
PM_5	62,88	10,088	2,450
PM_6	62,5	9,773	2,209
LID_1	61,3	9,476	2,954
LID_2	61,4	9,328	3,356
LID_3	61,4	9,325	3,017
LID_4	62,1	8,936	3,198
LID_5	61,7	10,005	2,590
LID_6	62,63	8,041	2,781
LID_7	62,63	7,806	3,112
LID_8	62,315	7,856	2,534
LID_9	62,36	8,397	2,589
TR_1	65,5	6,582	3,136
TR_2	62,9	9,354	3,508
TR_3	62,6	8,656	3,281
TR_4	61,1	9,358	3,148
TR_5	61,8	10,776	2,813
TR_6	62,45	7,174	2,777
TR_7	62,735	7,638	3,296
TR_8	62,415	7,994	2,724
TR_9	62,475	8,855	2,658

Tabella 13: Risultati prova HT-IDT (Padova e Perugia)

Provino	Spessore t (mm)	Carico di picco P (kN)	Spostamento l (mm)
1_2	62	3,710	3,730
1_4	62	3,479	3,004
1_6	62	3,532	3,059
1_8	62	3,425	3,107
2_1	62	4,213	2,536
2_2	62	3,912	3,583
2_3	62	3,705	2,877
2_8	62	3,405	4,017
3_5	62	2,640	3,803
3_6	62	2,439	4,111
3_7	62	2,496	3,961
3_8	62	2,558	3,907
4_1	62	3,008	4,423
4_2	62	2,635	4,557
4_3	62	2,777	4,697

4_4	62	2,937	3,901
5_2	62	3,394	3,659
5_3	62	3,731	4,263
5_4	62	3,802	5,388
5_8	62	4,396	3,840
6_1	62	5,001	3,578
6_2	62	4,803	4,542
6_5	62	4,372	3,183
6_6	62	4,174	5,042
7_1	62	6,145	4,342
7_2	62	6,478	3,524
7_5	62	5,729	4,033
7_7	62	4,389	5,370
8_3	62	3,765	5,333
8_4	62	4,032	2,824
8_6	62	3,925	2,807
8_7	62	3,983	4,609
9_1	62	3,005	2,698
9_3	62	2,885	2,472
9_5	62	2,951	2,731
9_7	62	2,985	3,213
10_3	62	1,962	4,018
10_6	62	2,126	3,709
10_7	62	1,984	3,884
10_8	62	2,153	3,326
11_1	62	2,312	2,649
11_3	62	2,332	2,950
11_5	62	2,368	3,483
11_7	62	2,427	2,881
12_3	62	2,700	4,165
12_4	62	3,026	3,759
12_7	62	3,153	3,526
12_8	62	3,262	3,602

Tabella 14: Risultati prova HT-IDT (Belgrado)

Provino	IDT (MPa)	CT _{Index}
PS_2	0,217	15,321
PS_3	0,204	13,356
PS_4	0,200	13,500
PS_5	0,230	15,027
PS_6	0,231	15,891
PS_7	0,215	12,498
PM_1	0,432	31,273
PM_2	0,456	30,658
PM_3	0,438	28,903
PM_4	0,436	30,586
LID_6	0,545	46,166

LID_7	0,529	40,050
LID_8	0,535	49,751
LID_9	0,571	52,010
TR_3	0,587	42,144
TR_7	0,517	36,939
TR_8	0,544	47,018
TR_9	0,602	53,325
1_2	0,254	16,043
1_4	0,238	18,679
1_6	0,242	18,623
1_8	0,234	17,780
2_1	0,288	26,795
2_2	0,268	17,610
2_3	0,254	20,771
3_5	0,181	11,197
3_6	0,167	9,569
3_7	0,171	10,164
3_8	0,175	10,560
4_1	0,206	10,969
4_2	0,180	9,326
4_3	0,190	9,536
4_4	0,201	12,143
5_2	0,232	14,961
5_3	0,255	14,116
5_4	0,260	11,381
6_1	0,342	22,544
6_2	0,329	17,056
6_5	0,299	22,154
7_1	0,421	22,827
7_2	0,443	29,649
7_5	0,392	22,912
8_3	0,258	11,387
8_4	0,276	23,028
8_6	0,269	22,553
8_7	0,273	13,938
9_1	0,206	17,964
9_3	0,197	18,824
9_5	0,202	17,428
9_7	0,204	14,984
10_3	0,134	7,876
10_6	0,146	9,245
10_7	0,136	8,239
10_8	0,147	10,441
11_1	0,158	14,077
11_3	0,160	12,750
11_5	0,162	10,966
11_7	0,166	13,587
12_4	0,207	12,984

12_7	0,216	14,423
12_8	0,223	14,607

Tabella 15: Valori dei parametri IDT e CT_{Index}

Negli istogrammi in *Figura 21* e *22* sono rappresentati i valori medi dell'indice IDT ottenuto per ogni miscela, mentre in quelli in *Figura 23* e *24* sono rappresentati i valori medi del CT_{Index} .

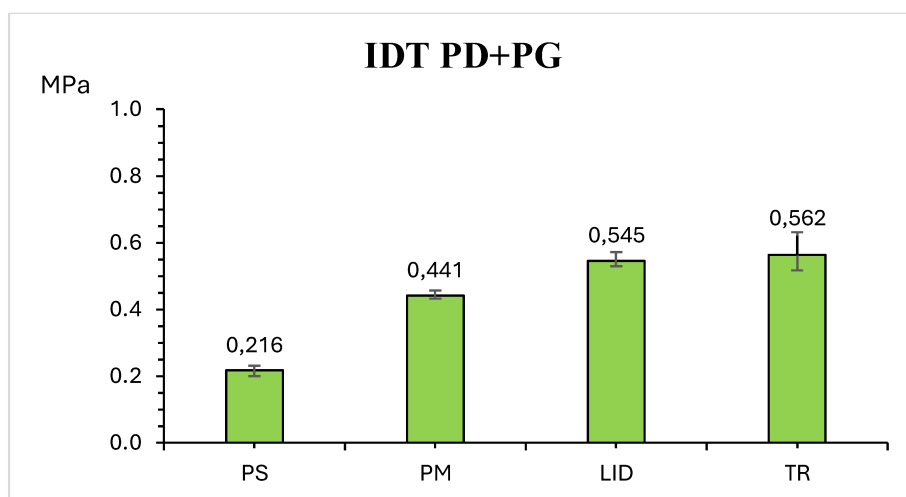


Figura 21: Valore medio IDT delle miscele analizzate a PD e PG

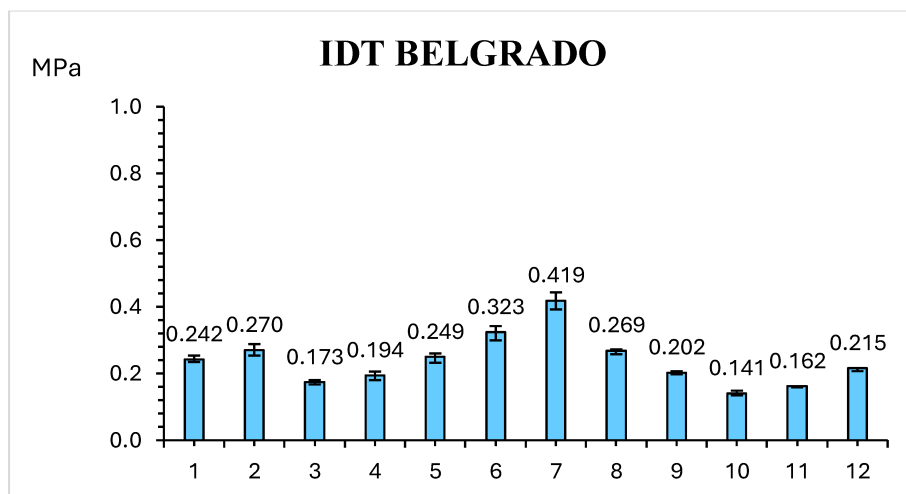


Figura 22: Valore medio indice IDT delle miscele analizzate a BG

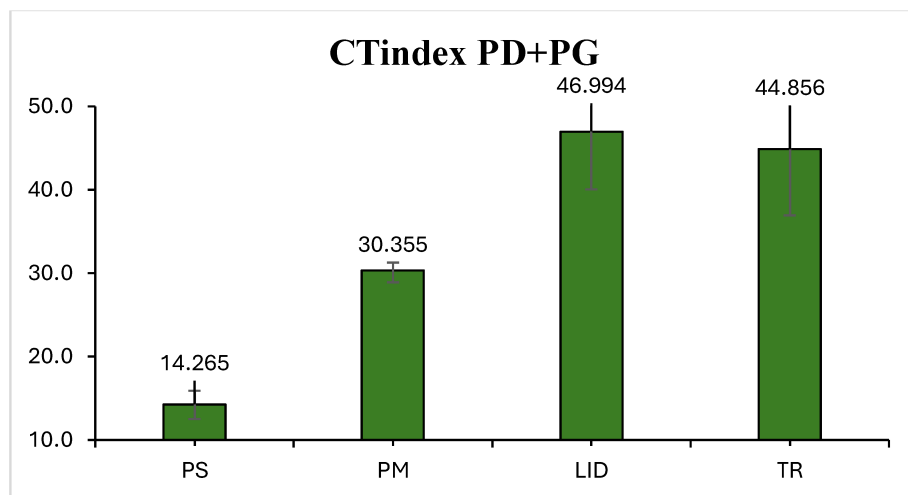


Figura 23: Valore medio del CT_{index} delle miscele analizzate a PD e PB

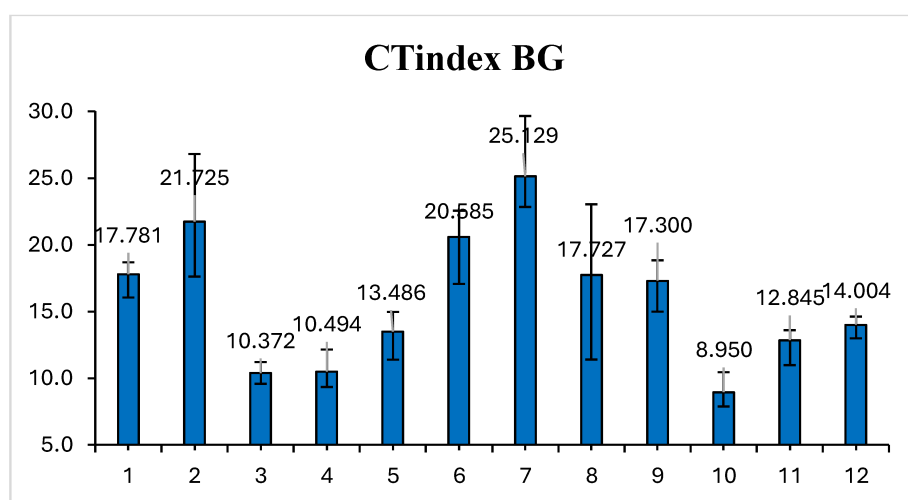


Figura 24: Valore medio del CT_{index} delle miscele analizzate a BG

Nelle Figure 25, 26, 27, 28 si riportano le curve carico-dispersione ottenute per le miscele PS, PM, LID e TR. Per tutte e quattro le miscele si sono ottenuti valori di carico-spostamento molto simili. In accordo con quanto osservato tramite la prova IDEAL-RT, la miscela tradizionale PS sembra essere comunque quella meno resistente per la quale si registrano valori leggermente inferiori.

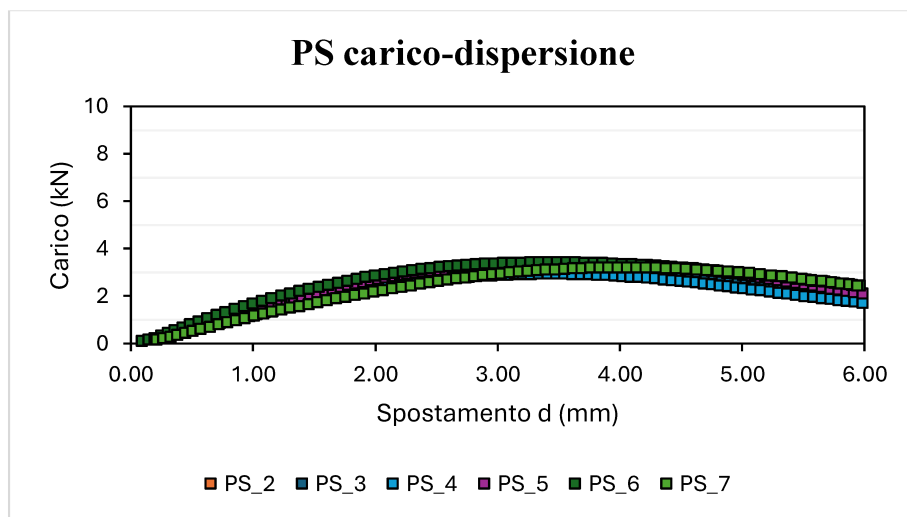


Figura 25: Curva carico-dispersione provini miscela PS

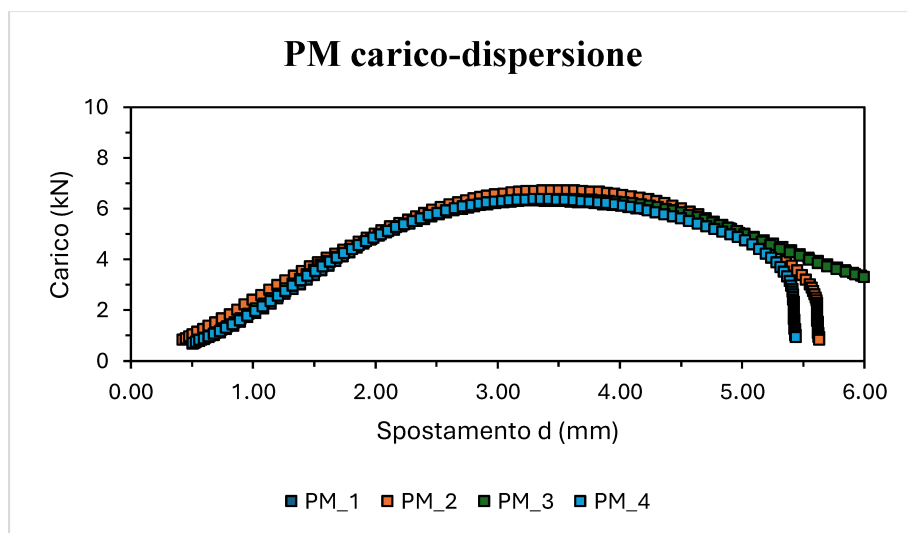


Figura 26: Curva carico-dispersione provini miscela PM

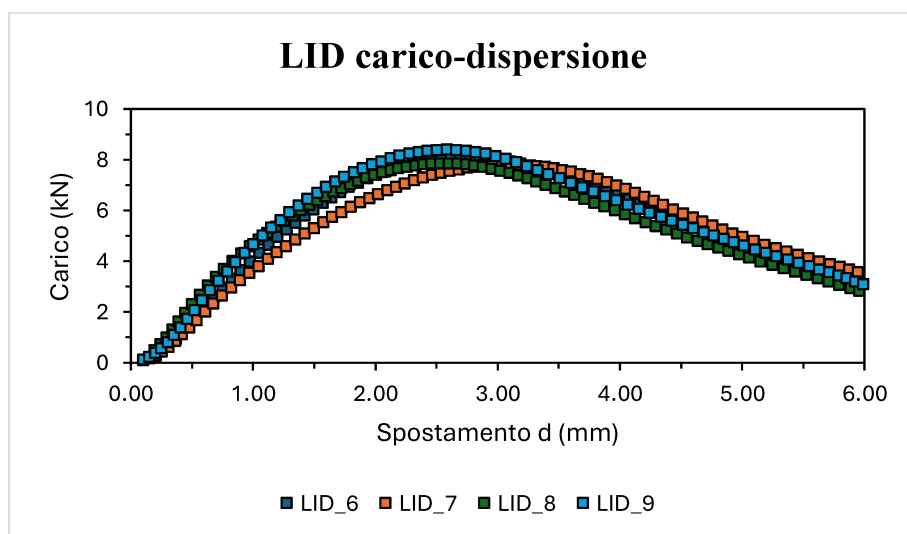


Figura 27: Curva carico-dispersione provini miscela LID

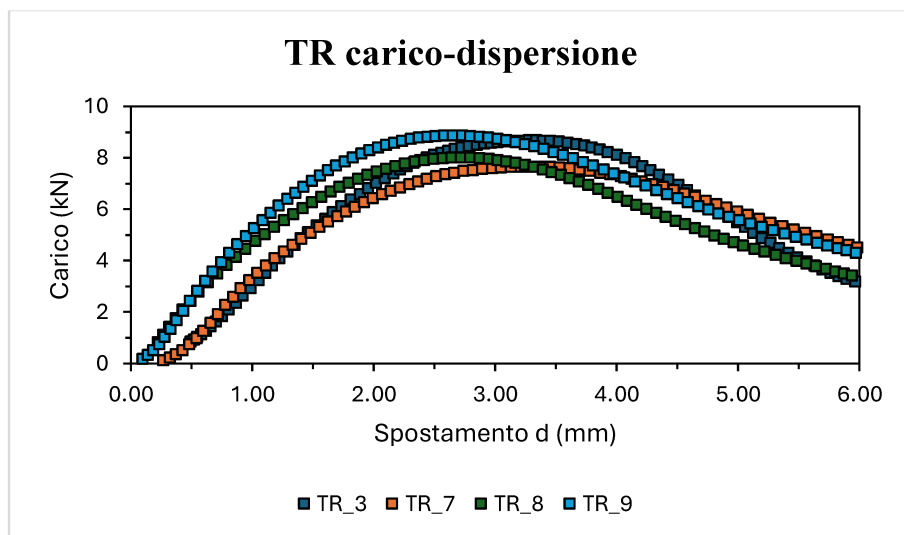


Figura 28: Curva carico-dispersione provini miscela TR

3.5 PROVA CCT

Un metodo di prova utilizzato per valutare il comportamento deformativo degli asfalti compattati mediante rullatura e sottoposti a elevati carichi di traffico e alte temperature è la prova di compressione ciclica uniassiale.

In Germania esiste una consolidata base di valutazione per due specifici metodi di prova: la prova di compressione ciclica uniassiale senza confinamento e la prova di compressione ciclica uniassiale con confinamento. Tali metodi consentono, ad esempio, di ottimizzare la resistenza alle deformazioni durante la fase di qualificazione e caratterizzazione delle miscele. Le prove di compressione ciclica con e senza confinamento, eseguite secondo le normative tecniche tedesche (TP Asphalt-StB, Teil 25 B1), consentono di determinare in modo controllato le proprietà di deformazione delle miscele bituminose. Presso i laboratori dell'Università di Perugia e dell'Università di Belgrado sono state eseguite delle prove di compressione ciclica uniassiale senza confinamento su tutte e 16 le miscele bituminose.

La prova determina il comportamento deformativo delle miscele bituminose a temperature elevate (50°C) sotto carico dinamico, simulando così l'azione dei carichi assiali dei veicoli. I provini cilindrici, con diametro pari a 100 mm, altezza pari a 62 mm e compattati al 7% di vuoti, sono stati sottoposti a un carico di compressione di forma sinusoidale pulsata, distribuito uniformemente sulla superficie di base del campione (prova non confinata), in condizioni di temperatura costante. Durante la prova sono state registrate e analizzate le deformazioni irreversibili dei provini nella direzione del carico, per ogni ciclo di applicazione. La valutazione si basa sulla deformazione residua o sulla deformazione assiale del provino, registrata e memorizzata in funzione del numero di cicli di carico applicati.

La deformazione permanente del provino, ε_n , è stata calcolata per ogni ciclo di carico misurato mediante la seguente equazione:

$$\varepsilon_n = \frac{h_0 - h_n}{h_0} \times 100 \quad (\text{Formula 21})$$

Dove:

- ε_n = deformazione assiale del provino dopo n cicli di carico (%);
- h_0 = altezza del provino dopo il precarico (mm);
- h_n = altezza del provino dopo n cicli di carico (mm).

In *Figura 29* è rappresentata una tipica curva di creep di un provino compattato.

