



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura - Area Strade

***ANALISI TENSODEFORMATIVA DI
PAVIMENTAZIONI AUTOSTRADALI SOGGETTE
A CARICHI MOBILI***

***STRUCTURAL ANALYSIS OF MOTORWAY PAVEMENTS
SUBJECTED TO MOVING LOADS***

Relatore
Prof. Ing. Andrea GRAZIANI

Studente
Antonello SQUICCIARINO

Correlatore
Prof. Ing. Francesco CANESTRARI

a.a. 2023/2024

INDICE

Introduzione	1
Monitoraggio della Rete Stradale	3
1.1 Manutenzione delle infrastrutture stradali	3
1.1.1 Legame tra progettazione e manutenzione.....	3
1.1.2 Obiettivi della manutenzione stradale.....	4
1.1.3 Fasi del processo di manutenzione.....	4
1.1.3 Sistema di gestione della manutenzione	5
1.1.4 Organizzazione del sistema	5
1.2 Pavement management system	9
1.2.1 Network Level Management	11
1.2.1 Project Level.....	12
1.3 Monitoraggio della portanza delle pavimentazioni	12
1.4 Falling Weight Deflectometer	14
1.4.1 Principio di misurazione	15
1.5 MOST- Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile	16
Traffic Speed Deflectometer	19
2.1 Dalle misure puntuali a quelle in movimento	20
2.1.1 Sviluppo e prime applicazioni del TSD.....	21
2.2 Descrizione dell'apparecchiatura	25
2.2.1 Principio di misura	26
2.2.2 Dalle pendenze alle deflessioni	27
2.2.3 Dalle deflessioni alle condizioni	29
2.3 Utilizzo del TSD per il monitoraggio a livello di rete	30
2.3.1 L'approccio danese	31
2.4 Stima vita utile residua da misure TSD	32
Obiettivi	38
3.1 Obiettivi specifici	38
SOFTWARE	40
4.1 KENPAVE	40
4.1.1 Esempio di analisi elastica di una pavimentazione flessibile a comportamento lineare	41
4.1.2 Inserimento dei dati in INPUT	42
4.1.3 Estrazione dei dati OUTPUT	50
4.2 3D-MOVE ANALYSIS	53
4.2.1 Installare 3D-MOVE ANALYSIS.....	53

4.2.2 Disinstallare 3D-MOVE ANALYSIS.....	54
4.2.3 Interfaccia grafica di 3D-MOVE ANALYSIS.....	54
4.2.4 Inserimento dati nel 3D-MOVE ANALYSIS.....	56
4.2.4.1 PROJECT	58
4.2.4.2 INPUTS	60
4.2.5 ELABORAZIONE DEI DATI OUTPUT.....	92
4.2.5.1 Input Summary	95
4.2.5.2 Output Summary	96
Analisi Elastica	101
5.1 Pavimentazione flessibile “classica”	101
5.1.1 Dati di input.....	101
5.1.2 Risultati	103
5.1.3 Analisi dei risultati	105
5.2 Pavimentazione semi-rigida “Autostradale” con usura chiusa	106
5.2.1 Dati input	106
5.2.2 Risultati	108
5.2.3 Analisi dei risultati	111
5.2.3.1 Stima dei moduli di rigidezza.....	112
5.2.3.2 Stima della deformazione a trazione alla base dello strato legato	116
5.2.4 Analisi di regressione non lineare	117
5.2.5 Analisi di regressione lineare multipla	120
5.3 Pavimentazione semi-rigida “Autostradale” con usura drenante	122
5.3.1 Dati input	122
5.3.2 Risultati	124
5.3.3 Analisi Dei Risultati	127
5.3.3.1 Stima dei moduli di rigidezza.....	127
5.3.3.2 Stima della deformazione a trazione alla base dello strato legato	130
5.3.4 Analisi di regressione lineare multipla	131
Analisi Viscoelastiche	133
6.1 Pavimentazione Autostradale	133
6.1.1 Dati in input	133
6.1.2 Risultati	138
6.1.2.1 deflessioni superficiali	138
6.1.2.2 deformazione di trazione alla base dello strato legato	140
Conclusioni	143
Bibliografia	145

Sitografia	147
Ringraziamenti	148

Introduzione

Il mantenimento dell'efficienza delle infrastrutture stradali è essenziale per garantire un servizio adeguato in termini di sicurezza e comfort per gli utenti. Le opere di ingegneria stradale, caratterizzate da una durata tecnica limitata definita dal concetto di vita utile, richiedono l'implementazione di un processo sistematico di monitoraggio del livello di servizio. Questo monitoraggio è cruciale nella pianificazione della manutenzione, poiché fornisce i dati necessari per valutare come il livello di servizio evolve nel tempo.