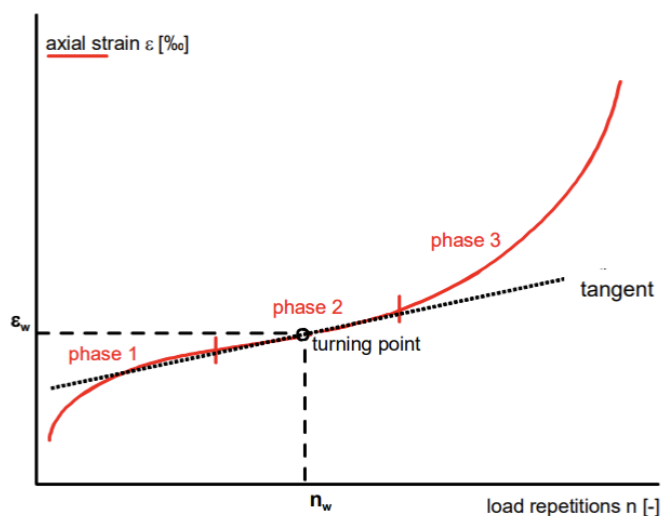


Figura 29: Tipica curva di creep. Fonte: Karcher C. (2012)

In linea generale, la curva può essere suddivisa in tre fasi:

1. Prima fase: caratterizzata da una forte deformazione iniziale con velocità di deformazione progressivamente decrescente (consolidamento);
2. Seconda fase: intervallo caratterizzato da una velocità di deformazione quasi costante, con presenza di un punto di flesso (deformazione a volume pressoché costante);
3. Terza fase: si osserva una deformazione progressivamente crescente (inizio e avanzamento della distribuzione dilatante della struttura del provino).

Gli asfalti con elevata resistenza alla deformazione generalmente non mostrano la Fase 3 entro il termine della prova (è il caso di tutti e 16 i campioni analizzati).

Per valutare il comportamento alla deformazione risulta di grande importanza la Fase 2 della curva di creep: il parametro più significativo è la velocità di deformazione al punto di flesso, indicata con ε^* ($\% \times 10^{-4}/n$). Durante le diverse prove effettuate non è stato raggiunto il punto di flesso, di conseguenza si è assunta una velocità di deformazione pari alla pendenza della tangente locale compresa tra le coppie di valori (ε_{9800} , n_{9800}) e (ε_{10000} , n_{10000}) nella regione quasi lineare (Fase 2) della curva di creep. La velocità di deformazione associata alle coppie di valori nominate nella riga precedentemente, è stato calcolato come:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_{10000} - \varepsilon_{9800}}{n_{10000} - n_{9800}} \quad (\text{Formula 22})$$

Dove:

- ε^* = velocità di deformazione del provino nel punto di misura ($\% \times 10^{-4}/n$);
- ε_{10000} = deformazione del provino a 10000 cicli di carico (mm);
- ε_{9800} = deformazione del provino a 9800 cicli di carico (mm);
- n = numero di cicli di carico.

In *Tabella 16* si riportano i valori della deformazione permanente e della velocità di deformazione ottenuti per tutti i provini realizzati per le 16 miscele.

Codice provino	ε (mm)	ε^* ($\% \times 10^{-4}/n$)
1-1	1,099	0,147
1-3	1,479	0,1571
1-4	0,982	0,1657
2-1	0,738	0,2094
2-3	1,11	0,2618
3-2	2,407	1,2565
3-3	2,594	1,6754
4-1	1,036	0,2094
4-2	1,014	0,2094
4-3	1,057	0,2094
4-4	1,234	0,1571
5-1	1,123	0,0842
5-2	1,301	0,1047
6-2	0,612	0,0524
6-3	0,938	0,0524
7-1	0,875	0,0467
7-2	0,718	0,1047
8-1	1,364	0,3141
8-2	1,559	0,3141
8-3	1,573	0,3665
8-4	1,5963	0,3665
9-1	1,8	0,3141
9-2	1,486	0,314
9-3	1,473	0,209
9-4	1,448	0,262
10-1	1,498	0,2618
10-2	1,533	0,2618
10-3	1,653	0,3665
11-1	2,615	1,623
11-3	3,002	2,1466
12-1	1,003	0,1047
12-2	0,953	0,1047
12-3	0,99	0,1571
PS_1	0,702	0,139
PS_2	0,825	0,114

PS_4	0,699	0,129
PM_1	0,152	0,028
PM_2	0,203	0,052
LID_2	0,215	0,084
LID_3	0,198	0,039
TR_4	0,31	0,057
TR_5	0,378	0,036

Tabella 16: Risultati ottenuti per la prova CCT

Nelle Figure 30, 31, 32, 33 sono rappresentate le curve di creep ottenute per le miscele PS, PM, LID e TR, mentre in Figura 34 si riporta, a titolo di esempio, la curva di creep ottenuta per la miscela 8. Al netto della dispersione dei dati, che sarà depurata nella successiva fase di selezione dei dati, risulta evidente che la miscela tradizionale PS è meno resistente rispetto alle tre miscele modificate trattate, in linea con i risultati ottenuti nelle due prove descritte in precedenza.

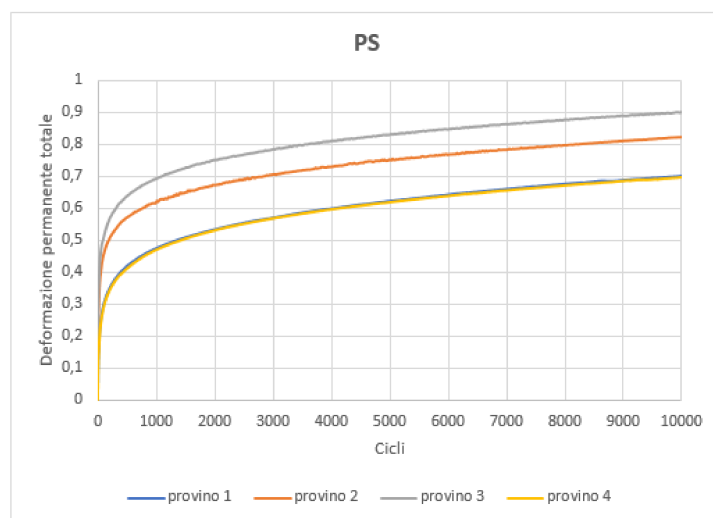


Figura 30: Curva di creep della miscela PS

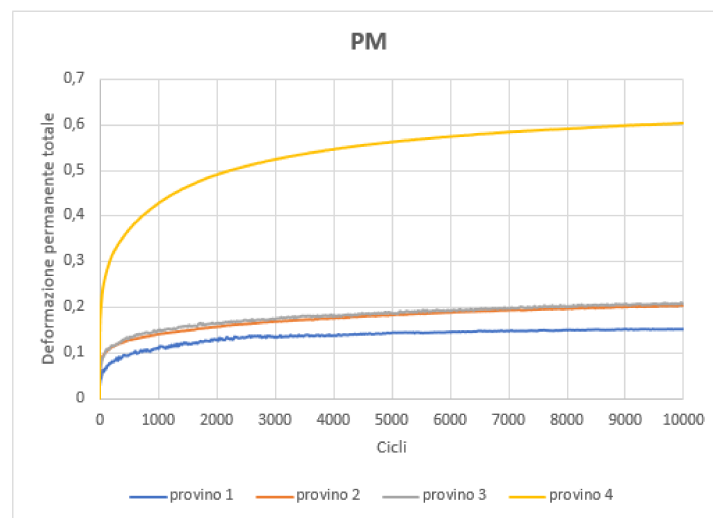


Figura 31: Curva di creep della miscela PM

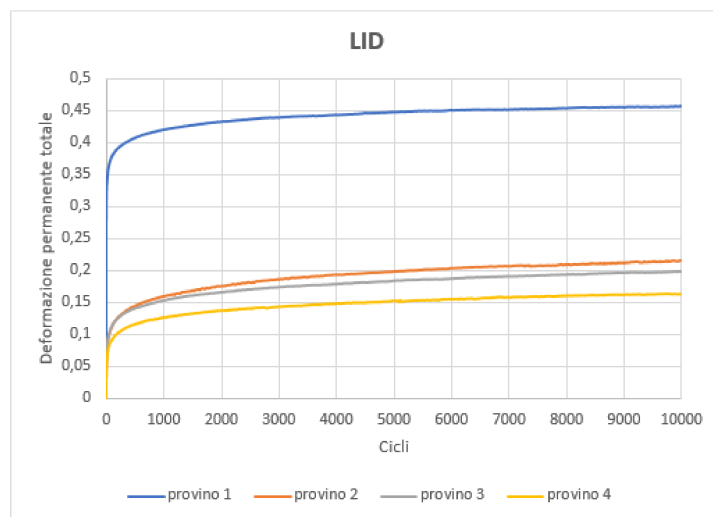


Figura 32: Curva di creep della miscela LID

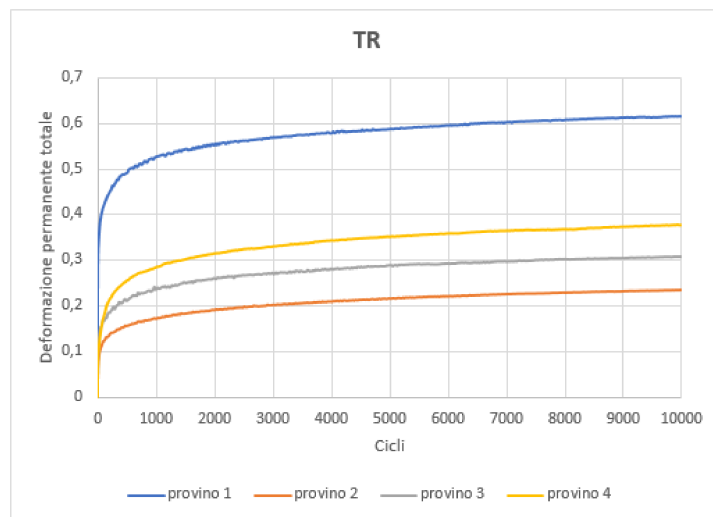


Figura 33: Curva di creep della miscela TR

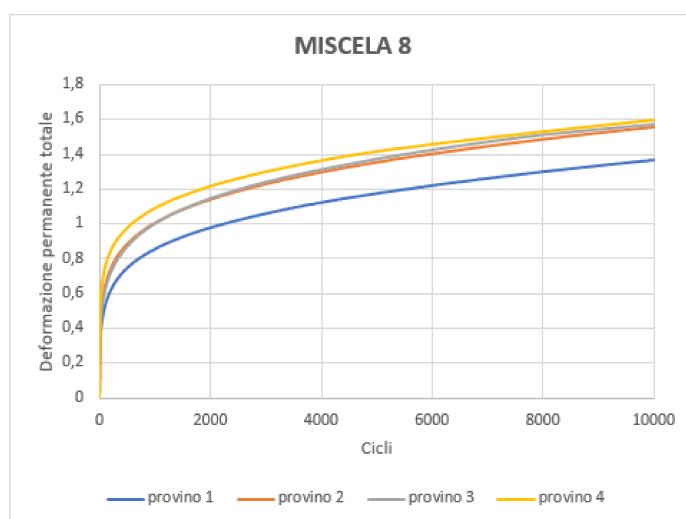


Figura 34: Curva di creep della miscela 8

3.6 PROVA WT

Nella norma UNI EN 12697-22 vengono descritti i metodi di prova utilizzati per determinare la suscettibilità dei materiali. Secondo la presente norma Europea la suscettibilità dei materiali bituminosi alla deformazione viene valutata mediante l'ormaia formata da passaggi ripetuti di una ruota caricata a temperatura costante. Possono essere utilizzati tra tipi alternativi di apparecchiatura: dispositivi di grandi dimensioni, dispositivi di dimensioni extra-grandi e dispositivi di piccole dimensioni (è il caso del dispositivo presente presso il laboratorio dell'Università di Padova).

L'apparecchiatura per la prova di ormaimento è costituita da una ruota caricata che agisce su un campione fissato su una tavola portacampione. La ruota si muove alternativamente avanti e indietro sopra la lastra, mentre un dispositivo monitora la velocità con cui si sviluppa un'ormaia sulla superficie del provino. È inoltre presente un sistema in grado di garantire che la temperatura del provino durante la prova sia uniforme e mantenuta costante, nel caso oggetto di analisi pari a 60°C. I provini, prima della prova, sono stati condizionati alla temperatura di prova specifica per un periodo pari ad un minimo di 4 h (tempo richiesto per provini con spessore nominale ≤ 60 mm).

I provini sono stati testati in aria secondo la Procedura B. Prima dell'inizio della prova sono stati effettuati cinque cicli di passaggio preliminari di condizionamento. Una volta avviata la macchina sono state effettuate delle letture dello spostamento verticale della ruota ogni 250 cicli di carico, fino a 10000 cicli di carico.

La pendenza dell'ormaia (WTS) espressa in mm per 10^3 cicli è calcolata come:

$$WTS = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5} \quad (\text{Formula 23})$$

Dove:

- WTS = pendenza dell'ormaia (mm/ 10^3 cicli);
- d_{5000} = profondità dell'ormaia dopo 5000 cicli (mm);
- d_{10000} = profondità dell'ormaia dopo 10000 cicli (mm);

Il risultato della prova è il valore medio di WTS ottenuto sui due provini.

La profondità proporzionale dell'ormaia del materiale al numero N di cicli è la media dei valori ottenuti sui due provini (o più) provini, calcolata come:

$$PRD = \frac{d_{10000}}{s} \times 100 \quad (\text{Formula 24})$$

Dove:

- PRD = profondità proporzionale media dell'ormaia;
- s = spessore della lastra.

Si riportano in *Tabella 17* i valori della profondità (mm) registrati dalla macchina ogni 250 cicli per le quattro miscele oggetto di analisi.

Cycles	PS1-4	PS2-4	PM1-7	LID1-7	LID2-7	TR1-7	TR2-7
0	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03
250	0,67	0,69	0,58	0,42	0,36	0,50	0,44
500	0,90	0,95	0,68	0,53	0,48	0,61	0,57
750	1,10	1,10	0,77	0,62	0,52	0,70	0,65
1000	1,23	1,27	0,81	0,65	0,57	0,75	0,69
1250	1,35	1,37	0,85	0,68	0,59	0,80	0,74
1500	1,44	1,51	0,88	0,74	0,65	0,84	0,78
1750	1,54	1,69	0,91	0,77	0,67	0,88	0,81
2000	1,60	1,78	0,96	0,80	0,71	0,88	0,83
2250	1,65	1,94	0,97	0,83	0,74	0,96	0,85
2500	1,71	2,06	1,00	0,84	0,76	0,97	0,89
2750	1,80	2,15	1,02	0,85	0,79	1,00	0,90
3000	1,87	2,33	1,04	0,91	0,79	1,03	0,94
3250	1,94	2,36	1,06	0,93	0,83	1,07	0,95
3500	2,01	2,56	1,09	0,93	0,85	1,08	0,96
3750	2,07	2,61	1,11	0,94	0,85	1,10	0,97
4000	2,12	2,74	1,14	0,97	0,86	1,13	0,98
4250	2,16	2,84	1,15	0,98	0,87	1,16	1,00
4500	2,22	2,84	1,18	0,99	0,91	1,16	1,02
4750	2,27	2,96	1,20	1,02	0,92	1,20	1,03
5000	2,31	2,98	1,21	1,05	0,92	1,20	1,06
5250	2,36	3,07	1,22	1,05	0,93	1,22	1,07
5500	2,40	3,15	1,22	1,05	0,96	1,23	1,08
5750	2,47	3,17	1,25	1,06	0,98	1,27	1,09
6000	2,52	3,27	1,28	1,09	0,99	1,30	1,10
6250	2,59	3,28	1,29	1,10	1,00	1,32	1,10
6500	2,63	3,48	1,30	1,14	1,01	1,33	1,12
6750	2,70	3,53	1,31	1,14	1,02	1,34	1,12
7000	2,75	3,57	1,31	1,15	1,02	1,36	1,13
7250	2,84	3,62	1,32	1,16	1,03	1,39	1,14
7500	2,90	3,64	1,35	1,17	1,03	1,39	1,15
7750	2,95	3,65	1,36	1,18	1,06	1,39	1,17
8000	3,03	3,78	1,36	1,19	1,07	1,41	1,18
8250	3,09	3,90	1,37	1,20	1,08	1,42	1,18
8500	3,15	3,93	1,39	1,20	1,09	1,47	1,19
8750	3,20	3,94	1,40	1,23	1,10	1,47	1,20
9000	3,27	3,99	1,41	1,24	1,11	1,48	1,20
9250	3,31	4,02	1,41	1,25	1,12	1,49	1,21

9500	3,35	4,06	1,44	1,29	1,15	1,49	1,21
9750	3,42	4,10	1,45	1,29	1,16	1,52	1,23
10000	3,50	4,15	1,45	1,30	1,16	1,54	1,23

Tabella 17: Valori prova Wheel Track (Padova)

In Figura 35 si riportano graficamente i risultati ottenuti. Come ci si poteva aspettare, in linea con i risultati precedenti, per la miscela PS si sono riportati i valori più alti di profondità dell'ormaia. Si osserva inoltre che le miscele LID e TR sono caratterizzate da una buona ripetibilità, infatti, per entrambe le lastre si sono registrati valori abbastanza simili.

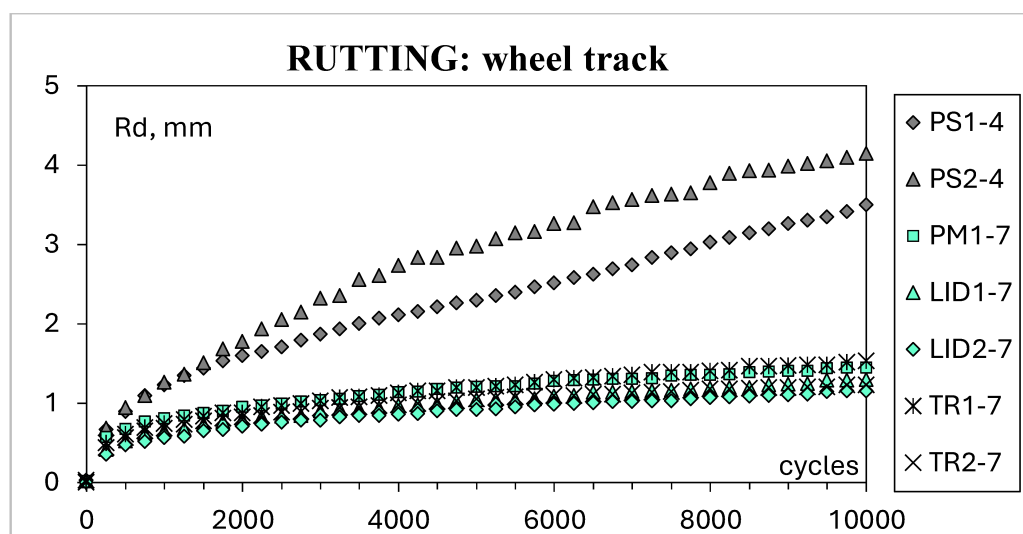


Figura 35: Prova wheel track (Padova)

In Tabella 18 si riportano invece i valori medi calcolati della pendenza dell'ormaia WTS e della profondità proporzionale dell'ormaia PRD:

	WTS (mm/10 ³ cicli)	PRD (%)
PS	0,237	12,8
PM	0,049	4,8
LID	0,049	4,1
TR	0,051	4,6

Tabella 18: Valori calcolati di WTS e PRD (miscele di Padova)

In Figura 36 è possibile osservare il solco che si è formato, a seguito della prova, sulla lastra realizzata con la miscela PS, ovvero la miscela per cui si sono registrati i più alti valori dei parametri WTS e PRD.



Figura 36: Lastra PS a seguito della prova WT

Negli istogrammi in *Figura 37* e *38* vengono messi a confronto i valori ottenuti per le quattro miscele analizzate in laboratorio, con le barre degli errori relativi.

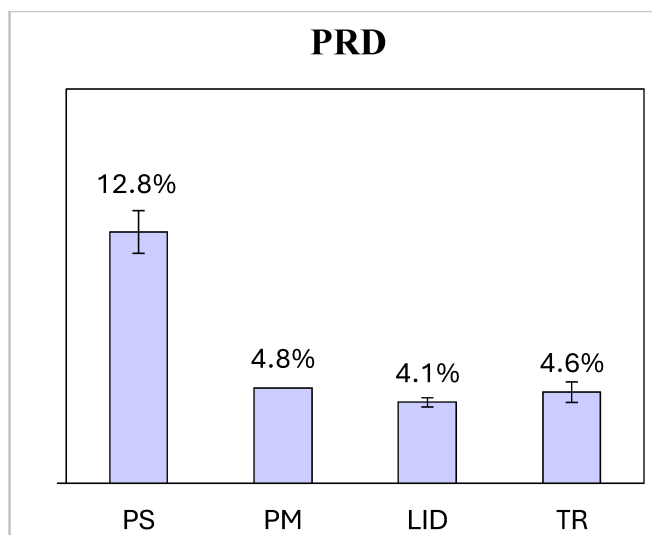


Figura 37: Valori PRD (Padova)

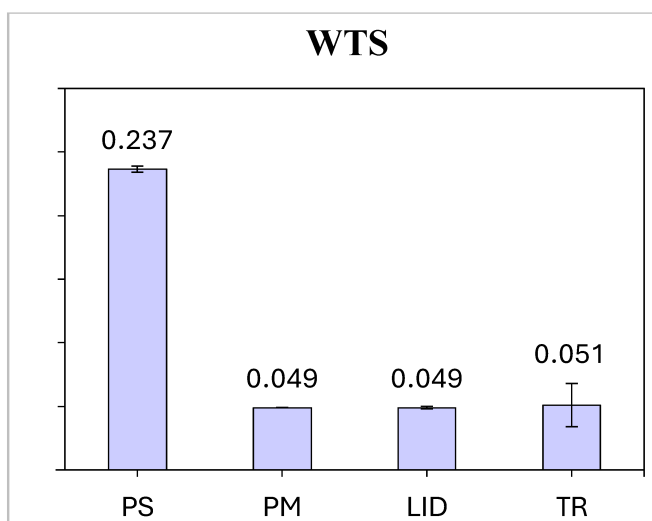


Figura 38: Valori WTS (Padova)

La prova Wheel Track è stata inoltre eseguita, presso il laboratorio dell'Università di Belgrado, sui 24 provini realizzati utilizzando le 12 miscele. Con i risultati ottenuti sono stati calcolati i valori dei due indici:

	WTS (mm/10 ³ cicli)	PRD (%)
12-1	0,07	6,6
12-2	0,13	8,7
11-1	0,07	6,5
11-2	0,13	8,7
10-1	0,06	8,2
10-2	0,06	8,7
9-1	0,07	7,7
9-2	0,1	8,7
8-1	0,06	5,4
8-2	0,07	6,3
7-1	0,02	3,4
7-2	0,01	2,7
6-1	0,02	3,6
6-2	0,03	3,4
5-1	0,05	5
5-2	0,03	4,6
4-1	0,04	5
4-2	0,05	6,7
3-1	0,06	6,5
3-2	0,05	6,6
2-1	0,04	5,6
2-2	0,04	5,2
1-1	0,02	4,5
1-2	0,02	4,2

Tabella 19: Valori calcolati di WTS e PRD (miscele di Belgrado)

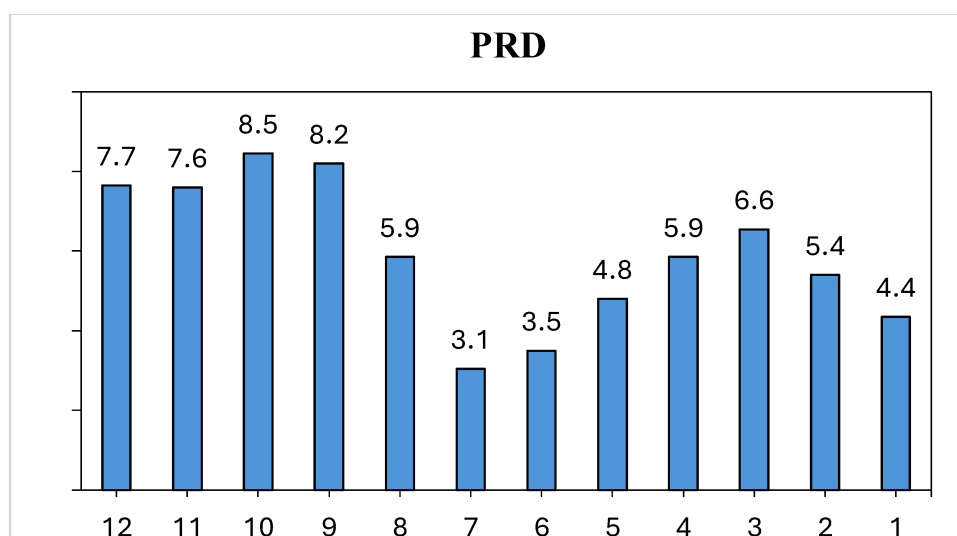


Figura 39: Valori PRD (Belgrado)

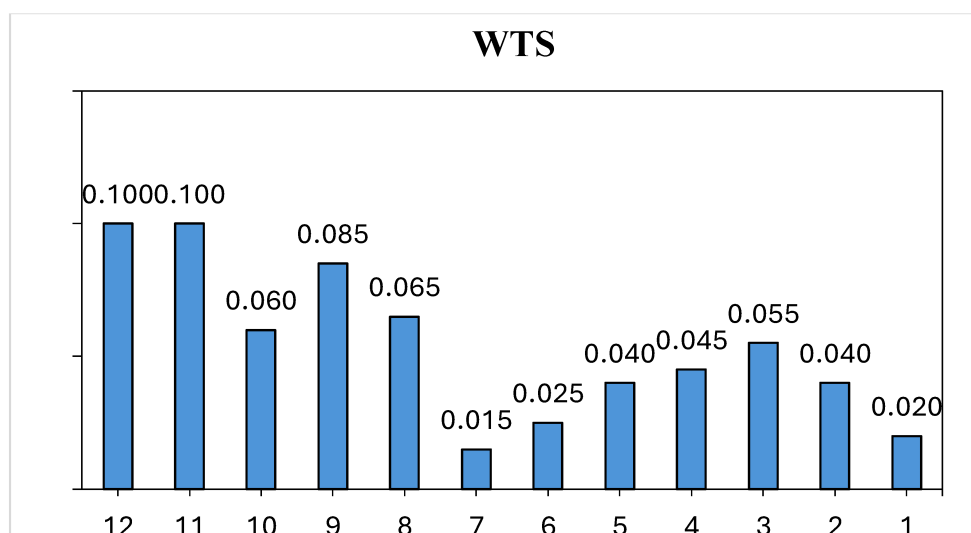


Figura 40: Valori WTS (Belgrado)

3.7 PROVA ITSM

La prova per la determinazione del modulo di rigidezza a trazione diretta ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) è stata effettuata in accordo con la normativa UNI EN 12687-26 (Annesso C). All'interno di tale norma vengono specificati i metodi per la caratterizzazione della rigidezza delle miscele bituminose mediante prove di flessione e prove di trazione diretta e indiretta. Le prove vengono eseguite sul materiale bituminoso compattato, sottoposto a carico sinusoidale o ad altro tipo di carico controllato. La procedura viene utilizzata per classificare le miscele bituminose in base alla loro rigidezza, come indicatore delle prestazioni relative nella pavimentazione, per ottenere dati utili alla stima del comportamento strutturale della strada.

La prova ITSM appartiene alla categoria di prove a carico ripetuto nelle quali, appunto, il carico varia secondo il susseguirsi di impulsi di durata predefinita intervallati da tempi di riposo. Grazie alla sua semplicità di impiego e alla possibilità di utilizzare campioni realizzati con pressa giratoria o estratti dalla pavimentazione mediante carotaggio, tale prova risulta essere una delle più diffuse per la caratterizzazione della rigidezza in laboratorio.

Viene definito modulo di rigidezza (Stiffness Modulus) il rapporto tra la massima tensione applicata e la massima deformazione misurata, espresso come:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Formula 25})$$

Nel caso di un materiale lineare viscoelastico sottoposto a un carico sinusoidale nel tempo t , il rapporto tensione/deformazione definisce il modulo complesso E^* .

Il modulo di rigidezza a trazione indiretta è funzione della geometria del campione, della deformazione orizzontale e del modulo di Poisson.

Le prove di modulo possono essere realizzate in due modi differenti: a tensione controllata o a deformazione controllata. Nella seguente sperimentazione sono state eseguite prove a deformazione controllata. In tale prova i parametri specifici del segnale di carico (ampiezza, frequenza, durata del carico e/o del riposo) devono essere controllati mediante un sistema di retroazione basato sulla forza oppure sullo spostamento. L'ampiezza del carico deve essere tale da non generare danni durante il tempo necessario all'esecuzione della prova: per la maggior parte delle miscele bituminose è stato dimostrato che le deformazioni dovrebbero essere mantenute inferiori a 50 microstrain così da evitare danni da fatica.

La prova consiste nell'applicazione dinamica di un carico lungo il diametro verticale di un provino cilindrico e nella misurazione della deformazione lungo il diametro diametralmente ortogonale. L'applicazione del carico verticale induce nel provino sia tensioni verticali di compressione (σ_y) che tensioni orizzontali di trazione (σ_x). La deformazione media lungo il diametro è data da:

$$\varepsilon_{x,media} = \frac{\sigma_{x,media}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,media}}{E} \quad (Formula\ 26)$$

Dove:

- ν = coefficiente di Poisson;
- E = modulo elastico del materiale.

Sostituendo i valori delle tensioni medie nell'espressione della deformazione media è possibile ottenere il valore dell'allungamento, ovvero di quanto si allunga il diametro, grazie al quale è poi possibile ricavare il modulo elastico del materiale:

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} (0,273 + \nu) \quad (Formula\ 27)$$

Dove:

- P = valore di picco del carico;
- Δ = deformazione media;
- T = spessore del provino.

Gli accessori necessari per allestire il provino sono:

- Telaio di carico principale (castelletto);
- Telaio porta-trasduttori;
- Trasduttori LVTD (Linear Variable Displacement Transducer);
- Testata di carico (con sferetta in testa).

Si riporta in *Figura 41* una foto dell'attrezzatura necessaria per la prova.



Figura 41: Attrezzatura per la prova

Il provino, prima dell'inizio della prova deve essere mantenuto all'interno di una camera climatica ad una temperatura prestabilita per un periodo di almeno 4 ore. Nella presente sperimentazione sono state eseguite le prove sui provini a due temperature prestabilite di 20°C e 50°C.

Per effettuare la prova è richiesto di definire i seguenti parametri:

- Temperatura di prova (20°C e 50°C);
- Diametro del provino (150 mm);
- Spessore del provino in mm;
- Coefficiente di Poisson (0,35);
- Target rise time (124 s);
- Deformazione orizzontale (7 μm);
- Numero di impulsi di condizionamento (10).

Il target rise time (tempo di picco) è il tempo necessario per raggiungere il picco di carico e deve essere compreso tra 50 s e 125 s, indicato con “3” in *Figura 42*.

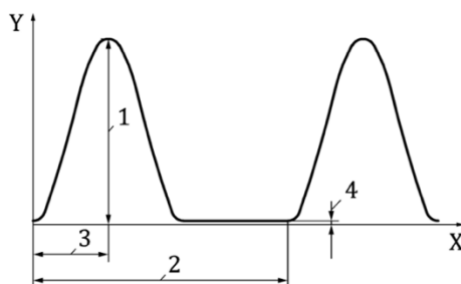


Figura 42: Forma della curva di carico (Fonte: EN 12697-26: 2018. Annesso C)

Dove:

1. Carico di picco;
2. Periodo di ripetizione dell'impulso;
3. Rise time;
4. Carico minimo.

Dopo aver posizionato il porta-trasduttori all'interno del castelletto e aver inserito il provino all'interno del porta-trasduttori in modo tale che il provino sia centrato, sia rispetto all'appoggio che rispetto alle due viti in cui verranno inseriti i due trasduttori, è possibile stringere le quattro viti laterali per fissare il campione. Infine, sulla testa del provino si appoggia la testa di carico in modo tale che il provino sia centrato anche rispetto a questa.

La prova è costituita da due sotto prove:

1. Fase di inizializzazione in cui il macchinario applica 10 impulsi di condizionamento e successiva fase in cui il provino è sottoposto a 5 impulsi di carico (Figura 43);
2. Ripetizione della fase precedente dopo aver ruotato il provino di 90°.

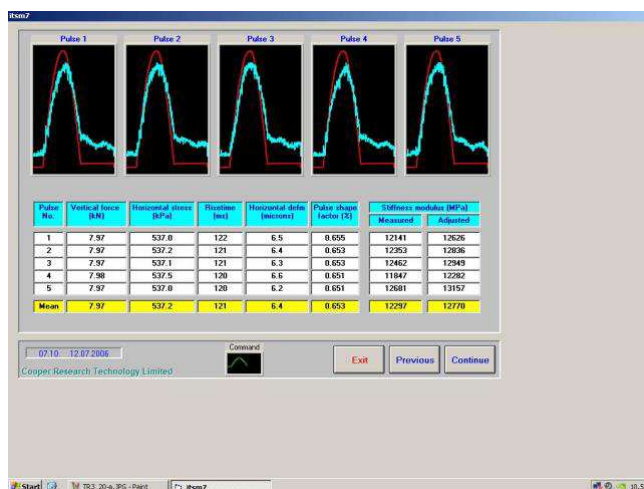


Figura 43: Esempio schermata dopo i cinque impulsi di carico

Per ciascun impulso di carico vengono misurati e registrati il carico applicato nel tempo e la deformazione diametrale orizzontale nel tempo. Il modulo di rigidezza è dato dalla media dei moduli nei due diametri.

Vengono di seguito presentati i risultati delle prove di modulo di rigidezza alle temperature di 20°C e 50°C (*Tabelle 20 e 21*): per ogni miscela sono riportati i valori di modulo ottenuti per ogni provino, su entrambi i diametri, e il valore medio per ogni provino. È stato inserito, inoltre, un istogramma (*Figura 44*) che raffigura il valore del modulo per ogni miscela, ottenuto facendo la media dei valori ottenuti per ogni provino. In controtendenza con quanto emerso nelle prove precedenti, solo le miscele modificate LID e TR sembrano molto più rigide rispetto alla miscela tradizionale PS, mentre per la miscela PM si sono registrati valori del modulo di rigidezza più bassi.

	$S_{m,1}$	$S_{m,2}$	$S_{m,20^{\circ}C}$
PS1	6706	6715	6711
PS2	6851	7035	6943
PS3	7255	6833	7044
PS4	6334	6200	6267
PS5	6675	6279	6477
PM1	4686	4678	4682
PM2	5570	5321	5446
PM3	4666	4897	4782
PM4	4111	4203	4157
PM5	4718	4780	4749
LID1	12031	11628	11830
LID2	12124	12941	12533
LID3	12985	12310	12648
LID4	11229	11545	11387
LID5	12884	12829	12857
TR1	10402	10205	10304
TR2	14755	1878	8317
TR3	12626	13123	12875
TR4	11915	11537	11726
TR5	13640	13012	13326

Tabella 20: Valori dei moduli alla temperatura di 20°C

	$S_{m,1}$	$S_{m,2}$	$S_{m,50^{\circ}C}$
PS1	395	408	402
PS2	360	360	360
PS3	375	429	402
PS4	360	300	330
PS5	418	359	389
PM1	505	541	523
PM2	564	633	599

PM3	536	590	563
PM4	492	488	490
PM5	582	443	513
LID1	1784	1814	1799
LID2	1957	2146	2052
LID3	2140	2110	2125
LID4	2062	2090	2076
LID5	2164	2235	2200
TR1	1455	1504	1480
TR2	2250	2303	2277
TR3	2015	2016	2016
TR4	1445	1460	1453
TR5	2253	2308	2281

Tabella 21: Valori dei moduli alla temperatura di 50°C

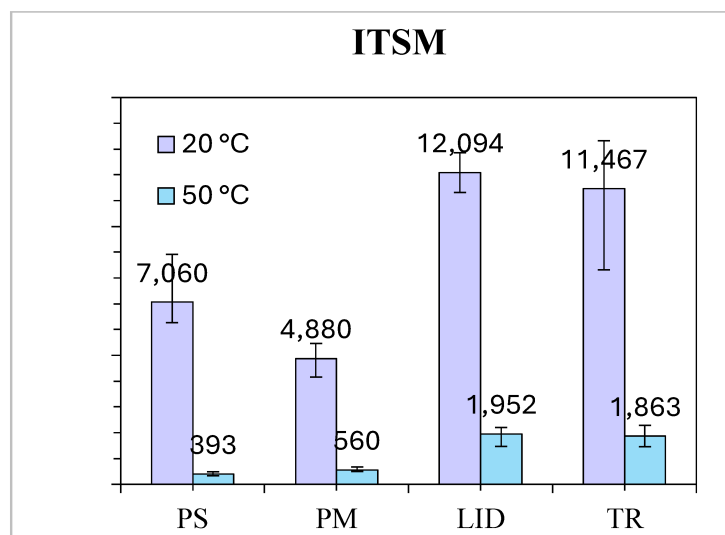


Figura 44: Valori dei moduli

3.8 SELEZIONE DEI DATI

Successivamente alla fase di acquisizione e di raccolta dati, si è proceduto con la fase di organizzazione e selezione dei dati. Ciò è stato eseguito sui dati sperimentali, e successivamente sull'intero database a disposizione, con l'obiettivo di ottenere una base dati statisticamente significativa (in termini di ripetibilità / riproducibilità), requisito fondamentale per la successiva analisi di eventuali correlazioni tra i dati provenienti dai diversi test.

Con il termine outlier si indica un valore anomalo, ovvero un dato che si discosta in modo significativo dalla maggioranza dei dati. La sua identificazione deriva dal confronto di ciascun dato con le altre osservazioni del collettivo oggetto di analisi. Esistono diversi metodi, più o meno complessi, che permettono di andare a identificare i valori anomali: nella seguente tesi si è deciso di utilizzare il relative range.

Il relative range viene definito come:

$$RR = \frac{\max(x) - \min(x)}{\bar{x}} \quad (Formula\ 28)$$

Dove:

- $\max(x)$ = valore massimo;
- $\min(x)$ = valore minimo;
- $\bar{x}$ = media dei dati.

Come limiti di accettazione statistica di RR per ogni indice calcolato, si sono ritenuti accettabili i seguenti valori massimi:

- Per l'indice RT, $RR = 15\%$;
- Per l'indice RT7%, $RR = 15\%$;
- Per l'indice IDT, $RR = 15\%$;
- Per l'indice ϵ , $RR = 40\%$;
- Per l'indice ϵ^* , $RR = 40\%$;
- Per l'indice PRD, $RR = 20\%$;
- Per l'indice WTS, $RR = 20\%$.

Per l'indice CT_{index} invece, essendo una grandezza derivata dall'indice IDT, si è deciso di considerare solo il controllo su tale parametro.

Per la prova HT-IDT si sono messi insieme i risultati ottenuti sui provini realizzati in laboratorio e quelli realizzati dall'Università di Perugia, dal momento che si sono

utilizzate le stesse miscele. Per la miscela PS si sono calcolati i seguenti valore dell'indice IDT:

Provino	H misurata (mm)	P(kN)	d (mm)	IDT (MPa)
PS1	64,3	2,722	3,703	0,180
PS2	61,5	3,149	3,342	0,217
PS3	62,4	3,002	3,602	0,204
PS4	62,1	2,920	3,483	0,200
PS5	61,7	3,347	3,610	0,230
PS6	62,67	3,405	3,419	0,231
PS7	62,795	3,187	4,061	0,215
PS8	62,465	4,036	3,875	0,274
PS9	62,39	2,600	3,752	0,177

Tabella 22: Valori prova HT-IDT (PS)

IDT medio (MPa)	RR IDT (%)	RR limite (%)
0,214	45,445	15

Tabella 23: Valore RR per l'indice IDT (PS)

Poiché il valore ottenuto del range relativo è superiore al limite fissato si è proceduto escludendo i provini 1, 8 e 9, ottenendo così un valore di RR pari a 14,352%.

Si riportano di seguito i valori ottenuti, a seguito della prova HT-IDT, delle miscele PM, LID e TR.

Provino	H misurata (mm)	P(kN)	d (mm)	IDT (MPa)
PM1	61,9	6,301	3,255	0,432
PM2	62,4	6,711	3,508	0,456
PM3	61,6	6,358	3,571	0,438
PM4	61,8	6,353	3,361	0,436
PM5	62,88	10,088	2,450	0,681
PM6	62,5	9,773	2,209	0,664

Tabella 24: Valori prova HT-IDT (PM)

IDT medio (MPa)	RR IDT (%)	RR limite (%)
0,518	48,055	15

Tabella 25: Valore RR per l'indice IDT (PM)

Provino	H misurata (mm)	P(kN)	d (mm)	IDT (MPa)
LID1	61,3	9,476	2,954	0,656
LID2	61,4	9,328	3,356	0,645
LID3	61,4	9,325	3,017	0,645
LID4	62,1	8,936	3,198	0,611
LID5	61,7	10,005	2,590	0,688
LID6	62,63	8,041	2,781	0,545
LID7	62,63	7,806	3,112	0,529
LID8	62,315	7,856	2,534	0,535
LID9	62,36	8,397	2,589	0,571

Tabella 26: Valori prova HT-IDT (LID)

IDT medio (MPa)	RR IDT (%)	RR limite (%)
0,603	26,418	15

Tabella 27: Valore RR per l'indice IDT (LID)

Provino	H misurata (mm)	P(kN)	d (mm)	IDT (MPa)
TR1	65,5	6,582	3,136	0,426
TR2	62,9	9,354	3,508	0,631
TR3	62,6	8,656	3,281	0,587
TR4	61,1	9,358	3,148	0,650
TR5	61,8	10,776	2,813	0,740
TR6	62,45	7,174	2,777	0,488
TR7	62,735	7,638	3,296	0,517
TR8	62,415	7,994	2,724	0,544
TR9	62,475	8,855	2,658	0,602

Tabella 28: Valori prova HT-IDT (TR)

IDT medio (MPa)	RR IDT (%)	RR limite (%)
0,576	54,437	15

Tabella 29: Valore RR per l'indice IDT (TR)

Per la miscela PM si è quindi deciso di escludere i provini 5 e 6 ottenendo così un RR = 5,542%. Per la miscela LID si sono scartati tutti i prime cinque provini, così il RR si è ridotto ad un valore del 7,799%. Infine, per la miscela TR si è scelto di scartare i provini 1, 2, 4, 5 e 6 in modo tale da far rientrare il RR nei limiti stabiliti.