Sebbene ci siano molteplici ambiti nella pianificazione della manutenzione stradale, la presente ricerca si interessa del Network Level Management (gestione a livello di rete) delle pavimentazioni. In particolare, si focalizza l'attenzione sul monitoraggio della funzione strutturale, attraverso la valutazione della capacità portante. Questo parametro è fondamentale nel sistema di gestione delle pavimentazioni (Pavement Management Systems - PMS), poiché consente di identificare le sezioni stradali che necessitano di interventi specifici. Tra le apparecchiature di misura della portanza più diffuse a livello mondiale rientra il Falling Weight Deflectometer (FWD). Tuttavia, a fronte della sua indubbia efficacia, va considerata la difficoltà connessa all'esecuzione delle prove, in quanto la strumentazione necessita di stazionare in corrispondenza del punto di misura.

Un importante progresso nella tecnologia di monitoraggio della capacità portante delle pavimentazioni è rappresentato dal Traffic Speed Deflectometer (TSD). Progettato per operare in condizioni di traffico reale, il TSD consente di valutare le deflessioni della pavimentazione senza interrompere il flusso veicolare. Grazie all'integrazione di tecnologie avanzate, come sistemi di rilevamento automatico e sensori ad alta precisione, il TSD supera i limiti delle tecniche tradizionali, garantendo un rendimento molto più alto rispetto al FWD.

L'obiettivo principale di questa ricerca è quello di estendere la metodologia di stima della vita utile residua delle pavimentazioni a livello di rete attraverso misure TSD, considerando il

comportamento tenso-deformativo delle pavimentazioni semi-rigide. Per tale scopo, sono stati definiti obiettivi specifici che mirano a definire relazioni tra la deformazione alla base dello strato di conglomerato bituminoso e il suo modulo elastico con i parametri del bacino di deflessione, ottenuti da misure FWD e TSD. Inoltre, si cercherà un coefficiente di correzione per i parametri del bacino che tenga conto dell'effetto della temperatura. Saranno eseguite simulazioni in campo elastico con il software KENPAVE e in campo viscoelastico, con l'ausilio del software 3D-MOVE ANALYSIS.

La presente tesi è strutturata come segue:

- nel Capitolo 1 viene introdotto il monitoraggio delle infrastrutture stradali, soffermandosi sugli obiettivi della manutenzione, il sistema di gestione utilizzato con un focus sul monitoraggio e il metodo strumentale (FWD) per la valutazione della portanza;
- nel Capitolo 2 è descritta l'apparecchiatura TSD, il principio di funzionamento e l'utilizzo per il monitoraggio al Network Level e la procedura per la stima della vita utile a partire da misure TSD;
- nel Capitolo 3 vengono presentati gli obiettivi della Tesi;
- nel Capitolo 4 sono illustrati i software KENPAVE e 3D-MOVE ANALYSIS;
- nel Capitolo 5 vengono presentate le analisi elastiche;
- nel capitolo 6 sono descritte le analisi viscoelastiche.

Capitolo 1

Monitoraggio della Rete Stradale

Il processo di monitoraggio rientra nell'ambito delle attività previste ai fini della pianificazione della manutenzione di una infrastruttura stradale. Esso ha l'obiettivo di acquisire i dati necessari per valutare l'evoluzione delle prestazioni nel tempo. In particolare, le informazioni raccolte rappresentano uno strumento indispensabile, riconosciuto anche a livello normativo, per il mantenimento dei livelli di efficienza richiesti in relazione alla tipologia di strada esaminata, ottimizzando le risorse economiche disponibili nel rispetto dei vincoli esistenti (per esempio traffico, clima, ambiente). Sebbene i settori della pianificazione della manutenzione stradale siano molteplici e sono riconducibili a diversi campi di applicazione, nel presente capitolo si focalizza l'attenzione sulle pavimentazioni. In particolare, sul monitoraggio delle prestazioni strutturali attraverso la valutazione della capacità portate. Tale parametro, che descrive il livello di efficienza strutturale delle pavimentazioni, è tipicamente impiegato nel processo di gestione denominato *Pavement Management Systems* (PMS)

1.1 Manutenzione delle infrastrutture stradali

1.1.1 Legame tra progettazione e manutenzione

La manutenzione stradale è l'insieme di operazioni e attività utili a conservare le caratteristiche funzionali e strutturali di un'infrastruttura stradale. Non è possibile pensare che un'arteria stradale abbia una durata infinita. Esistono pertanto dei criteri, posti alla base della fase di progettazione, che determinano la validità dell'opera, ossia che i costi di

costruzione, esercizio e manutenzione della sovrastruttura debbano essere della minore entità possibile.