È stata inoltre eseguita la pulizia dei dati, con lo stesso criterio, per i risultati ottenuti sui provini realizzati con le altre 12 miscele presso l'Università di Belgrado. Si riportano di seguito i risultati ottenuti (Tabella 30).

Provino	H misurata (mm)	P(kN)	d (mm)	IDT (MPa)	RR (%)
1-2	62	3,710	3,730	0,254	8,058
1-4	62	3,479	3,004	0,238	
1-6	62	3,532	3,059	0,242	
1-8	62	3,425	3,107	0,234	
2-1	62	4,213	2,536	0,288	21,214
2-2	62	3,912	3,583	0,268	
2-3	62	3,705	2,877	0,254	
2-8	62	3,405	4,017	0,233	
3-5	62	2,640	3,803	0,181	7,934
3-6	62	2,439	4,111	0,167	
3-7	62	2,496	3,961	0,171	
3-8	62	2,558	3,907	0,175	
4-1	62	3,008	4,423	0,206	13,137
4-2	62	2,635	4,557	0,180	
4-3	62	2,777	4,697	0,190	
4-4	62	2,937	3,901	0,201	

5-2	62	3,394	3,659	0,232	26,157
5-3	62	3,731	4,263	0,255	
5-4	62	3,802	5,388	0,260	
5-8	62	4,396	3,840	0,301	
6-1	62	5,001	3,578	0,342	18,027
6-2	62	4,803	4,542	0,329	
6-5	62	4,372	3,183	0,299	
6-6	62	4,174	5,042	0,286	
7-1	62	6,145	4,342	0,421	36,744
7-2	62	6,478	3,524	0,443	
7-5	62	5,729	4,033	0,392	
7-7	62	4,389	5,370	0,300	
8-3	62	3,765	5,333	0,258	6,800
8-4	62	4,032	2,824	0,276	
8-6	62	3,925	2,807	0,269	
8-7	62	3,983	4,609	0,273	
9-1	62	3,005	2,698	0,206	4,059
9-3	62	2,885	2,472	0,197	
9-5	62	2,951	2,731	0,202	
9-7	62	2,985	3,213	0,204	
10-3	62	1,962	4,018	0,134	9,289
10-6	62	2,126	3,709	0,146	
10-7	62	1,984	3,884	0,136	
10-8	62	2,153	3,326	0,147	
11-1	62	2,312	2,649	0,158	4,873
11-3	62	2,332	2,950	0,160	
11-5	62	2,368	3,483	0,162	
11-7	62	2,427	2,881	0,166	
12-3	62	2,700	4,165	0,185	18,515
12-4	62	3,026	3,759	0,207	
12-7	62	3,153	3,526	0,216	
12-8	62	3,262	3,602	0,223	

Tabella 30: Valori prova HT-IDT (miscela Belgrado)

Essendo il valore limite del RR pari al 15%, è stato necessario escludere dei provini solo nel caso delle miscele 2, 5, 6, 7 e 12:

- Miscela 2: provino 2-8;
- Miscela 5: provino 5-8;
- Miscela 6: provino 6-6;
- Miscela 7: provino 7-7;
- Miscela 12: provino 12-3.

Con i dati raccolti dalla prova Wheel track si sono ottenuti valori dei relative range tutti inferiori al limite imposto pari al 20%, di conseguenza non è stato necessario escludere nessuna lastra.

Si riportano invece, in *Tabella 31* e in *Tabella 32*, i valori calcolati di RR per ogni provino sottoposto alla prova CCT.

Provino	ϵ (mm)	ϵ^* ($\% \times 10^{-4}/n$)	RR (ϵ)	RR (ϵ^*)
PS1	0,702	0,139	25,76	67,83
PS2	0,625	0,114		
PS3	0,900	0,215		
PS4	0,699	0,129		
PM1	0,152	0,028	155,05	107,41
PM2	0,203	0,052		
PM3	0,209	0,016		
PM4	0,605	0,041		
LID1	0,457	0,041	114,54	460,09
LID2	0,215	0,084		
LID3	0,198	0,030		
LID4	0,161	-0,044		
TR1	0,614	-0,013	98,49	263,88
TR2	0,235	0,025		
TR3	0,310	0,057		
TR4	0,378	0,036		

Tabella 31: Valori RR prova CCT (miscele Perugia)

Provino	ϵ (mm)	ϵ^* ($\% \times 10^{-4}/n$)	RR (ϵ)	RR (ϵ^*)
1-1	1,009	0,1047	92,69	94,51
1-2	0,531	0,0524		
1-3	1,479	0,1571		
1-4	0,982	0,1657		
2-1	0,738	0,2094	42,91	100,00
2-2	1,188	0,4188		
2-3	1,11	0,2618		
2-4	1,159	0,1571		
3-1	1,953	0,7853	59,39	108,47
3-2	2,407	1,2565		
3-5	2,594	1,6754		
3-4	3,506	2,4607		
4-1	1,036	0,2094	20,27	26,67
4-2	1,014	0,2094		
4-3	1,057	0,2094		
4-4	1,234	0,1571		
5-1	1,123	0,0842	48,78	65,10
5-2	1,301	0,1047		
5-3	0,78	0,0524		

6-1	1,095	0,1047	56,69	80,00
6-2	0,612	0,0524		
6-3	0,938	0,0524		
6-4	0,763	0,0524		
7-1	0,875	0,0467	124,51	75,18
7-2	0,718	0,1047		
7-3	1,472	0,1047		
7-4	0,395	0,0524		
8-1	1,364	0,3141	15,23	15,38
8-2	1,559	0,3141		
8-3	1,573	0,3665		
8-4	1,596	0,3665		
9-1	1,8	0,3141	22,68	38,10
9-2	1,486	0,3141		
9-3	1,473	0,2094		
9-4	1,448	0,2618		
10-1	1,498	0,2618	18,15	61,54
10-2	1,533	0,2618		
10-3	1,653	0,3665		
10-4	1,378	0,4712		
11-1	2,615	1,6230	52,67	132,97
11-3	3,002	2,1466		
11-4	4,38	5,9162		
12-1	1,003	0,1047	5,10	100,00
12-2	0,953	0,1047		
12-3	0,99	0,1571		
12-4	0,977	0,0524		

Tabella 32: Valori RR prova CCT (miscela Belgrado)

Poiché il limite imposto di RR, per entrambi gli indici, è pari al 40%, si è proceduto con l'esclusione dei seguenti provini:

- Per la miscela PS: provino PS3;
- Per la miscela PM: provini PM3 e PM4;
- Per la miscela LID: provini LID1 e LID4;
- Per la miscela TR: provini TR2 e TR3;
- Per la miscela 1: provino 1-2;
- Per la miscela 2: provini 2-2 e 2-4;
- Per la miscela 3: provini 3-1 e 3-4;
- Per la miscela 5: provino 5-3;
- Per la miscela 6: provini 6-1 e 6-4;
- Per la miscela 7: provini 7-3 e 7-4;
- Per la miscela 10: provino 10-4;

- Per la miscela 11: provino 11-4;
- Per la miscela 12: provino 12-4.

Infine, a seguito della prova IDEAL-RT, si sono ottenuti i seguenti valori di RR per i due indici:

Provino	RT _{index}	RT _{index7%}	RR (RT _{index})	RR (RT _{index7%})
PS1	124,3	143,2	35,818	30,455
PS2	86,4	105,6		
PS6	100,9	119,0		
PS7	111,2	125,1		
PM1	239,3	269,1	16,935	12,676
PM4	238,1	274,3		
PM5	-	-		
PM6	281,0	305,0		
LID1	231,3	263,2	18,835	13,010
LID2	208,5	237,3		
LID7	252,2	270,6		
LID8	236,4	250,6		
TR2	183,1	198,7	12,366	17,271
TR3	185,7	201,6		
TR6	192,2	213,6		
TR7	206,8	235,4		

Tabella 33: Valori RR prova IDEAL-RT (miscele Perugia)

Di conseguenza, per rientrare nei valori limite di RR scelti (per entrambi gli indici pari al 15%) sono stati esclusi i seguenti provini: PS1 e PS2, PM5 e PM6, LID7, TR7.

Si riportano invece in *Tabella 34* i risultati ottenuti per le miscele trattate a Belgrado:

Provino	RT _{index}	RT _{index7%}	RR (RT _{index})	RR (RT _{index7%})
1-1	99,5	93,8	8,49	16,01
1-3	93,8	80,3		
1-5	96,8	88		
1-7	91,4	80,1		
2-4	128,2	115,1	38,92	26,88
2-5	114,5	99,2		
2-6	86,6	88,6		
2-7	98,2	91,4		
3-1	76,9	69,9	0,39	7,48
3-2	76,8	66,5		
3-3	76,8	69,8		
3-4	77,1	71,7		
4-5	86,8	86,8	6,70	6,47
4-6	89,1	85,9		
4-7	83,3	81,3		
4-8	87	85,9		

5-1	97,8	103,7	29,45	20,54
5-5	99,3	107,8		
5-6	84,5	98,4		
5-7	113,6	120,5		
6-3	152,5	140,2	23,34	23,28
6-4	151,8	146,4		
6-7	120,2	115,9		
6-8	129,1	121,5		
7-4	191,1	197,8	16,31	11,95
7-6	166,1	189,1		
7-8	196,2	213		
8-1	99,7	82,4	17,53	16,40
8-2	91,3	76,3		
8-5	109,1	90,1		
8-8	106,1	87,7		
9-2	78,6	70,6	12,14	10,93
9-4	77,6	72,2		
9-6	75,3	69,2		
9-8	84,9	77,1		
10-1	59,3	60,7	14,79	17,22
10-2	62	64,9		
10-4	68,3	71,6		
10-5	59,1	60,5		
11-2	62,7	61,2	10,91	11,96
11-4	66,8	65,1		
11-6	70	69,1		
11-8	68,1	68,8		
12-1	83,5	88,5	6,61	10,26
12-2	78,2	80		
12-5	79,5	82,3		
12-6	79,6	80,5		

Tabella 34: Valori RR prova IDEAL-RT (miscela Belgrado)

Si è quindi scelto di scartare i seguenti provini: 2-4 e 2-5, 5-7, 6-7 e 6-8, 8-5, 10-4.

CAPITOLO 4

ANALISI DEI RISULTATI

In questo capitolo vengono presentati i risultati delle prove di ormaiamento e della prova ITSM e l'analisi dei dati per le 16 miscele studiate.

4.1 RISULTATI

Nelle Tabelle sottostanti vengono riportati i risultati ottenuti per ciascun provino cilindrico (o lastra) dei parametri calcolati per le cinque prove effettuate. Le tabelle costituiscono il database comprensivo di tutte le miscele testate, già depurato dagli outliers, che viene di seguito impiegato per le successive fasi di studio delle eventuali correlazioni.

	IDT (MPa)	CT_{index}	AV (%)
1-2	0,254	16,043	5,2
1-4	0,238	18,679	5,5
1-6	0,242	18,623	5,8
1-8	0,234	17,780	5,8
2-1	0,288	26,795	6,5
2-2	0,268	17,610	5,2
2-3	0,254	20,771	5,8
3-5	0,181	11,197	6
3-6	0,167	9,569	6,2
3-7	0,171	10,164	6,2
3-8	0,175	10,560	6,2
4-1	0,206	10,969	6,4
4-2	0,180	9,326	6,3
4-3	0,190	9,536	6,9
4-4	0,201	12,143	6,4
5-2	0,232	14,961	6,8
5-3	0,255	14,116	7
5-4	0,260	11,381	7,2
6-1	0,342	22,544	6
6-2	0,329	17,056	6,1
6-5	0,299	22,154	6,5
7-1	0,421	22,827	7,3
7-2	0,443	29,649	7,2
7-5	0,392	22,912	8,1
8-3	0,258	11,387	5,3
8-4	0,276	23,028	5,3
8-6	0,269	22,553	5,2

	RT	RT7%	AV (%)
1-1	99,5	93,8	6
1-3	93,8	80,3	5,5
1-5	96,8	88	6
1-7	91,4	80,1	5,7
2-6	86,6	88,6	7
2-7	98,2	91,4	6,2
3-1	76,9	69,9	6
3-2	76,8	66,5	5,6
3-3	76,8	69,8	6
3-4	77,1	71,7	6,2
4-5	86,8	86,8	6,8
4-6	89,1	85,9	6,5
4-7	83,3	81,3	6,6
4-8	87	85,9	6,7
5-1	97,8	103,7	7,3
5-5	99,3	107,8	7,5
5-6	84,5	98,4	8,1
6-3	152,5	140,2	6,1
6-4	151,8	146,4	6,5
7-4	191,1	197,8	7,1
7-6	166,1	189,1	7,9
7-8	196,2	213	7,5
8-1	99,7	82,4	5,2
8-2	91,3	76,3	5,3
8-8	106,1	87,7	5,2
9-2	78,6	70,6	5,9
9-4	77,6	72,2	6,2

8-7	0,273	13,938	5,2
9-1	0,206	17,964	6,2
9-3	0,197	18,824	6,3
9-5	0,202	17,428	6
9-7	0,204	14,984	6,2
10-3	0,134	7,876	8
10-6	0,146	9,245	6,8
10-7	0,136	8,239	7,4
10-8	0,147	10,441	7,1
11-1	0,158	14,077	6,5
11-3	0,160	12,750	6,6
11-5	0,162	10,966	6,4
11-7	0,166	13,587	6,7
12-4	0,207	12,984	7,2
12-7	0,216	14,423	6,5
12-8	0,223	14,607	6,7
PS2	0,217	15,321	6,6
PS3	0,204	13,356	7,9
PS4	0,200	13,500	7,4
PS5	0,230	15,027	6,9
PS6	0,231	15,891	8,2
PS7	0,215	12,498	7,8
PM1	0,432	31,273	6,8
PM2	0,456	30,658	7,6
PM3	0,438	28,903	6,3
PM4	0,436	30,586	6,6
LID6	0,545	46,166	8
LID7	0,529	40,050	7,9
LID8	0,535	49,751	7,6
LID9	0,571	52,010	7,6
TR3	0,587	42,144	8,1
TR7	0,517	36,939	8,1
TR8	0,544	47,018	7,7
TR9	0,602	53,325	7,7

9-6	75,3	69,2	6,1
9-8	84,9	77,1	6
10-1	59,3	60,7	7
10-2	62	64,9	7,2
10-5	59,1	60,5	7
11-2	62,7	61,2	6,6
11-4	66,8	65,1	6,6
11-6	70	69,1	6,7
11-8	68,1	68,8	6,9
12-1	83,5	88,5	7,3
12-2	78,2	80	7
12-5	79,5	82,3	7,1
12-6	79,6	80,5	6,9
PS6	100,9	119	8,2
PS7	111,2	125,1	7,8
PM1	239,3	269,1	7,8
PM4	238,1	274,3	8
LID1	231,3	263,2	7,9
LID2	208,5	237,3	7,9
LID8	236,4	250,6	7,3
TR2	183,1	198,7	7,5
TR3	185,7	201,6	7,5
TR6	192,2	213,6	7,7

	ε (mm)	ε*(%×10⁻⁴/n)	AV (%)
1-1	1,099	0,147	3
1-3	1,479	0,1571	3,5
1-4	0,982	0,1657	3,2
2-1	0,738	0,2094	5,3
2-3	1,11	0,2618	5,4
3-2	2,407	1,2565	5,5
3-3	2,594	1,6754	5,4
4-1	1,036	0,2094	2,9
4-2	1,014	0,2094	3
4-3	1,057	0,2094	2,6
4-4	1,234	0,1571	2,9

	PRD (%)	WTS (mm/10³ cicli)	AV (%)
12-1	6,6	0,07	4,46
12-2	8,7	0,13	4,70
11-1	6,5	0,07	4,95
11-2	8,7	0,13	4,44
10-1	8,2	0,06	3,42
10-2	8,7	0,06	3,38
9-1	7,7	0,07	5,25
9-2	8,7	0,1	5,02
8-1	5,4	0,06	4,08
8-2	6,3	0,07	4,08
7-1	3,4	0,02	6,60

5-1	1,123	0,0842	3,4
5-2	1,301	0,1047	2,3
6-2	0,612	0,0524	4
6-3	0,938	0,0524	3,2
7-1	0,875	0,0467	3,2
7-2	0,718	0,1047	3,7
8-1	1,364	0,3141	1,7
8-2	1,559	0,3141	1,8
8-3	1,573	0,3665	1,5
8-4	1,5963	0,3665	1,7
9-1	1,8	0,3141	2,9
9-2	1,486	0,314	2,8
9-3	1,473	0,209	2,8
9-4	1,448	0,262	2,7
10-1	1,498	0,2618	2,5
10-2	1,533	0,2618	2,8
10-3	1,653	0,3665	2,9
11-1	2,615	1,623	5,1
11-3	3,002	2,1466	5,2
12-1	1,003	0,1047	5,4
12-2	0,953	0,1047	3
12-3	0,99	0,1571	3,5
PS1	0,702	0,139	5
PS2	0,825	0,114	3,7
PS4	0,699	0,129	4,8
PM1	0,152	0,028	11,5
PM2	0,203	0,052	12,6
LID2	0,215	0,084	5,5
LID3	0,198	0,039	5,8
TR4	0,31	0,057	7,9
TR5	0,378	0,036	8,1

7-2	2,7	0,01	5,78
6-1	3,6	0,02	6,04
6-2	3,4	0,03	6,78
5-1	5	0,05	5,51
5-2	4,6	0,03	5,28
4-1	5	0,04	4,14
4-2	6,7	0,05	4,30
3-1	6,5	0,06	4,12
3-2	6,6	0,05	3,97
2-1	5,6	0,04	4,12
2-2	5,2	0,04	5,06
1-1	4,5	0,02	4,34
1-2	4,2	0,02	4,07
PS1	11,67	0,239	5,00
PS2	13,83	0,234	4,80
PM1	4,8	0,049	7,4
LID1	4,3	0,05	8
LID2	3,9	0,048	8,4
TR1	5,13	0,068	7,8
TR2	4	0,034	7,4

	Sm_{20°C} (MPa)	AV (%)
PS1	6710,5	10,8
PS2	6943	6,6
PS3	7044	7,9
PS4	6267	7,4
PS5	6477	6,9
PM1	4682	6,8
PM2	5445,5	7,6
PM3	4781,5	6,3
PM4	4157	6,6
LID1	11829,5	5,9
LID2	12532,5	6,1
LID3	12647,5	6,0
LID4	11387	7,1
LID5	12856,5	6,4

	Sm_{50°C} (MPa)	AV (%)
PS1	402	10,8
PS2	360	6,6
PS3	402	7,9
PS4	330	7,4
PS5	389	6,9
PM1	523	6,8
PM2	599	7,6
PM3	563	6,3
PM4	490	6,6
LID1	1799	5,9
LID2	2052	6,1
LID3	2125	6,0
LID4	2076	7,1
LID5	2200	6,4

TR1	10303,5	12,7
TR2	8316,5	8,3
TR3	12874,5	8,1
TR4	11726	5,5

TR1	1480	12,7
TR2	2277	8,3
TR3	2016	8,1
TR4	1453	5,5

I valori di ITS delle miscele bituminose analizzate variano da 4157 MPa a 13326 MPa per le prove condotte a 20°C, mentre variano tra 330 MPa e 2281 MPa quando la temperatura è stata fissata a 50°C. Si è quindi osservata una notevole riduzione della resistenza a trazione indiretta all'aumentare della temperatura. Non è invece possibile affermare che esiste una relazione tra il valore del parametro ITS e la tipologia della miscela analizzata. È stata infatti sottoposta a questo tipo di prova solo una miscela tradizionale (PS), mentre nel caso delle altre tre miscele modificate solamente per TR e LID si sono ottenuti dei valori del parametro ITS simili, a entrambe le temperature.

I valori di τ_f ottenuti sui campioni analizzati a Perugia sono compresi tra 1,31 MPa e 4,45 MPa. Si osserva come i valori della resistenza a taglio delle miscele modificate siano di molto superiori rispetto a quelli ottenuti per la miscela tradizionale. Di conseguenza, i campioni modificati sviluppano carichi massimi superiori rispetto ai campioni realizzati con miscele tradizionali, determinando valori più elevati di resistenza a taglio. Una maggiore resistenza a taglio corrisponde, generalmente, a una maggiore resistenza all'ormaiamento.

L'indice di tolleranza all'ormaiamento delle miscele bituminose è stato calcolato a partire dai valori di resistenza a taglio. I valori di RT_{index} relativi ai campioni realizzati a Perugia variano tra 86,4 e 281, mentre per i campioni realizzati a Belgrado variano tra 59,1 e 196,2. I valori di RT_{index} delle miscele modificate risultano nella maggior parte dei casi superiori rispetto ai corrispondenti valori delle miscele tradizionali (fatta eccezione per la miscela 6).

Dal momento che le due grandezze RT_{index} e $RT_{index,7\%}$ risultano essere quasi direttamente proporzionali (*Figura 45*), si è scelto di trattare, nella successiva fase di ricerca di possibili correlazioni, solamente l'indice RT. Si specifica che in tale fase tale approssimazione non costituirà un limite che trascura la considerazione dei vuoti, ciò in virtù della successiva analisi di sensitività generalizzata che sarà proposta proprio con riferimento al contenuto di vuoti di ogni provino/miscela.

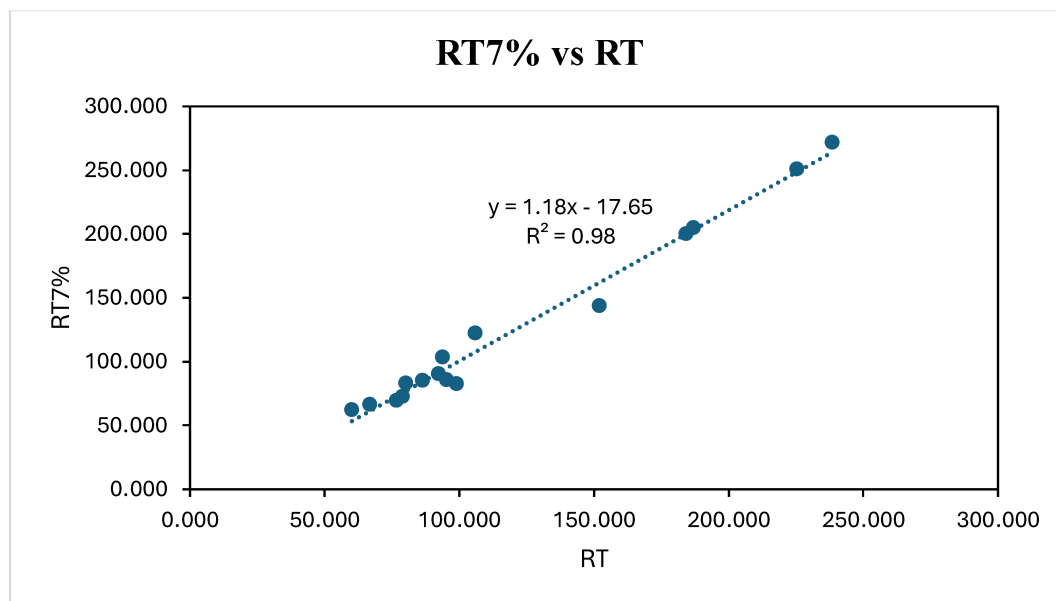


Figura 45: Relazione tra RT_{index} e $RT_{index,7\%}$

Per quanto riguarda il parametro IDT è possibile osservare che varia tra 0,134 MPa e 0,602 MPa. È inoltre possibile notare che le miscele modificate tendono ad avere valori di tale indice superiori rispetto alle miscele tradizionali (fanno eccezione le miscele 6 e 8), in linea con quanto emerso dalla prova ITSM.

Il parametro ε varia tra 0,152 mm e 3,002 mm mentre ε^* varia tra $0,028 \% \times 10^{-4}/n$ e $2,147 \% \times 10^{-4}/n$. Si nota che la velocità di deformazione è maggiore per le miscele tradizionali.

Infine, i due indici della prova WT variano tra un minimo di 2,7% e un massimo di 13,83% nel caso di PRD, mentre l'indice WTS varia tra 0,01 mm/10³ cicli e 0,239 mm/10³ cicli. Le lastre realizzate con le miscele modificate hanno riportato valori di profondità proporzionale dell'ormaia pari a quasi la metà dei valori ottenuti per le lastre realizzate con le miscele tradizionali.

In Tabella 35 si riportano i valori medi dei 9 parametri per ciascuna miscela:

Miscela	PRD	CT_{index}	RT	RT%7	HT-IDT	e	e^*	ITSM 20°C	ITSM 50°C	WTS
1	4,350	17,781	95,375	85,550	0,242	1,187	0,157	-	-	0,02
2	5,400	21,725	92,400	90,000	0,270	0,924	0,236	-	-	0,04
3	6,550	10,372	76,900	69,475	0,173	2,501	1,466	-	-	0,055
4	5,850	10,494	86,550	84,975	0,194	1,085	0,196	-	-	0,045
5	4,800	13,486	93,867	103,300	0,249	1,212	0,094	-	-	0,04
6	3,500	20,585	152,150	143,300	0,323	0,775	0,052	-	-	0,025
7	3,050	25,129	184,467	199,967	0,419	0,797	0,076	-	-	0,015
8	5,850	17,727	99,033	82,133	0,269	1,523	0,340	-	-	0,065
9	8,200	17,300	79,100	72,275	0,202	1,552	0,275	-	-	0,085

10	8,450	8,950	60,133	62,033	0,141	1,561	0,297	-	-	0,06
11	7,600	12,845	66,900	66,050	0,162	2,809	1,885	-	-	0,1
12	7,650	14,004	80,200	82,825	0,215	0,982	0,122	-	-	0,1
PS	12,750	14,265	106,050	122,050	0,216	0,742	0,127	6688	377	0,2365
PM	4,800	30,355	238,700	271,700	0,441	0,178	0,040	4767	544	0,049
LID	4,100	46,994	225,400	250,367	0,545	0,207	0,062	12251	2050	0,049
TR	4,565	44,856	187,000	204,633	0,562	0,344	0,047	11309	1901	0,051

Tabella 35: Risultati prove

4.2 CORRELAZIONI

Per andare a valutare le possibili correlazioni della prova IDEAL-RT sono stati realizzati dei diagrammi di dispersione in cui, sull'asse delle ascisse si sono riportati i valori dell'indice RT mentre sull'asse delle ordinate i valori del parametro oggetto di confronto. Grazie ai grafici in *Figura 46* e *47* è possibile osservare che non esiste un'evidente correlazione tra la prova IDEAL-RT e la prova WT, infatti, entrambe le linee di tendenza presentano un coefficiente di determinazione R^2 basso. Tale risultato è in linea con quanto riportato nello studio di N. G. Elias et al. (2024).

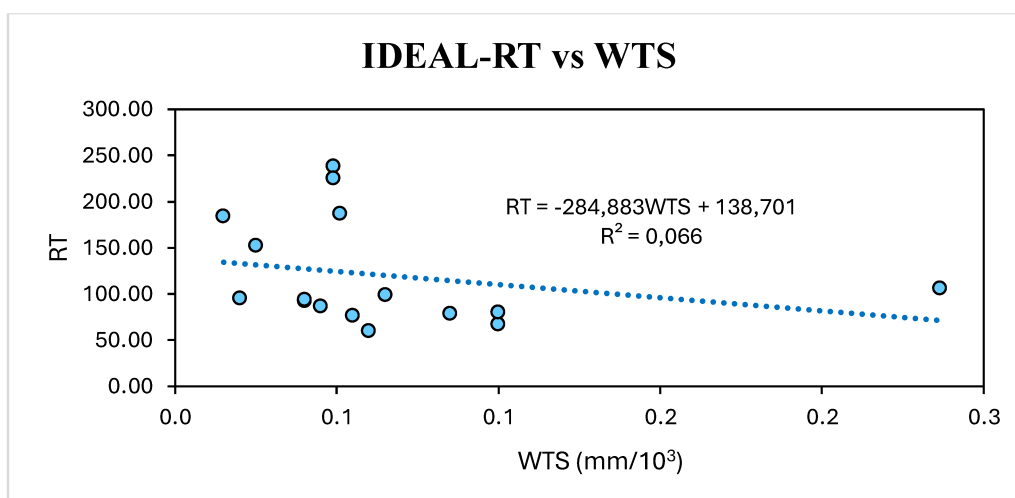


Figura 46: Correlazione tra RT e WTS

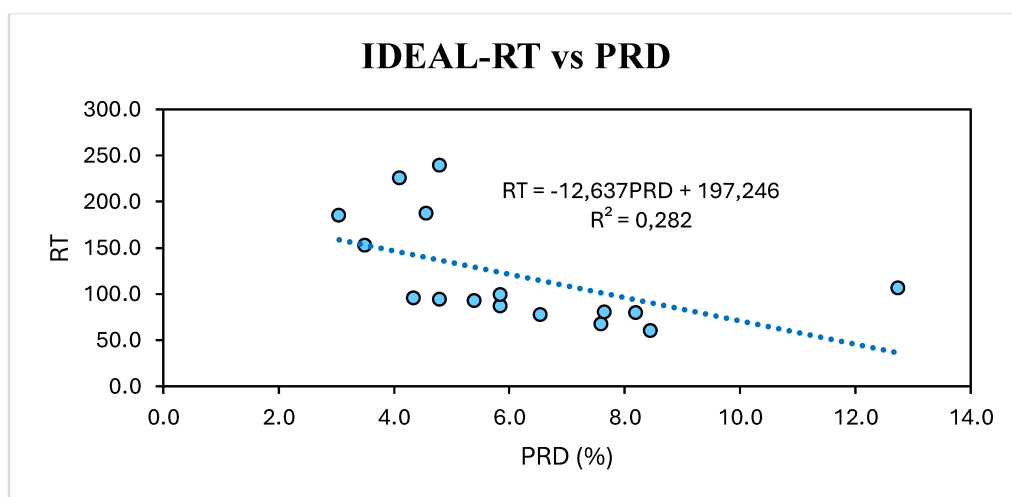


Figura 47: Correlazione tra RT e PRD

Una migliore correlazione è stata invece osservata con gli indici della prova CCT (*Figura 48* e *49*): è stato però necessario eliminare due outliers, cioè i valori relativi alle miscele

3 e 11, poiché si discostavano di molto dagli altri, comportando quindi valori di R^2 molto più bassi.

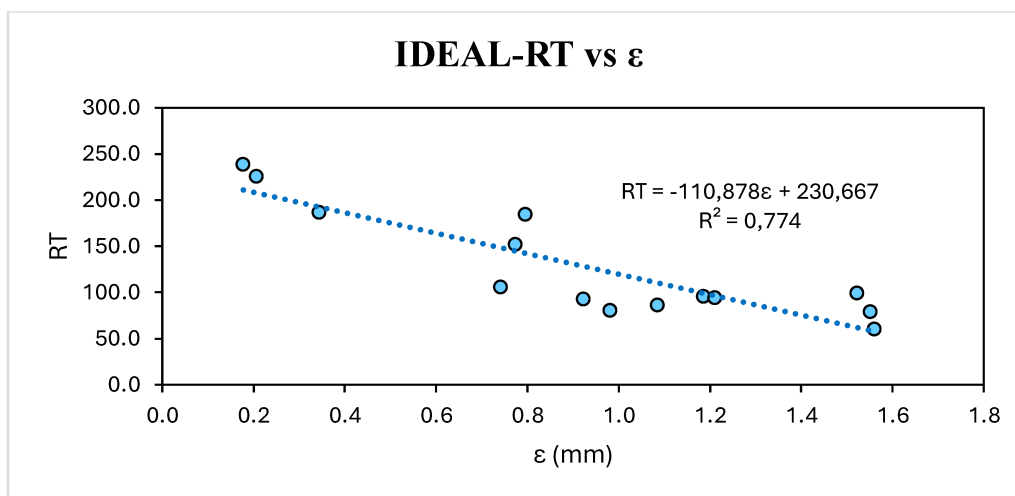


Figura 48: Correlazione tra RT ed ε

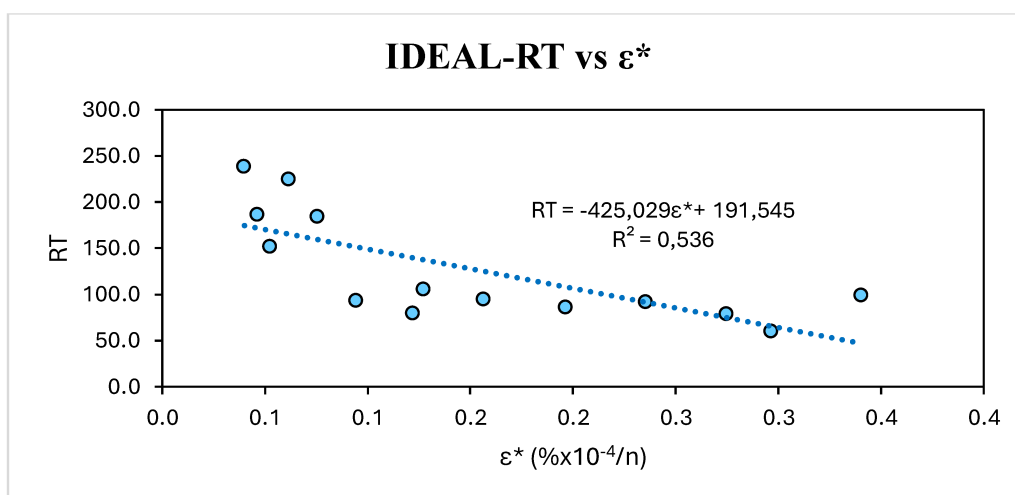


Figura 49: Correlazione tra RT ed ε^*

Mettendo a confronto la prova IDEAL-RT con la prova ITSM (Figura 50), a prima vista è emersa una forte correlazione lineare tra i due parametri, con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0,97$ nel caso della prova ITSM svolta a 20°C, mentre $R^2 = 0,94$ per la prova svolta a 50°C. Anche in questo caso si è scelto di eliminare un valore, quello relativo alla miscela PM, poiché troppo fuori tendenza. Va tuttavia precisato che la limitata quantità di dati a disposizione (prova ITSM eseguita solo sulle 4 miscele testate in laboratorio), può limitare fortemente tale tipo di evidenza. Rimane tuttavia interessante valutare la possibilità di legare i risultati di IDEAL-RT ad una semplice determinazione di rigidezza (test standard ampiamente impiegato), perlopiù considerando l'eventuale

esistenza di proporzionalità anche a temperatura diversa da quella delle deformazioni permanenti (vedasi dati a 20 °C).

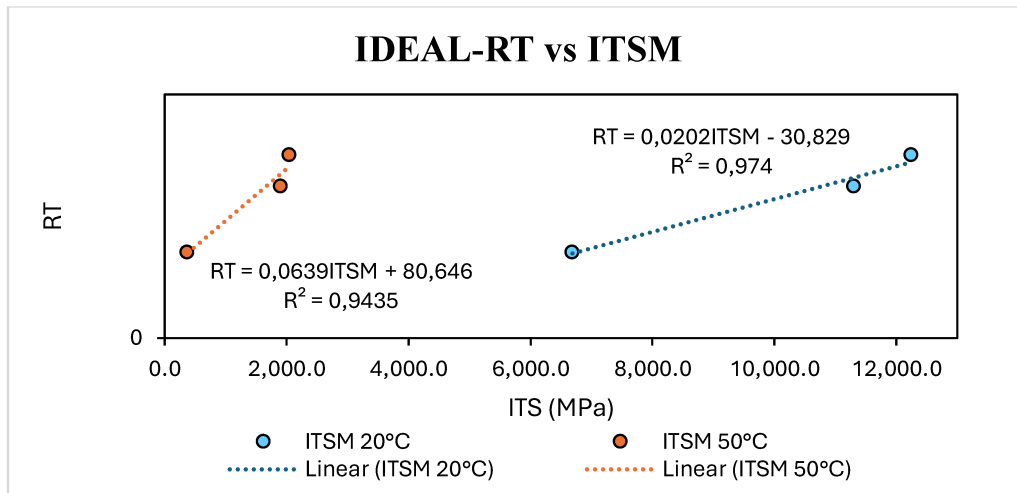


Figura 50: Correlazione tra RT e ITSM

La migliore correlazione, con una base statistica più solida, si è ottenuta con la prova HT-IDT (Figura 51 e 52): $R^2 = 0,865$ per il parametro IDT e $R^2 = 0,735$ per il parametro CT_{index} . In accordo con quanto affermato sia da I. Boz et al. (2024) sia da a. J. Taylor et al. (2026). Tale risultato è sicuramente promettente in termini di stima dei valori di RT a partire da un test di resistenza a trazione indiretta eseguito alle alte temperature. Con riferimento al CTI, si ritiene che l'affidabilità lievemente minore sia attribuibile alle modalità di calcolo del parametro, (grandezza derivata che considera anche la deformazione, oltre che la resistenza).

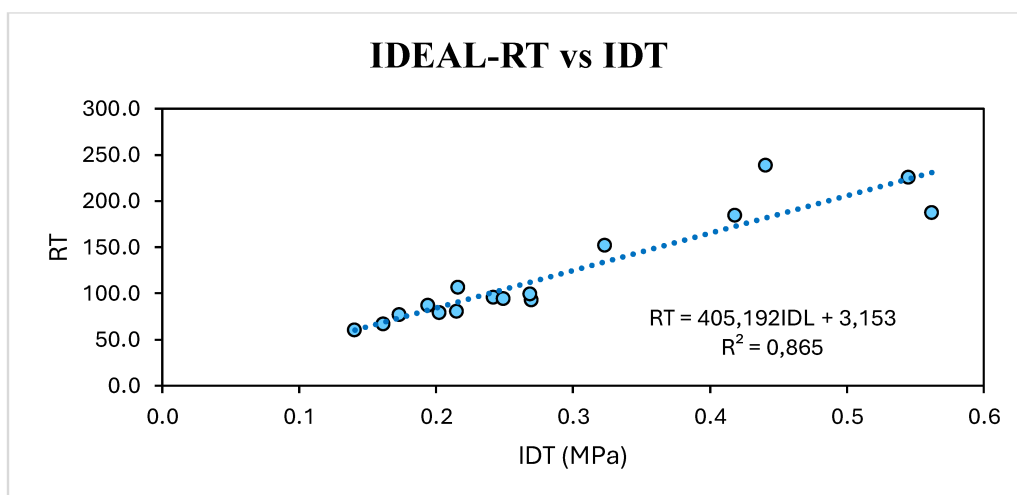


Figura 51: Correlazione IDT e RT

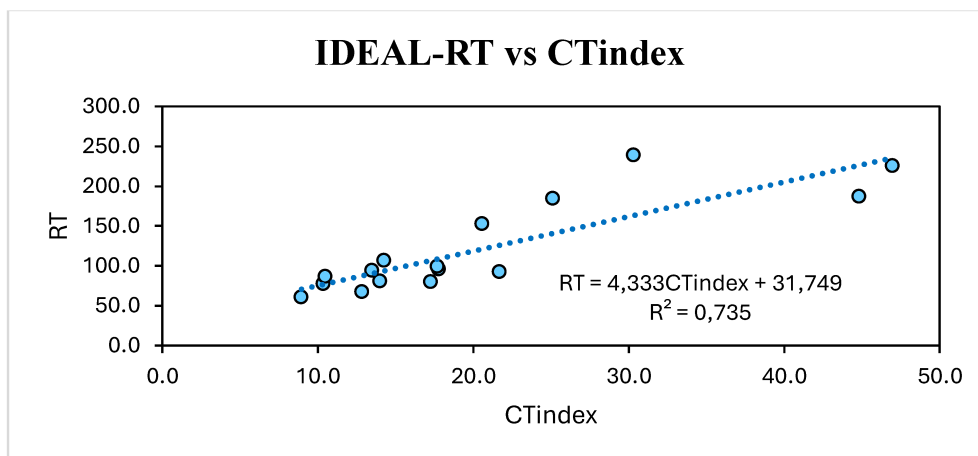


Figura 52: Correlazione tra RT e CT_{Index}

In uno studio condotto nel 2021, Yin e West (2021) hanno proposto, per prove HT-IDT a 50°C su provini di 150 mm di diametro con contenuto di vuoti pari a $7,0 \pm 0,5\%$, un valore di resistenza minimo pari a 137,9 kPa per l'approvazione della miscela. Nel presente studio tutte le prove sono state eseguite nelle stesse condizioni (50°C, 7% di vuoti e 150 mm di diametro), pertanto il valore raccomandato da Yin e West può essere utilizzato come riferimento e risulta soddisfatto. Dalla relazione lineare tra HT-IDT e IDEAL-RT è emerso che a un valore di $RT_{index} = 65$ corrisponde un valore di resistenza HT-IDT pari a 160,309 kPa (Figura 53), valore non molto in accordo con quanto definito da Yin e West e con il valore ottenuto nel report presentato nel paragrafo 1.5 (*Stato dell'arte – Articoli e pubblicazioni*) di G. Vamsikrishna e D. Singh (2023, ASCE) dove il valore minimo proposto come criterio di accettazione HT-IDT per garantire una buona resistenza all'ormaiamento è pari a 135 MPa. Nel caso trattato in questa tesi risulta quindi che la sola miscela 10 soddisfa tale requisito, mentre le altre miscele non raggiungono il valore soglia. Si osserva inoltre che nello studio condotto da G. Vamsikrishna la correlazione ottenuta tra le due prove HT-IDT e IDEAL-RT è risultata molto più forte ($R^2 = 0,96$) rispetto a quella presentata nella seguente tesi ($R^2 = 0,865$).