Si definisce vita utile di un'opera stradale, l'intervallo di tempo tra l'apertura al traffico della strada fino all'anno in cui si presentano degradazioni strutturali di valore limite, altresì definita attraverso il numero di cicli di carico assunti dal valore limite ammissibile di degradazioni strutturali [29].

Il mantenimento o ripristino delle caratteristiche superficiali del manto stradale di regolarità, rugosità e rumorosità siano operazioni che interessano gli strati superficiali, che compromettono il traffico veicolare in maniera parziale o per periodi di breve durata, per le caratteristiche strutturali di portanza, l'interferenza sulla circolazione stradale diventa importante e può arrivare addirittura ad inibirla.

1.1.2 Obiettivi della manutenzione stradale

La manutenzione stradale ha come obiettivo quello di garantire che l'infrastruttura durante la sua vita utile mantenga la funzionalità, l'efficienza, la sicurezza e il valore economico che aveva al momento della costruzione. Gli interessi da salvaguardare riguardano:

- gli utenti della strada, per i quali la manutenzione dovrebbe garantire che le condizioni funzionali dell'infrastruttura non scendano al di sotto di un livello minimo accettabile;
- la collettività, in quanto "proprietaria" del patrimonio viario;
- la salvaguardia dell'ambiente in quanto i lavori dovrebbero essere eseguiti rispettando le esigenze di eco-compatibilità;
- la sicurezza, poiché l'incolumità dei lavoratori e degli utenti della strada deve essere lo scopo principale di ogni azione manutentiva.

1.1.3 Fasi del processo di manutenzione

Le fasi principali della manutenzione stradale sono il monitoraggio (inclusivo di rilievi e analisi), la pianificazione tecnico-economica delle attività e la fase attuativa (inclusiva di progettazione, manutenzione ecc.). Tali attività sono per lo più interdipendenti e solo parzialmente sovrapponibili. In dettaglio, il complessivo processo tecnico-economico è composto da:

- monitoraggio della rete stradale, delle condizioni ambientali e del traffico;

- pianificazione a livello di rete mediante la definizione degli obiettivi e delle condizioni al contorno (budget, in primis). La pianificazione deve riguardare anche:
 - la gestione nel breve e nel lungo periodo (con riduzione dei costi degli utenti, miglioramento della sicurezza, miglioramento della funzionalità della rete);
 - lo stanziamento delle risorse necessarie;
 - la definizione delle strategie di manutenzione;
 - la definizione degli standard prestazionali dell'infrastruttura;
- programmazione degli interventi (definizione di un elenco dei progetti caratterizzati da differenti livelli di priorità);
- progettazione degli interventi;
- attuazione del piano di manutenzione;
- valutazione sistematica dei risultati.

1.1.3 Sistema di gestione della manutenzione

Il patrimonio da mantenere è costituito sia da opere di nuova costruzione che di opere esistenti, delle quali non si conosce tutta la storia progettuale e realizzativa, pertanto sono necessarie continue indagini. Esistono sistemi di gestione dell'infrastruttura stradale come l'AMS (*Asset Management System*) che contengono il censimento di tutte le opere, le descrizioni, ed indagini in tempo reale attraverso un sistema codificato per coordinare e controllare tutte le operazioni e le attività coinvolte, nel rispetto degli obiettivi, dei vincoli esistenti, dotato di un algoritmo che garantisce la migliore utilizzazione delle risorse disponibili e il massimo beneficio per la collettività. L'OCDE (*Organization for Economic Co-operation and Development*) invece, ha tracciato uno schema ideale di un sistema di gestione del patrimonio viario creando però due sistemi paralleli, per le pavimentazioni "*Pavement Management Systems*" (PMS) e per i ponti "*Bridge Management Systems*" (BMS), che sono alla base del sistema attualmente utilizzato in Italia da ANAS spa. In questo capitolo punteremo l'attenzione sul sistema di gestione delle pavimentazioni (PMS).

1.1.4 Organizzazione del sistema

Nella gestione e, quindi, nel monitoraggio di una rete stradale emerge prioritariamente l'esigenza di classificare tutti gli elementi che la compongono in **rami e tronchi o sezioni**.