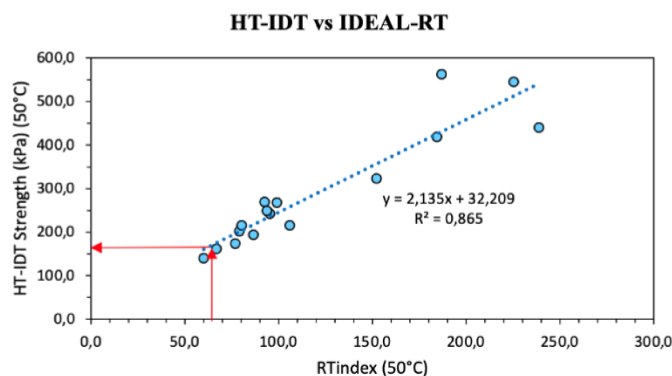


Figura 53: correlazione HT-IDT e IDEAL-RT

Sulla base della correlazione tra i parametri RT_{index} e CT_{index} è stato realizzato un diagramma PSD. Il Performance Space Diagram (PSD) fornisce una rappresentazione complessiva delle prestazioni di una miscela bituminosa rispetto a due o più criteri prestazionali (West et al., 2018, Performance testing for quality control and acceptance of balanced mix design. Rep. No. 20-02 greensboro, NC: National Center for Asphalt Technology.) Il diagramma riportato in *Figura 54* è stato costruito riportando la resistenza a fessurazione (CT_{index}) sull'asse delle ascisse e la resistenza all'ormaiamento (RT_{index}) sull'asse delle ordinate, utilizzando i criteri di accettazione prestazionali definiti per i campioni di diametro pari a 150 mm nell'articolo G. Vamsikrishna et al. (2024): $CT_{index} = 90$ e $RT_{index} = 65$. Il diagramma PDS suddivide le miscele bituminose in quattro categorie:

1. Super mix: elevata resistenza all'ormaiamento ed elevata resistenza alla fessurazione, $CT_{index} > 90$ e $RT_{index} > 65$;
2. Stiff mix: elevata resistenza all'ormaiamento ma scarsa resistenza alla fessurazione, $CT_{index} < 90$ e $RT_{index} > 65$;
3. Soft mix: scarsa resistenza all'ormaiamento ma buona resistenza alla fessurazione, $CT_{index} > 90$ e $RT_{index} < 65$;
4. Poor mix: scarsa resistenza sia all'ormaiamento sia alla fessurazione, $CT_{index} < 90$ e $RT_{index} < 65$.

Nel caso in *Figura 54*, 15 delle 16 miscele analizzate rientrano nella categoria Stiff mix, solo la miscela 10 appartiene alla categoria Poor mix.

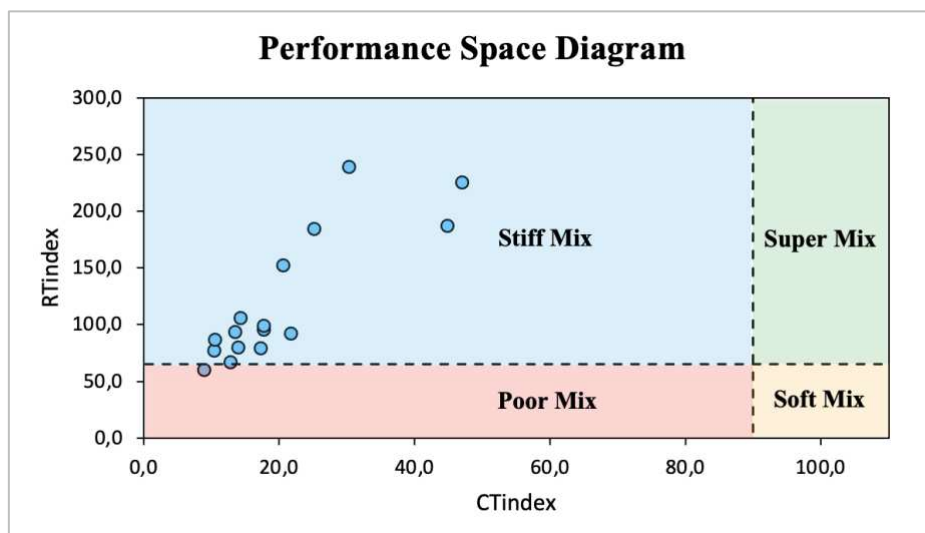


Figura 54: PSD - RT_{index} VS CT_{index}

4.3 SENSITIVITÀ

L'analisi di sensitività viene proposta per valutare se quanto sin qui identificato possa essere influenzato da fattori non contingenti le prove eseguite. In particolare, si tratterà della tipologia di miscele e del contenuto di vuoti. In altri termini, si punta a valutare se le correlazioni stabilite (nei casi più promettenti) possano essere analiticamente differenti in base al tipo di miscela (tradizionale vs. modificata) o a specifici livelli del contenuto di vuoti.

4.3.1 SENSITIVITÀ: TIPOLOGIA DI MISCELA

Per ogni test si è valutato se fosse ragionevole stabilire una correlazione univoca rispetto all'intero database di dati, oppure separarli in base alla tipologia di miscela (tradizionali nB, modificate PmB).

Nelle Figure 55, 56, 57, 58, 59 e 60 si sono distinte le 16 miscele nelle due classi nB e PmB: per ogni classe si sono tracciate le linee di tendenza, in verde sono state rappresentate le miscele appartenenti alla classe nB, in giallo le miscele appartenenti alla classe PmB, mentre in blu sono stati riportati i risultati ottenuti in precedenza sull'intero database.

Osservando i grafici in Figura 55 e 56 si riconferma quanto evidenziato in precedenza: non esiste un'evidente relazione tra le prove IDEAL-RT e WTT. Le tre equazioni ottenute risultano essere molto diverse tra loro e i valori di R^2 all'interno di ciascun gruppo sono bassi: non sembra quindi sussistere nessuna dipendenza dal tipo di miscela utilizzata.

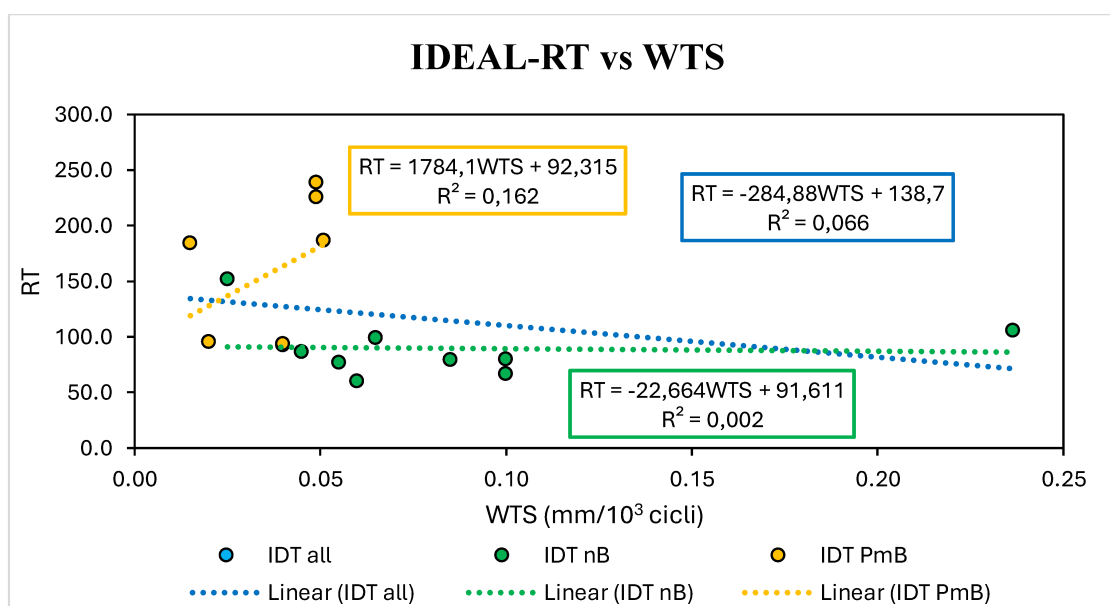


Figura 55: Sensitività rispetto al tipo di miscela (WTS)

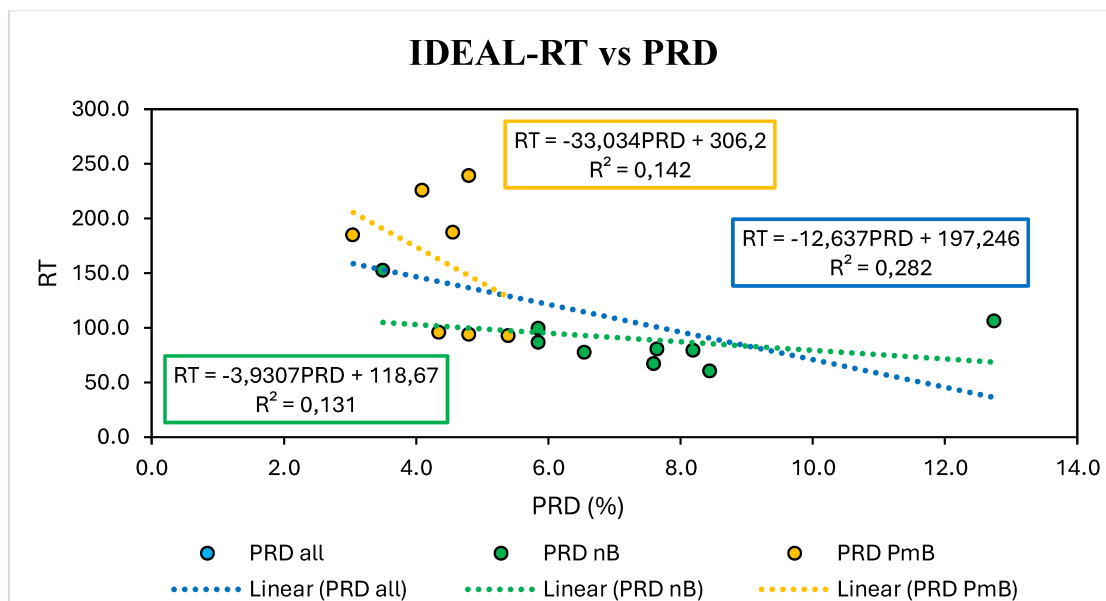


Figura 56: Sensitività rispetto al tipo di miscela (PRD)

Nei due grafici sottostanti (57 e 58), in cui viene evidenziata la relazione tra IDEAL-RT vs CCT, emerge che, nel caso delle miscele tradizionali i dati tendono ad essere dispersi infatti il coefficiente R^2 è basso. Invece per le miscele PmB si ottiene un buon R^2 e sembra esserci una relazione: l'equazione ottenuta per le miscele modificate è molto simile a quella ottenuta nel caso in cui sono state considerate tutte le miscele insieme. È però opportuno sottolineare che, sulla base della semplice e preliminare analisi statistica prodotta, i dati possono essere ancora affetti da presenza di outliers (la pulizia statistica eseguita ha potere non sempre efficace alla luce del ridotto numero di dati campione per ogni miscela). Per tale motivo, si ritiene cautelativamente che tale relazione, apparentemente valida solamente per miscele modificate, non sia del tutto affidabile e necessiti di ulteriori approfondimenti.

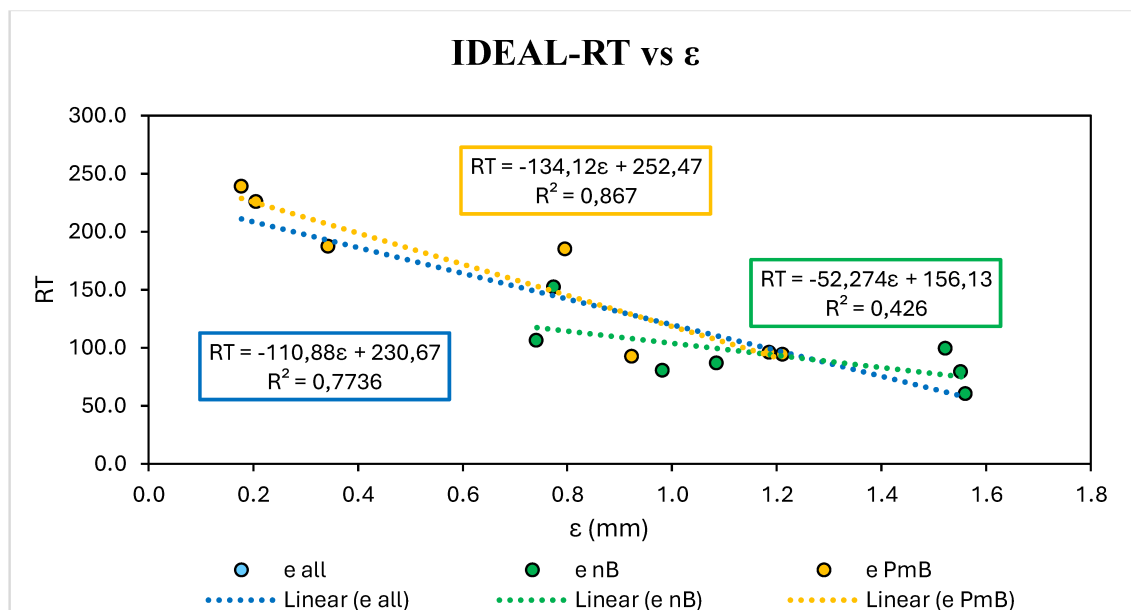


Figura 57: Sensitività rispetto al tipo di miscela (ϵ)

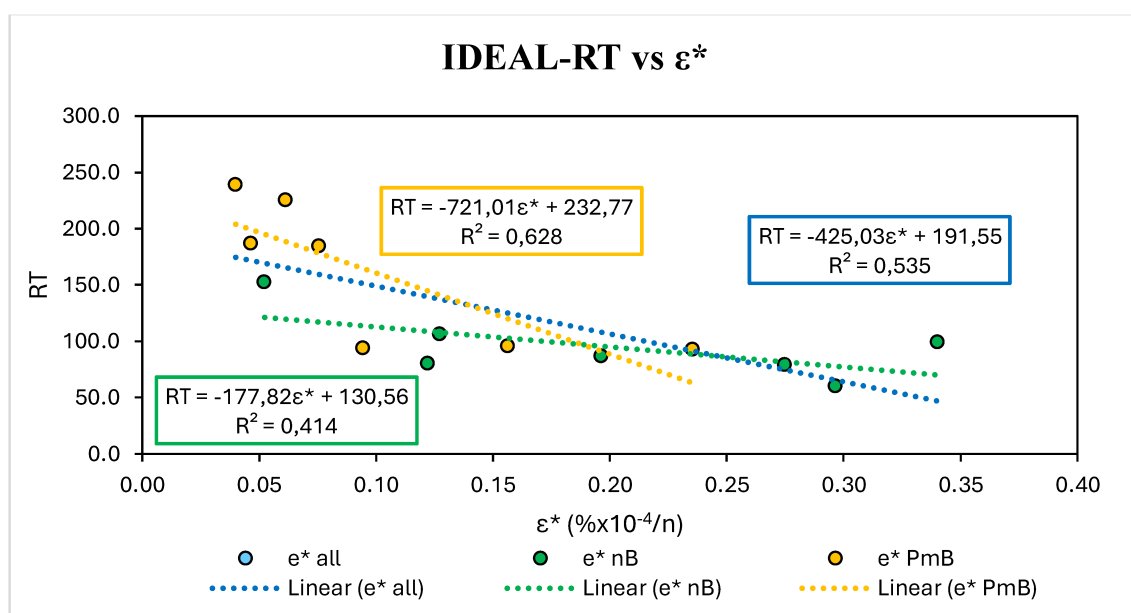


Figura 58: Sensitività rispetto al tipo di miscela (ϵ^*)

Nelle Figure 59 e 60 si evidenzia quanto emerso in precedenza, ovvero che sembra esistere una correlazione efficace tra la prova IDEAL-RT e la prova HT-IDT. Entrando più in dettaglio, dividendo le miscele in modificate e non modificate, è possibile osservare che le tre equazioni ottenute (tutte le miscele in blu, nB in verde e PmB in giallo) risultano avere pendenza molto simile. Allo stato attuale della ricerca si può quindi ipotizzare che la relazione RT vs IDT non sia sensibile alla tipologia di miscela, e che rimanga un valido strumento preliminare per la stima del valore di RT a partire da prove di resistenza a trazione indiretta

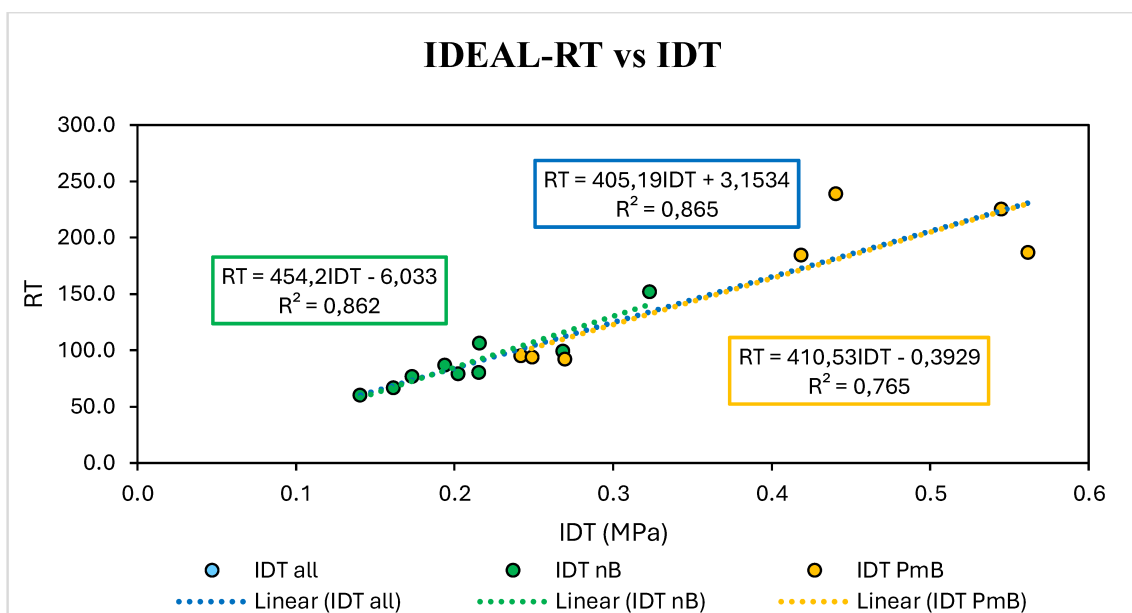


Figura 59: Sensitività rispetto al tipo di miscela (IDT)

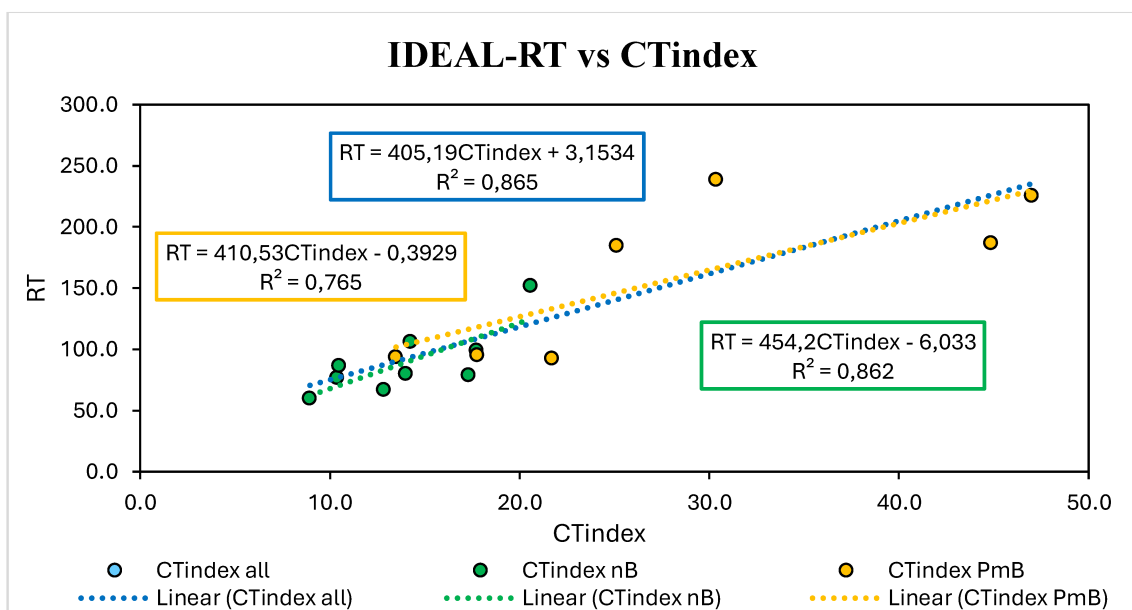


Figura 60: Sensitività rispetto al tipo di miscela (CT_{index})

4.3.2 SENSITIVITÀ: CONTENUTO DI VUOTI

Per la ricerca di una possibile dipendenza dai vuoti sono stati realizzati dei diagrammi di dispersione, per ogni prova, in cui nell'asse delle ascisse sono state riportate le percentuali del contenuto di vuoti ottenute per ciascun provino (*Figure 61, 62, 63, 64, 65, 66 e 67*).

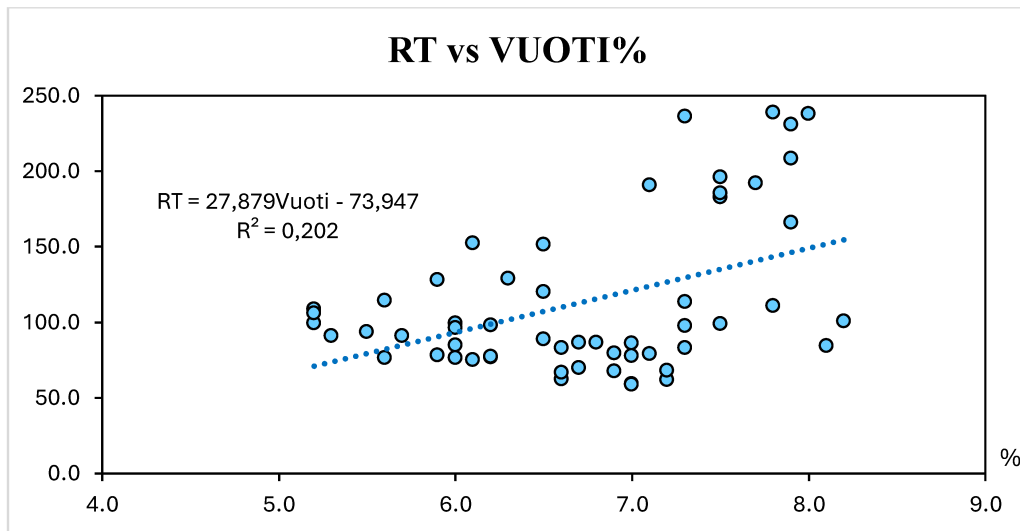


Figura 61: Sensitività rispetto ai vuoti (RT)

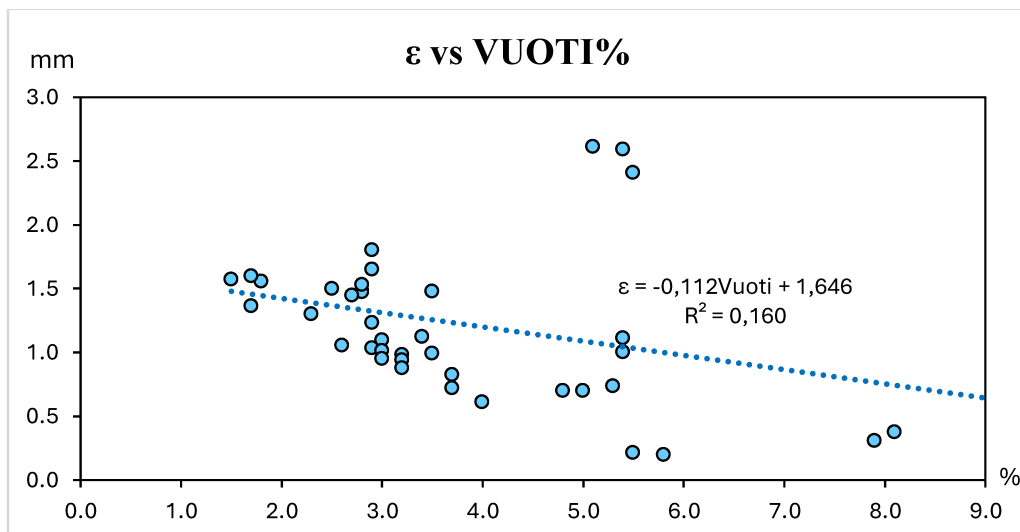


Figura 62: Sensitività rispetto ai vuoti (ε)

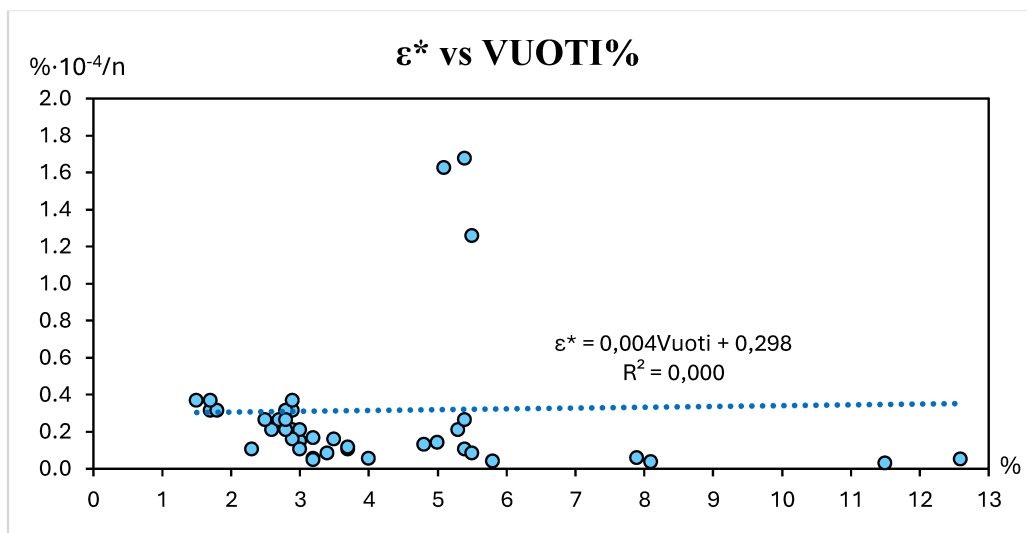


Figura 63: Sensitività rispetto ai vuoti (ε^*)

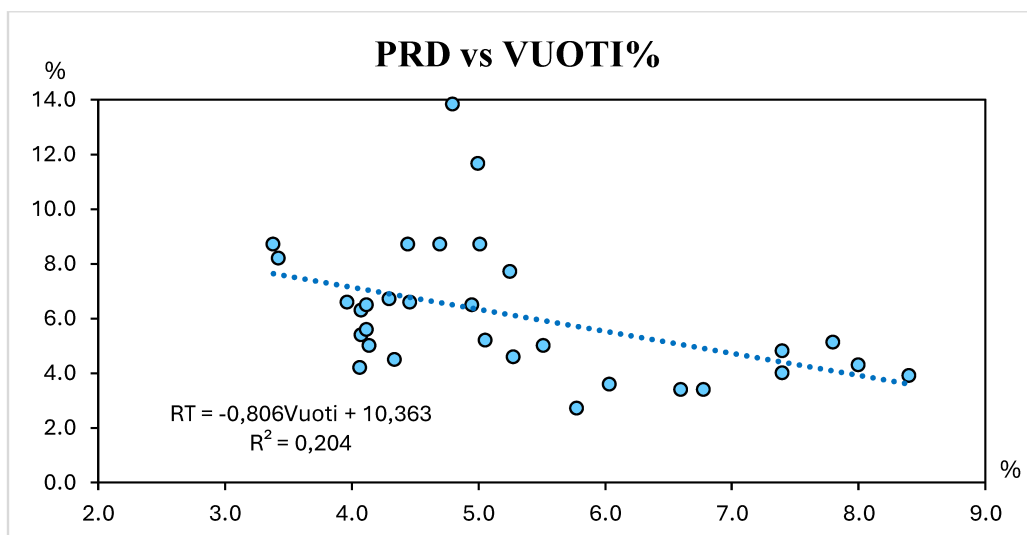


Figura 64: Sensitività rispetto ai vuoti (PRD)

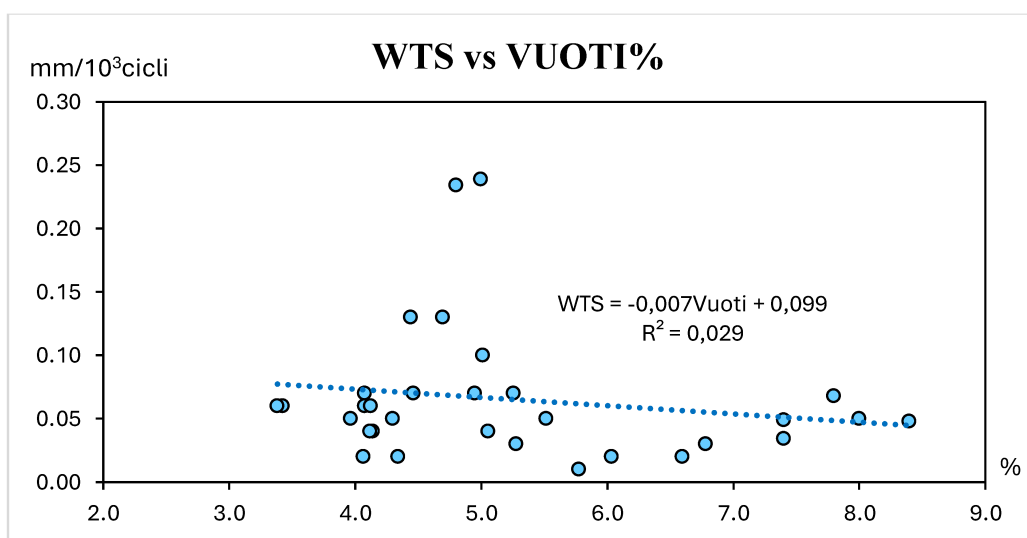


Figura 65: Sensitività rispetto ai vuoti (WTS)

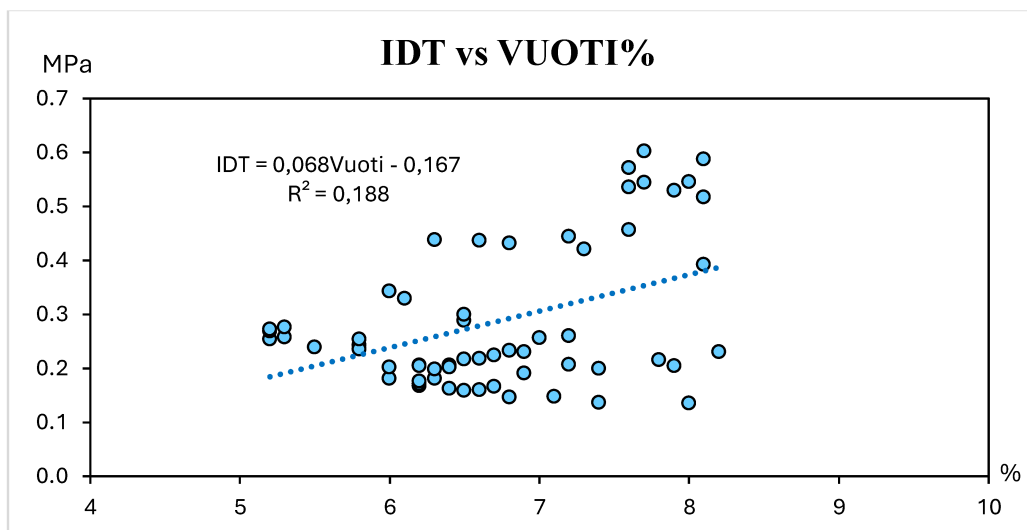


Figura 66: Sensitività rispetto ai vuoti (IDT)

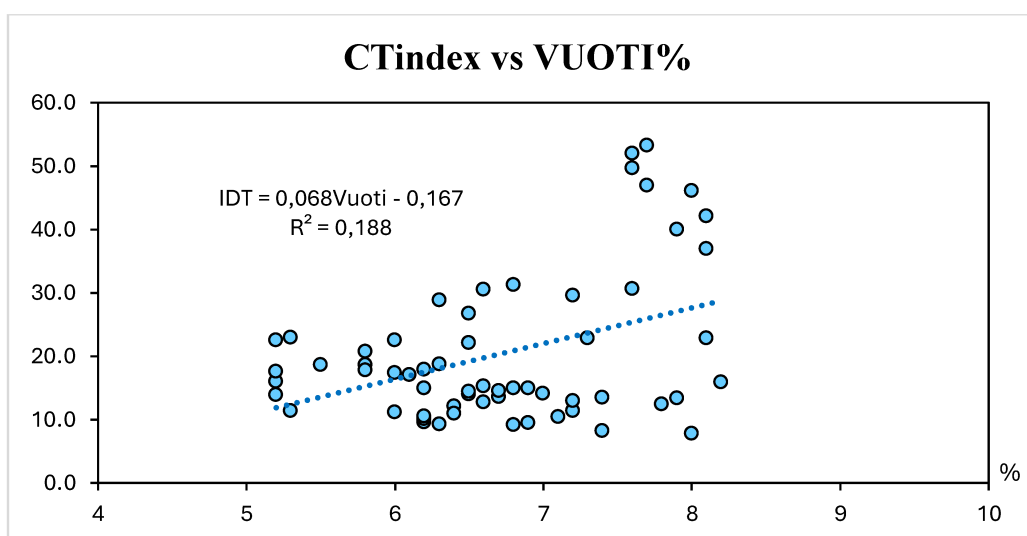


Figura 67: Sensitività rispetto ai vuoti (CT_{index})

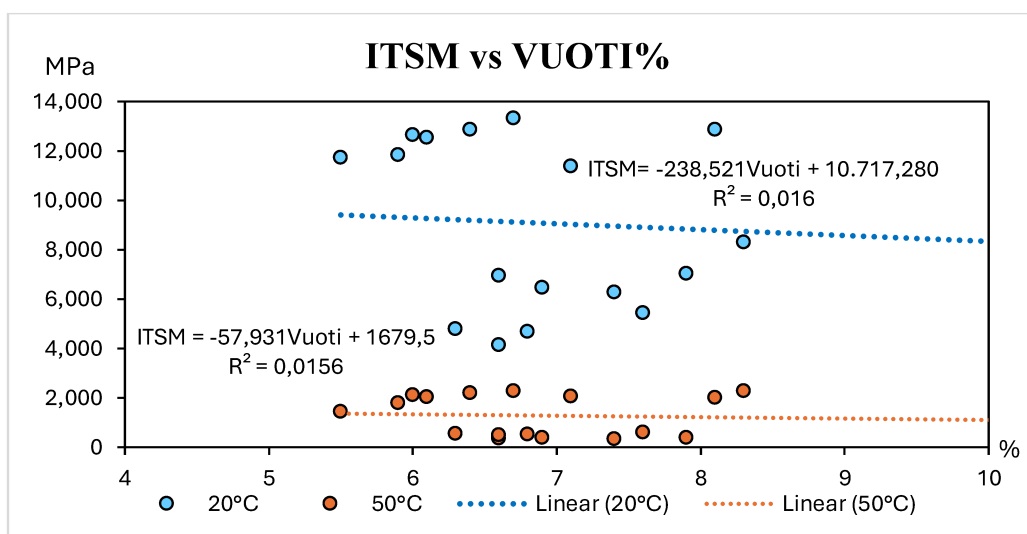


Figura 68: Sensitività rispetto ai vuoti (ITSM)

Per tutti i parametri posti in relazione con la percentuale dei vuoti si sono ottenuti valori del coefficiente di determinazione R^2 molto bassi. Infatti, si osserva una tendenza dei dati a disporsi a nuvola e non secondo una distribuzione matematica. Si può quindi concludere che non esiste una stretta dipendenza dei parametri meccanici dal contenuto di vuoti, in accordo con quanto affermato da I. Boz et al. (2023): a prescindere dalla proprietà, tutte le relazioni si ritengono non soddisfacenti. Tale aspetto si ritiene positivo in quanto dimostra che è possibile stabilire delle correlazioni (laddove affidabili) che sono valide a prescindere dalle proprietà volumetriche delle miscele. Va tuttavia sottolineato che, allo stato attuale dello studio, i provini delle prove IDEAL-RT e HT-IDT sono stati realizzati nel soddisfacimento delle proprietà volumetriche prescritte dalla normativa (contenuto di vuoti nell'introno del 7% per la relazione). Ulteriori investigazioni potrebbero stabilire se tale evidenza vale anche al di fuori di tale ipotesi, tuttavia, si ritiene che la correlazione sia utile a correlare prove effettuate in conformità alle rispettive norme di riferimento.

Come ulteriore approfondimento, in *Figura 69*, è stata infine investigata la relazione tra l'indice RT e la percentuale del contenuto di vuoti andando a raggruppare i valori per singola miscela (sono state escluse le miscele PS e PM poiché presentavano solo due dati e quindi poco rappresentative). Qualora in tale grafico l'indice RT risultasse proporzionale ai vuoti ci si attenderebbero singoli valori di R^2 piuttosto alti, a prescindere dalla miscela o al limite per gruppi di miscele (nB e PmB). Dall'analisi dei dati si osserva, invece, che i coefficienti R^2 risultano piuttosto dispersi. Dunque, i dati a disposizione non sono sufficientemente esaustivi nell'affermare che possa esistere una forte dipendenza dell'indice RT dal contenuto di vuoti. Anche in tal senso, ulteriori investigazioni che prevedono l'estensione della numerosità dei dati e l'inclusione di nuove miscele, potranno confermare tale ipotesi.

RT vs VUOTI%

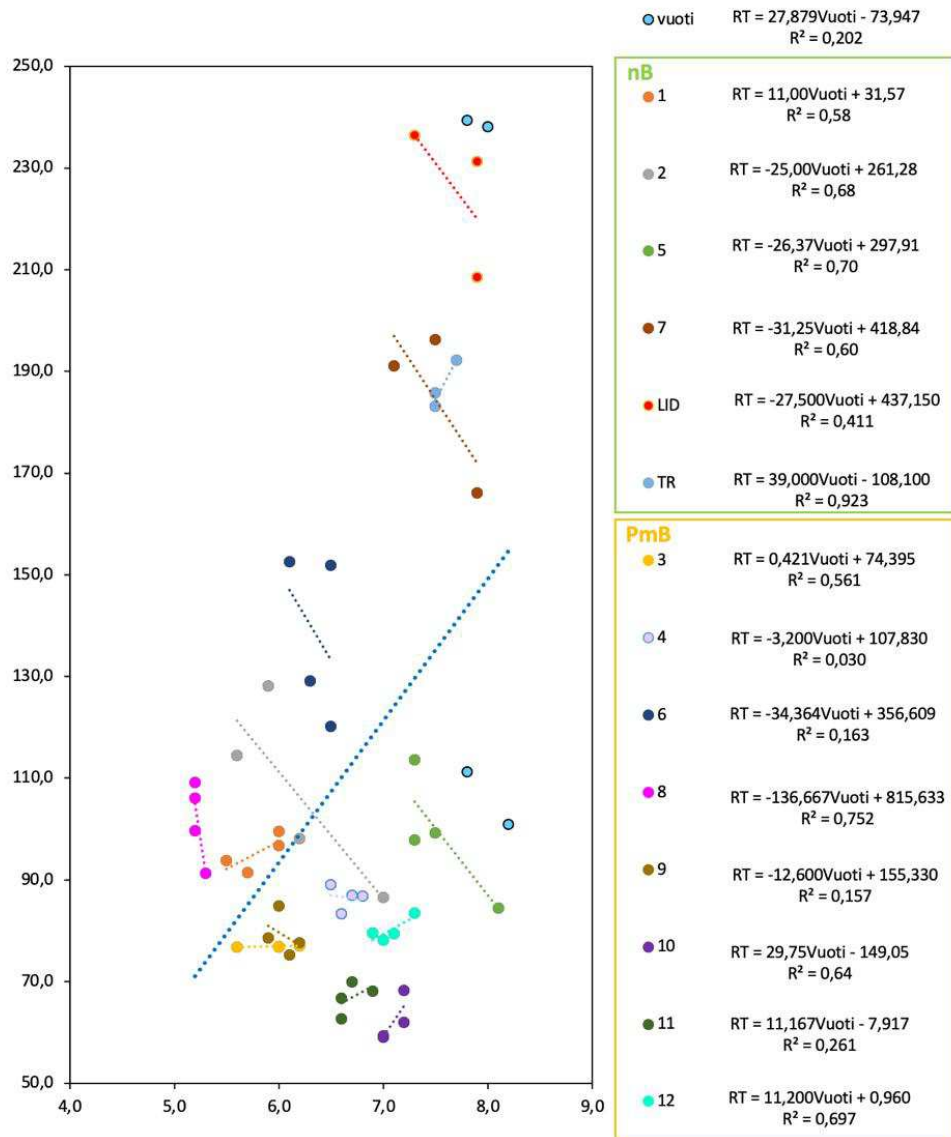


Figura 69: Sensitività rispetto ai vuoti (RT, diviso per miscele)

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

Negli ultimi anni si è diffuso il concetto di Balanced Mix Design (BMD), secondo il quale le miscele bituminose vengono progettate sulla base di criteri prestazionali, come la resistenza all'ormaiamento, alla fessurazione e al danno da umidità, piuttosto che sui soli criteri volumetrici.