Un ramo stradale è definito tale in base alle funzioni svolte, per esempio suddivisione tra strade di classe diversa o tra strade e parcheggi.

A sua volta un ramo stradale, tenuto conto dell'estensione a volte considerevole, può essere suddiviso in uno o più tronchi omogenei sulla base di criteri utili ai fini della gestione più semplice della rete.

I criteri che possono essere adottati ai fini della suddivisione di un ramo stradale in tronchi omogenei fanno riferimento ai seguenti parametri:

- **tipologia del corpo stradale;** una prima suddivisione può essere fatta andando a separare i tratti costruiti in rilevato e quelli in trincea;
- **opere d'arte;** considerare tronchi omogenei quelle sezioni stradali su ponti, viadotti e gallerie;
- **composizione strutturale;** spessori e materiali impiegati nella pavimentazione dovrebbero essere gli stessi nell'ambito di uno stesso tronco omogeneo. Ai fini dell'utilizzo di tale parametro, che rappresenta il più importante criterio di suddivisione delle pavimentazioni stradali, si può fare riferimento ai dati di progetto relativi alla costruzione e ai successivi interventi di manutenzione e/o risanamento. In alternativa, in presenza di informazioni carenti, occorre prevedere una campagna di rilievi mediante carotaggi abbinati a tecniche di indagine non distruttive;
- **dati storici di costruzione;**
- **traffico;** il volume e la composizione del traffico veicolare dovrebbero essere uniformi all'interno di una sezione omogenea, con particolare riferimento alla componente relativa ai veicoli commerciali;
- **dati storici degli incidenti;**
- **classificazione funzionale;** potrebbe accadere che una stessa strada subisca una variazione della funzione svolta nell'ambito della rete di appartenenza;
- **stato della pavimentazione;** una volta individuati tronchi omogenei sulla base dei criteri precedenti, è possibile procedere a ulteriori suddivisioni qualora si riavvisassero considerevoli variazioni nello stato della pavimentazione tradotto da una diversa estensione e/o dalla presenza di diverse tipologie di dissesti;
- **dati ambientali;**
- **trattamento statistico e opportuni parametri** (indicatori di stato IS) rilevati mediante apparecchiature ad alto rendimento.

Con riferimento a quest'ultimo criterio si evince che il monitoraggio strumentale può restituire una notevole mole di dati, gestibile con opportuni database, che consente la suddivisione in tronchi omogenei di ciascun ramo della rete sulla base di proprietà rappresentative della funzionalità dell'opera stradale. Infatti, in tutti i settori di applicazione della pianificazione della manutenzione stradale e in particolare nel caso delle pavimentazioni stradali, risultano individuabili specifiche prestazioni che garantiscono il raggiungimento di adeguata standard di funzionalità ed efficienza da parte dell'infrastruttura. In particolare, per ciascun tronco omogeneo, tali standard sono definiti da opportuni livelli dipendenti dalla rilevanza assunta nel contesto della rete di appartenenza e dalle possibilità organizzative ed economiche dell'ente di gestione. Da un punto di vista operativo, le suddette prestazioni sono individuate da un numero n di parametri detti *indicatori di Stato* IS_N che esprimono una misura quantitativa variabile nel tempo, riferita a un preciso istante della vita utile. Gli indicatori di Stato sono acquisiti su strada nel corso di specifici rilievi strumentali, i quali possono essere distinti in due tipologie:

1. Rilievi globali estesi a tutta la rete mediante l'ausilio di apparecchiature ad alto rendimento in grado di eseguire un elevato numero di misure in poco tempo, evitando di interrompere l'esercizio dell'infrastruttura grazie all'impiego di strumenti installati sui veicoli mobili. Le tecnologie e le attrezzature richieste per l'esecuzione di tali rilievi risultano al momento appannaggio quasi esclusivamente delle reti autostradali, sebbene l'innovazione tecnologica abbia consentito un abbattimento dei costi e un conseguente trasferimento delle conoscenze anche a favore di antenati di reti di livello inferiore;
2. Rilievi puntuali utilizzati per stabilire le cause del degrado in zone limitate, individuate nel corso di rilievi globali, oppure adottati localmente per il monitoraggio periodico di punti critici di reti stradali gestiti da enti minori.

Da quanto premesso, discende che, a seguito dell'identificazione della rete da gestire, il passo successivo da compiere ai fini della realizzazione di un efficiente sistema di gestione della manutenzione, prevede la costituzione di un archivio informatizzato (banca dati). La funzione di tali archivi consiste nel rendere possibile l'elaborazione delle informazioni necessarie ai fini di una corretta pianificazione delle attività volte al mantenimento dei livelli di efficienza prefissati. La struttura della banca dati che presenta i maggiori vantaggi nelle modalità di conservazione, trattamento e ricerca delle informazioni in essa contenute, è

quella tipo relazionale caratterizzata da un insieme di tabelle in cui le relazioni tra i dati sono governate da teorie matematiche. Una volta definita la struttura della banca dati, è possibile risalire all'evoluzione temporale degli indicatori di Stato attraverso la ripetizione periodica dei rilievi. La rappresentazione di tale evoluzione (Figura 1.1) avviene mediante l'assunzione di opportuni strumenti di analisi in grado di approssimare al meglio, su base statistica, l'andamento delle misure periodiche, restituendo delle funzioni che prendono il nome di curva di decadimento. A ciascun indicatore è possibile associare pertanto una legge analitica di evoluzione temporale, rappresentativa della progressiva perdita di efficienza, che costituisce uno strumento utile per la previsione della durata residua a esso riconducibile.

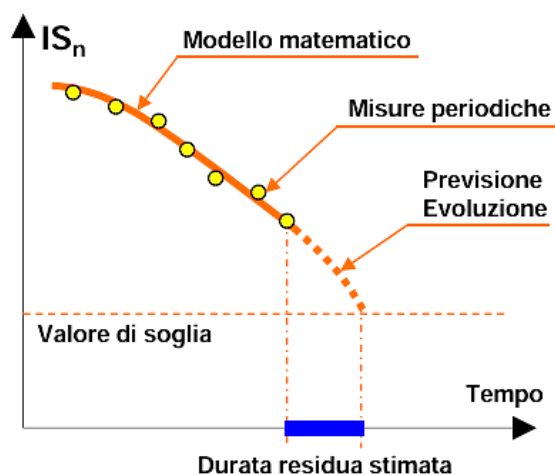


Figura 1.1 curva di decadimento

L'obiettivo del monitoraggio consiste nel ricavare, per ogni elemento della rete, l'insieme della durata residua associata agli indicatori di stato, allo scopo di risalire a una scala di priorità di intervento definita sulla base di opportuni valori di soglia rappresentativi di livelli di efficienza prestabiliti. È evidente che il valore degli indicatori di stato corrispondente alla soglia di intervento effettivo varia con il tipo di strada, con i fondi disponibili e con i vincoli esistenti, traffico, clima, ambiente. In condizioni ideali tale valore limite dovrebbe coincidere con la soglia di intervento ottimale (Figura 1.2) a cui compete il più conveniente rapporto benefici costi.

In ogni caso devono essere scongiurate situazioni che prevedono il superamento della soglia di sicurezza caratterizzata da valori degli indicatori di Stato al di sotto dei quali risulterebbero compromessi gli standard di sicurezza con anomali incrementi dei valori medi di incidentalità. Con riferimento alla Figura 1.2, si osserva che i valori di soglia in essi

rappresentati, per quanto detto, possono avere un ordine diverso da quello indicato e che la forma della curva di decadimento assume un andamento puramente qualitativo, anche se di norma si assiste a un decremento dell'indicatore di Stato che più proporzionale al passare del tempo, tale da determinare una concavità tipicamente rivolta verso il basso. Infine, è opportuno sottolineare che i valori post-intervento dell'indicatore di stato *IS* possono raggiungere livelli superiori a quello registrato all'inizio del processo di monitoraggio (ottenuto sulla base dei dati storici di riferimento oppure misurato nel corso del primo rilievo). Grazie, per esempio, all'adozione di tecniche di intervento più efficienti e/o all'impiego di materiali innovativi.