Secondo la norma AASHTO PP 105, il BMD comprende quattro diversi approcci:

- A. È definito come progettazione volumetrica con verifica prestazionale, in cui le miscele bituminose vengono progettate utilizzando i requisiti volumetrici esistenti e successivamente vengono verificate attraverso criteri prestazionali. L'approccio A è quello più conservativo e comune, con un basso potenziale di innovazione.
- B. Consiste nella progettazione volumetrica, utilizzando i requisiti volumetrici per determinare il contenuto ottimale preliminare di legante, con successiva ottimizzazione prestazionale. Permette una certa flessibilità nell'aggiustamento del valore preliminare al fine di andare a soddisfare anche i requisiti prestazionali. Tuttavia, sebbene offra una maggiore flessibilità rispetto all'approccio A, è ancora un metodo conservativo con limitate possibilità di innovazione.
- C. Tale approccio è definito come progettazione volumetrica modificata dalle prestazioni e consente di evitare alcuni requisiti volumetrici, a condizione che vengano soddisfatti i criteri prestazionali. I risultati delle prove prestazionali vengono utilizzati per modificare il contenuto di legante, le proprietà e le proporzioni degli altri componenti della miscela fino al raggiungimento dei requisiti richiesti. Questo metodo risulta essere meno conservativo rispetto ai due precedenti e offre un potenziale di innovazione medio.
- D. Consiste in una progettazione completamente basata sulle prestazioni e utilizza tali risultati per ottimizzare il mix design, ovvero per definire e modificare i componenti e le relative proporzioni della miscela. Non è quindi richiesto il rispetto delle proprietà volumetriche. Rappresenta l'approccio meno conservativo e con il più elevato potenziale di innovazione.

La principale differenza tra questi quattro approcci è dovuta quindi, al grado di rigidità richiesto nell'applicazione dei criteri volumetrici e al livello di innovazione consentito per soddisfare i requisiti prestazionali.

Di recente sono state sviluppate numerose prove prestazionali per poter valutare la resistenza all'ormaiamento delle miscele bituminose. Tuttavia, molte di queste prove presentano diverse problematiche pratiche, quali i costi elevati delle attrezzature, procedure sperimentali complesse, tempi di prova lunghi e strumenti aggiuntivi per la preparazione dei campioni, come carotatrici e dispositivi di taglio. Pertanto, molte di queste prove risultano essere non adatte per attività di controllo e assicurazione della qualità delle miscele bituminose.

Di conseguenza, il recente interesse verso il BMD ha evidenziato la necessità di sviluppare prove prestazionali semplici, che possano essere efficacemente utilizzate per il controllo qualità delle miscele bituminose. È per tale motivo che è stata introdotta la prova IDEAL-RT: per valutare il potenziale di ormaiamento delle miscele bituminose sulla base del meccanismo di rottura per taglio.

In conclusione, nella seguente tesi è emerso, seppur sulla base di un database dati che necessiterà ulteriore estensione futura, una forte correlazione tra IDEAL-RT e la prova HT-IDT, definita dalla seguente equazione:

$$RT = 405,192 \cdot IDL + 3,153 \quad (Formula\ 29)$$

Pertanto, la correlazione ottenuta suggerisce che l'IDEAL-RT può essere utilizzata come prova durante la progettazione delle miscele per valutare il potenziale di ormaiamento. Tale prova infatti rispetta molte delle caratteristiche desiderabili di una prova di ormaiamento, tra cui:

- Semplicità, ovvero non viene richiesta una strumentazione complessa;
- Praticità;
- Efficienza, cioè rapidità della prova;
- Costo dell'apparecchiatura;
- Ripetibilità, valutata attraverso il coefficiente CoV;
- Sensitività;
- Correlazione con le prestazioni in campo.

È importante evidenziare che la valutazione della variabilità dei risultati rappresenta un aspetto fondamentale nell'analisi di un qualsiasi parametro prestazionale, poiché un'elevata dispersione rende più difficile distinguere tra miscele con buone e cattive prestazioni. Per tale motivo si è valutata la variabilità dei risultati mediante il coefficiente di variazione CoV. Valori più bassi di CoV indicano una minore dispersione dei risultati e, quindi, una maggiore ripetibilità della prova. Tale coefficiente è stato calcolato con i

dati ottenuti dalla prova IDEAL-RT relativi all'indice RT, ottenendo un CoV compreso tra 0,07 % e 8,9%, con un valore medio pari a 4,1%. Mentre con i dati ottenuti dalla prova HT-IDT si è ottenuto un coefficiente di variazione compreso tra 1,8% e 6,9%, con un valore medio pari a 4,5% per il parametro IDT, invece per il CTindex si è ottenuto un $\text{CoV} = 3,3 \div 33,5\%$, con valore medio di 12,8%. In conclusione, i risultati ottenuti dalle due prove, relativi agli indici RT e IDT, mostrano che i campioni presentano livelli di ripetibilità sostanzialmente analoghi, entrambi sotto al 25% (valore ritenuto desiderabile per considerare una prova ripetibile).

I risultati ottenuti sono riferibili ai soli campioni cilindrici di diametro pari a 150 mm e lastre spesse 30 mm. Sebbene tali dimensioni siano generalmente utilizzate nella progettazione delle miscele secondo il metodo Superpave, in molti paesi il metodo di progettazione Marshall, basato su campioni di diametro pari a 100 mm, continua ad essere ampiamente utilizzato grazie alla sua semplicità e praticità. Inoltre, l'estrazione di carote di diametro pari a 100 mm direttamente dalla pavimentazione risulta essere più agevole per l'attività di controllo qualità. Potrebbe quindi essere utile, per avvalorare i risultati ottenuti, estendere tale ricerca a provini di diametro inferiore, dal momento che l'utilizzo di campioni di diametro differente può produrre risultati prestazionali diversi per una stessa miscela.

Un ulteriore aspetto interessante che potrebbe essere approfondito è il fenomeno del “rebound” dei provini compattati, precedentemente citato al Paragrafo 1.5 (*Stato dell'arte – Articoli e pubblicazioni*) in relazione allo studio proposto da A. J. Taylor et al. (2026). In tale studio è infatti emerso che tale fenomeno risulta essere un aspetto rilevante nelle miscele con additivi, andando ad influenzare la produzione dei campioni e i risultati ottenuti nelle prove.

Tra i possibili sviluppi futuri della presente ricerca, si propone l'ampliamento dell'attività sperimentale attraverso lo studio di un campione più numeroso e rappresentativo di miscele bituminose, caratterizzate da diverse tipologie di materiali costituenti. Questo approfondimento consentirebbe di verificare la robustezza della correlazione individuata e di estendere il campo di applicabilità. Inoltre, l'impiego di provini aventi diametri differenti permetterebbe di valutare l'influenza delle dimensioni del campione sulle prestazioni osservate, fornendo ulteriori elementi utili alla validazione dell'approccio metodologico adottato.

BIBLIOGRAFIA

A. Cannone Falchetto, E. Pasquini. *Laboratory of Materials for Transport Infrastructures* [slide del Corso]. Università degli Studi di Padova, A.A. 2024/25.

A. J. Taylor et al.. *Validation of Rapid Rutting Test Procedures Using Plant Mixes from the 2021 NCAT Test Track*. National Center for Asphalt Technology, 2026.

A.T. Papagiannakis. *Pavement Design and Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

Athanassios Nikolaides. “*Highway Engineering. Pavements, Materials and Control of Quality*”. Florida: Taylor & Francis Group, 2015.

C. Karcher. *Evaluation of the deformation resistance of asphalt mixes by cyclic compression tests*. In: Proceedings of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, 13-15 June 2012.

Felice A. Santagata. *Strade – Teoria e tecnica delle costruzioni stradali* (vol. 1-2). Milano (IT): Pearson, 2016.

G. Vamsikrishna e D. SinghV. Gavadakatla, S. Dharamveer. *Comparison of Rutting Resistance of Plant Produced Asphalt Mixes Using Hamburg Wheel Tracker and Surrogate Simple Performance Tests: IDEAL-RT and HT-IDT*. American Society of Civil Engineers, 2023.

G. Vamsikrishna e D. SinghV. Gavadakatla, S. Dharamveer. *Exploring potential of Marshall-RT as simple performance test to evaluate rutting resistance of asphalt mixtures*. Taylor & Francis Group, 2023.

G. Vamsikrishna et al.. V. Gavadakatla, D. Jagdish, S. Dharamveer. *Rutting and Cracking Performance of Asphalt Mixtures for 150 mm and 100 mm Diameter Samples Using Simple Performance Tests*. American Society of Civil Engineers, 2024.

I. Boz et al.. *Interlaboratory Study for the Indirect Tensile at High Temperature Test and Ideal Rutting Test*. Virginia Transportation Research Council, 2025.

I. Boz et al.. *Simple and Practical Tests for Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures in the Balanced Mix Design Process*. Virginia Transportation Research Council, 2023.

N. G. Elias et al.. *Rutting Mechanical Tests for Balanced Design of Airfield Asphalt Mixtures*. Federal Aviation Administration, 2024.

T. Bennert, E. Haas, E. Wass. *Indirect Tensile Test (IDT) to Determinate Ashphalt Mixture Performance Indicators during Quality Control Testing in New Jersey*. Transportation Research Record, 2018.

NORME

AASHTO PP 105-20: 2022. “Technical Subcommittee: 2d, Proportioning of Asphalt-Aggregate Mixtures”.

ASTM D6931-17: 2017. “Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures”.

ASTM D8225-19: 2019. “Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature”.

ASTM D8360-22: 2022. “Standard Test Method for Determination of Rutting Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Ideal Rutting Test”.

EN 12697-22: 2003. “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking”.

FGSV (2012). TP Asphalt-StB, Teil 25 B1: “Uniaxial cyclic compression test – Determination of the Deformation – behavior of rolled asphalt at Warmth”.

UNI-EN 12697-10: 2001. “Bituminous mixtures – Test methods. Part 10: Compactability”.

UNI-EN 12697-26: 2018. “Bituminous mixtures – Test methods. Part 26: Stiffness”.

UNI-EN 12697-31: 2007. “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor”.

UNI-EN 12697-39: 2012. “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 39: Binder content by ignition”.

UNI-EN 12697-5: 2018. “Bituminous mixtures – Test methods. Part 5: Determination of the maximum density”.

UNI-EN 12697-6: 2020. “Bituminous mixtures – Test methods. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens”.

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1: elenco delle pubblicazioni analizzate</i>	<i>17</i>
<i>Tabella 2 – Materiali</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 3 – Estrazione del bitume.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabella 4 - Densità massima (metodo volumetrico)</i>	<i>32</i>
<i>Tabella 5: Densità massima (metodo matematico)</i>	<i>33</i>
<i>Tabella 6: Calcolo della densità degli aggregati</i>	<i>34</i>
<i>Tabella 7: Valori calcolati di M</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 8: calcolo dei vuoti effettivi</i>	<i>42</i>
<i>Tabella 9: Valori calcolati di m</i>	<i>43</i>
<i>Tabella 10: calcolo dei vuoti effettivi</i>	<i>44</i>
<i>Tabella 11: Risultati prova IDEAL-RT (Perugia)</i>	<i>47</i>
<i>Tabella 12: Valori indici miscele di belgrado</i>	<i>50</i>
<i>Tabella 13: Risultati prova HT-IDT (Padova e perugia)</i>	<i>56</i>
<i>Tabella 14: Risultati prova ht-idt (belgrado)</i>	<i>57</i>
<i>Tabella 15: Valori dei parametri IDT e ct_{index}</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 16: Risultati ottenuti per la prova CCT</i>	<i>66</i>
<i>Tabella 17: Valori prova Wheel Track (Padova).....</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 18: Valori calcolati di WTS e PRD (miscele di Padova)</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 19: Valori calcolati di WTS e PRD (miscele di Belgrado)</i>	<i>72</i>
<i>Tabella 20: valori dei moduli alla temperatura di 20°C</i>	<i>78</i>
<i>Tabella 21: Valori dei moduli alla temperatura di 50°C.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabella 22: valori prova HT-idt (PS).....</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 23: valore rr per l'indice idt (PS)</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 24: valori prova ht-itd (pm)</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 25: Valore rr per l'indice idt (pm).....</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 26: Valori prova HT-IDT (LID)</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 27: Valore rr per l'indice idt (LID)</i>	<i>82</i>
<i>Tabella 28: Valori prova HT-IDT (TR)</i>	<i>82</i>
<i>Tabella 29: Valore rr per l'indice idt (TR).....</i>	<i>82</i>
<i>Tabella 30: valori prova ht-idt (miscele belgrado)</i>	<i>83</i>
<i>Tabella 31: Valori RR prova CCT (miscele Perugia).....</i>	<i>84</i>
<i>Tabella 32: Valori RR prova CCT (miscele Belgrado)</i>	<i>85</i>
<i>Tabella 33: valori rr prova ideal-rt (miscele Perugia)</i>	<i>86</i>

<i>Tabella 34: valori rr prova ideal-rt (miscela Belgrado).....</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 35: risultati prove.....</i>	<i>93</i>

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1: Schema della metodologia sperimentale</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2: composizione interna del conglomerato bituminoso</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3: Diagramma di movimento del provino di prova (Fonte: UNI EN 12697-31).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4: Compattatore giratorio presente presso il laboratorio dell'Università di Padova</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5: Esempio provino ottenuto con il compattatore giratorio</i>	<i>37</i>
<i>Figura 6: Variazione della percentuale di vuoti in funzione del numero di giri.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 7: Curva di addensamento PS</i>	<i>39</i>
<i>Figura 8: curva di addensamento pm</i>	<i>40</i>
<i>Figura 9: curva di addensamento lid.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10: curva di addensamento tr</i>	<i>41</i>
<i>Figura 11: Compattatore a rullo presente presso il laboratorio dell'Università di Padova</i>	<i>42</i>
<i>Figura 12: Apparecchiatura prova ideal-rt.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 13: Curva carico-spostamento provini miscela PS</i>	<i>47</i>
<i>Figura 14: Curva carico-spostamento provini miscela PM.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 15: Curva carico-spostamento provini miscela LID</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16: Curva carico-spostamento provini miscela TR.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 17: apparecchiatura prova HT-idt.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 18: Centralina utilizzata per la prova</i>	<i>52</i>
<i>Figura 19: curva carico-spostamento. Fonte: AStm D8225-19</i>	<i>53</i>
<i>Figura 20: Provino a seguito della prova HT-IDT.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 21: Valore medio idt delle miscele analizzate a pD e pG.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 22: Valore medio indice IDT delle miscele analizzate a BG</i>	<i>59</i>
<i>Figura 23: valore medio del ct_{index} delle miscele analizzate a pd e pb.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 24: valore medio del ct_{index} delle miscele analizzate a bg.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 25: Curva carico-dispersione provini miscela PS</i>	<i>61</i>
<i>Figura 26: Curva carico-dispersione provini miscela PM</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27: Curva carico-dispersione provini miscela LID</i>	<i>61</i>
<i>Figura 28: Curva carico-dispersione provini miscela TR</i>	<i>62</i>
<i>Figura 29: Tipica curva di creep. Fonte: Karcher C. (2012).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 30: Curva di creep della miscela Ps.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 31: Curva di creep della miscela pm</i>	<i>66</i>
<i>Figura 32: curva di creep della miscela lid</i>	<i>67</i>
<i>Figura 33: curva di creep della miscela tr.....</i>	<i>67</i>

<i>Figura 34: curva di creep della miscela 8</i>	<i>67</i>
<i>Figura 35: Prova wheel track (Padova)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 36: Lastra PS a seguito della prova WT.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 37: valori PRD (Padova)</i>	<i>71</i>
<i>Figura 38: Valori WTS (Padova)</i>	<i>71</i>
<i>Figura 39: Valori prd (belgrado)</i>	<i>72</i>
<i>Figura 40: valori wts (belgrado)</i>	<i>73</i>
<i>Figura 41: Attrezzatura per la prova.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 42: Forma della curva di carico (Fonte: EN 12697-26: 2018. Annesso C)</i>	<i>77</i>
<i>Figura 43: Esempio schermata dopo i cinque impulsi di carico</i>	<i>77</i>
<i>Figura 44: Valori dei moduli</i>	<i>79</i>
<i>Figura 45: Relazione tra RT_{index} e $RT_{index, 7\%}$</i>	<i>92</i>
<i>Figura 46: Correlazione tra rt e wts</i>	<i>94</i>
<i>Figura 47: Correlazione tra rt e prd</i>	<i>94</i>
<i>Figura 48: Correlazione tra RT ed ε.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 49: correlazione tra rt ed ε^*.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 50: correlazione tra rt e $itsm$</i>	<i>96</i>
<i>Figura 51: Correlazione IDT e RT</i>	<i>96</i>
<i>Figura 52: Correlazione tra rt e ct_{index}</i>	<i>97</i>
<i>Figura 53: correlazione $Ht-idt$ e $ideal-rt$.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 54: PSD - RT_{index} vs CT_{index}.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 55: sensitività rispetto al tipo di miscela (WTS)</i>	<i>99</i>
<i>Figura 56: sensitività rispetto al tipo di miscela (PRD)</i>	<i>100</i>
<i>Figura 57: sensitività rispetto al tipo di miscela (ε).....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 58: sensitività rispetto al tipo di miscela (ε^*)</i>	<i>101</i>
<i>Figura 59: sensitività rispetto al tipo di miscela (IDT)</i>	<i>102</i>
<i>Figura 60: Sensitività rispetto al tipo di miscela (ct_{index})</i>	<i>102</i>
<i>Figura 61: Sensitività rispetto ai vuoti (RT)</i>	<i>103</i>
<i>Figura 62: Sensitività rispetto ai vuoti (e).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 63: Sensitività rispetto ai vuoti (e^*)</i>	<i>104</i>
<i>Figura 64: Sensitività rispetto ai vuoti (prd)</i>	<i>104</i>
<i>Figura 65: Sensitività rispetto ai vuoti (WTS)</i>	<i>104</i>
<i>Figura 66: Sensitività rispetto ai vuoti (idt).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 67: sensitività rispetto ai vuoti (ct_{index}).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 68: Sensitività rispetto ai vuoti (ITSM).....</i>	<i>105</i>

<i>Figura 69: Sensitività rispetto ai vuoti (RT, diviso per miscela).....</i>	<i>107</i>
---	------------

INDICE DELLE FORMULE

(Formula 1).....	24
(Formula 2).....	31
(Formula 3).....	31
(Formula 4).....	31
(Formula 5).....	32
(Formula 6).....	32
(Formula 7).....	33
(Formula 8).....	34
(Formula 9).....	36
(Formula 10).....	38
(Formula 11).....	38
(Formula 12).....	43
(Formula 13).....	45
(Formula 14).....	46
(Formula 15).....	46
(Formula 16).....	52
(Formula 17).....	53
(Formula 18).....	53
(Formula 19).....	54
(Formula 20).....	55
(Formula 21).....	63
(Formula 22).....	64
(Formula 23).....	68
(Formula 24).....	68
(Formula 25).....	74
(Formula 26).....	75
(Formula 27).....	75
(Formula 12).....	80
(Formula 28).....	109