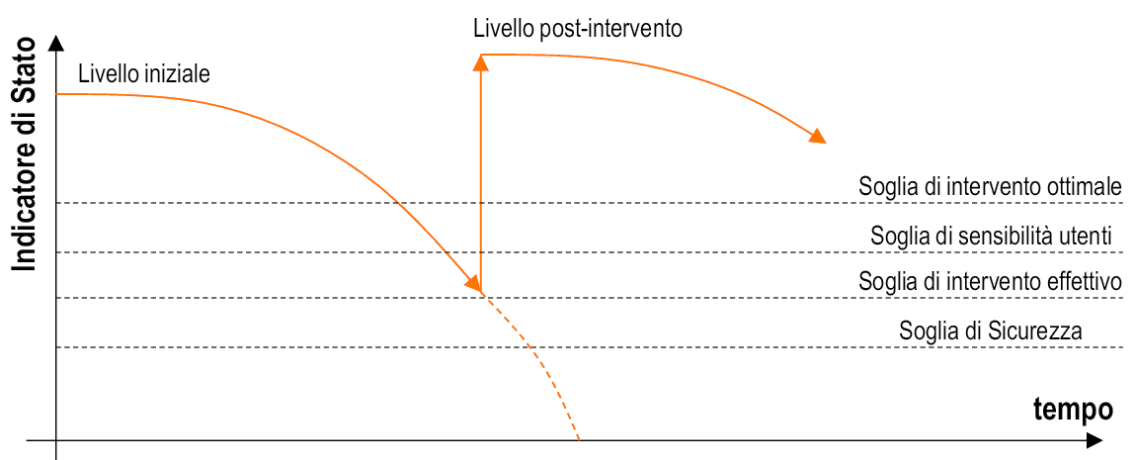


Figura 1.2 Valori di soglia

Oltre al rilievo strumentale degli indicatori di stato, altrettanto preziosi ai fini del monitoraggio di una rete stradale, può risultare un'analisi basata su tecniche di rilievo visivo. Tale analisi prevede l'adozione di processi standardizzati di riconoscimento visivo delle possibili tipologie di degradazioni, oppure classificati in specifici cataloghi, in genere integrati dalle descrizioni qualitative relative all'estensione e alla severità del degrado.

1.2 Pavement management system

Il *Pavement Management System* (PMS) è un insieme di strumenti, metodologie e procedure progettati per gestire e ottimizzare le pavimentazioni stradali. Questo sistema fornisce supporto decisionale per la pianificazione, la progettazione, la costruzione, la manutenzione e la riabilitazione delle pavimentazioni, mirando a garantire sicurezza, efficienza e durata nel tempo. Di seguito sono descritti i principali elementi e funzioni di un PMS:

1. Raccolta Dati:

- **Inventario delle Pavimentazioni:** Creazione di una banca dati che include informazioni sulle caratteristiche fisiche, geometriche e strutturali delle pavimentazioni;
- **Valutazione della Condizione:** Utilizzo di metodi di ispezione visiva e tecniche non distruttive per valutare le condizioni attuali delle pavimentazioni (ad esempio, crepe, avvallamenti, usura).

2. Analisi e Modelli Predittivi:

- **Modelli di Degrado:** Sviluppo di modelli che prevedono come le pavimentazioni si degraderanno nel tempo in base a fattori come il traffico, le condizioni climatiche e le caratteristiche dei materiali;
- **Analisi Costi-Benefici:** Valutazione delle diverse opzioni di intervento in base ai costi e ai benefici attesi.

3. Pianificazione degli Interventi:

- **Prioritizzazione degli Interventi:** Identificazione e classificazione degli interventi necessari in base alla gravità delle condizioni e alle risorse disponibili;
- **Programmazione:** Sviluppo di piani a lungo termine per la manutenzione e la riabilitazione delle pavimentazioni.

4. Implementazione e Monitoraggio:

- **Esecuzione degli Interventi:** Coordinamento e gestione delle attività di manutenzione e riabilitazione;
- **Monitoraggio delle Prestazioni:** Valutazione continua delle condizioni delle pavimentazioni post-intervento per garantire l'efficacia delle azioni intraprese.

Il Pavement Management System è uno strumento cruciale per i gestori delle pavimentazioni. Grazie all'integrazione di dati, analisi e pianificazione strategica, il PMS contribuisce a garantire che le reti stradali siano sicure, efficienti e sostenibili nel lungo termine. Possiamo dividere il PMS in due livelli generali:

- 1) Network Level (livello di rete);
- 2) *Project Level* (livello di progetto).

1.2.1 Network Level Management

Il *Network Level Management* (gestione a livello di rete) si riferisce all'approccio alla gestione della pavimentazione che considera l'intera rete stradale invece che singoli tronchi omogenei. Questo livello di analisi è fondamentale per la pianificazione strategica e l'allocazione delle risorse, consentendo di prendere decisioni informate basate su una visione globale delle condizioni delle pavimentazioni. Di seguito, sono elencate alcune delle caratteristiche chiave del Network Level Management:

1. **Raccolta Dati Aggregati:** Informazioni raccolte su tutte le sezioni della rete, compresi dati sulle condizioni delle pavimentazioni, volumi di traffico e caratteristiche strutturali.
2. **Analisi delle Prestazioni della Rete:** Valutazione delle prestazioni complessive della rete stradale, considerando fattori come la sicurezza, il comfort di guida e l'efficienza del traffico.
3. **Prioritizzazione degli Interventi:** Identificazione delle aree più critiche della rete che necessitano di interventi di manutenzione o riabilitazione, sulla base di criteri come il grado di deterioramento e l'importanza strategica delle strade.
4. **Pianificazione a Lungo Termine:** Sviluppo di piani di manutenzione e riabilitazione che considerano l'evoluzione delle condizioni della rete nel tempo e le esigenze future di traffico.

Il Network Level Management ha inoltre, il vantaggio di:

- **Ottimizzazione delle Risorse:** permette di allocare le risorse in modo più efficace, massimizzando l'impatto degli investimenti;
- **Decisioni Strategiche:** fornisce una visione d'insieme che aiuta a prendere decisioni strategiche, come la pianificazione di nuovi investimenti o l'aggiornamento delle priorità di manutenzione;
- **Valutazione del Rendimento:** facilita la valutazione del rendimento complessivo della rete, aiutando a identificare aree di miglioramento e a monitorare i progressi nel tempo.

In conclusione, il Network Level Management è essenziale per una gestione efficace delle pavimentazioni, permettendo di vedere oltre le singole strade e considerare l'interazione tra diverse sezioni della rete. Attraverso analisi e pianificazione strategica, le agenzie stradali

possono garantire che le loro risorse siano utilizzate in modo ottimale, migliorando la qualità e la sicurezza delle infrastrutture stradali nel lungo termine.

1.2.1 Project Level

Il *Project Level Management* (gestione a livello di progetto) si riferisce all'approccio alla gestione della pavimentazione che si concentra su specifiche sezioni stradali o progetti di costruzione. Questo livello di analisi è cruciale per prendere decisioni dettagliate riguardo a interventi di manutenzione, riabilitazione o nuova costruzione, considerando le caratteristiche uniche e le condizioni di ciascun progetto. Vediamo alcune caratteristiche del *Project Level Management* :

1. **Analisi Dettagliata delle Condizioni:** raccolta e valutazione di dati specifici riguardanti le condizioni fisiche e strutturali della pavimentazione, come fessure, avvallamenti e usura;
2. **Valutazione delle Prestazioni Locali:** analisi delle prestazioni della pavimentazione in relazione a fattori locali, inclusi il tipo di traffico, le condizioni climatiche e i materiali utilizzati;
3. **Progettazione degli Interventi:** sviluppo di piani dettagliati per interventi di manutenzione, riabilitazione o costruzione, specificando le tecniche, i materiali e le tempistiche da utilizzare;
4. **Monitoraggio Post-Intervento:** valutazione delle condizioni della pavimentazione dopo l'esecuzione degli interventi per garantire che gli obiettivi siano stati raggiunti.

Il *Project Level Management* è essenziale per una gestione efficace con interventi mirati delle pavimentazioni consentendo di affrontare in modo specifico le problematiche di un particolare tronco stradale, migliorando l'efficacia degli interventi, ottimizzando i costi, evitando così spese inutili per manutenzioni non necessarie.

Attraverso un'analisi approfondita e una progettazione dettagliata, le agenzie stradali possono garantire che ogni intervento sia realizzato in modo ottimale, contribuendo a migliorare la qualità e la sicurezza delle infrastrutture stradali.

1.3 Monitoraggio della portanza delle pavimentazioni

Per la determinazione pratica della portanza di una pavimentazione, è fondamentale definire le condizioni al contorno, che comprendono le modalità di applicazione delle sollecitazioni e la misurazione dei cedimenti. Osservando i fenomeni generati dal transito dei veicoli, si può dedurre che tali effetti possono essere riprodotti sperimentalmente per sviluppare un metodo pratico di misura della portanza.

Il monitoraggio delle condizioni strutturali della pavimentazione in esercizio è efficacemente realizzato mediante tecniche non distruttive per la misura della deflessione superficiale, note come *Non Destructive Testing* (NDT). Queste tecniche sono sempre più adottate dai gestori delle reti stradali grazie a numerosi vantaggi, tra cui la rapidità di esecuzione, l'accessibilità economica e la riduzione delle interferenze sul traffico esistente.

A differenza delle tecniche distruttive, che comportano il prelievo di campioni e possono danneggiare la pavimentazione in situ, le tecniche NDT offrono una valutazione affidabile delle condizioni strutturali dell'intera rete stradale, limitando i disturbi alla pavimentazione esistente e richiedendo solo un numero ridotto di carotaggi per verificare e calibrare lo spessore degli strati.

Le tecniche NDT si basano sull'applicazione di un carico sulla superficie della pavimentazione e sulla misurazione della corrispondente deflessione massima o del bacino di deflessione. Da queste misurazioni, è possibile ottenere informazioni fondamentali per ciascun tipo di pavimentazione (flessibile, semirigida e rigida), come la valutazione dell'adeguatezza strutturale, la determinazione delle proprietà meccaniche dei materiali, la previsione della vita residua e le indicazioni per eventuali interventi di risanamento.

Le apparecchiature NDT possono essere classificate in base alla modalità di carico applicata:

- **Statiche:** utilizzano un carico costante applicato alla pavimentazione;
- **Vibranti:** impiegano vibrazioni per analizzare le risposte della pavimentazione;
- **Impulsive:** applicano carichi brevi e intensi per ottenere misurazioni rapide;
- **Dinamiche mobili:** utilizzano carichi che si muovono lungo la superficie, simili a quelli generati dal transito veicolare.

Queste tecniche forniscono un quadro dettagliato e accurato dello stato delle pavimentazioni, contribuendo a una gestione efficace delle infrastrutture stradali.

Tra le apparecchiature sopracitate focalizziamo l'attenzione sulle apparecchiature impulsive e dinamiche mobili. In particolare, nel Paragrafo 1.4 viene descritta l'apparecchiatura impulsiva denominata *Falling Weight Deflectometer (FWD)* mentre nel Capitolo 2 viene descritta nel dettaglio l'apparecchiatura mobile dinamica *Traffic Speed Deflectometer (TSD)*.

1.4 Falling Weight Deflectometer

Il Falling Weight Deflectometer (FWD) è il dispositivo più comune, utilizzato per la valutazione non distruttiva della capacità portante. Attualmente, i dati FWD vengono utilizzati per calcolare a ritroso i moduli degli strati della pavimentazione o per dedurre deformazioni critiche alla base dello strato in conglomerato bituminoso. È un'apparecchiatura impulsiva in quanto applica un impulso di carico sulla superficie della pavimentazione facendo cadere una massa, da una determinata altezza, su una piastra di carico circolare posta sulla superficie della pavimentazione (comunemente 300 mm di diametro), trasmettendo la forza alla pavimentazione e creando una flessione. Variando la massa in caduta o l'altezza di caduta, è possibile far variare il carico impulsivo. Questo carico può variare tra 30 kN e 110 kN per i FWD standard e tra 30 kN e 250 kN per i FWD pesanti. Questi ultimi sono progettati per essere utilizzati soprattutto negli aeroporti.

La risposta della superficie stradale viene misurata da 7 o 9 sensori di spostamento posizionati a diversa distanza dal centro di carico. Il primo sensore si trova esattamente in asse con la piastra di carico e gli altri, normalmente, distanti 300 mm l'uno dall'altro, misurando fino a 1800 mm dalla piastra di carico. Possiamo avere due sensori aggiuntivi, uno posto a 200 mm dalla piastra e l'altro oltre i 1800 mm. In definitiva, le distanze sono di 0, 200, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 e 2100 mm dal centro. Le misure di deflessione sono successivamente denominate d_0 , d_{200} , d_{300} ecc. Il picco della deflessione verticale si trova sotto il centro della piastra di carico, denominato d_0 o deflessione massima. Il dispositivo di misurazione può essere montato su un piccolo rimorchio, come mostrato in Figura 1.3, o integrato in un veicolo. La durata della prova è molto breve ma richiede uno stazionamento per consentire la misurazione su un punto della pavimentazione, interferendo molto con il traffico.



Figura 1.3 Falling Weight Deflectometer

1.4.1 Principio di misurazione

La sequenza di funzionamento illustrata in Figura 1.4 consiste nello spostare e stazionare il dispositivo sul punto di misura. Si abbassa idraulicamente la piastra e la trave di sostegno dei sensori sulla superficie stradale. Il peso viene lasciato cadere sulla pavimentazione provocando una flessione. I sensori misurano la deformazione in corrispondenza della loro posizione. La durata dell'impulso può variare da 25 ms a 60 ms. Dopo la misurazione in quel punto, si sollevano piastra e sensori ed è possibile guidare verso il punto di rilevamento successivo.

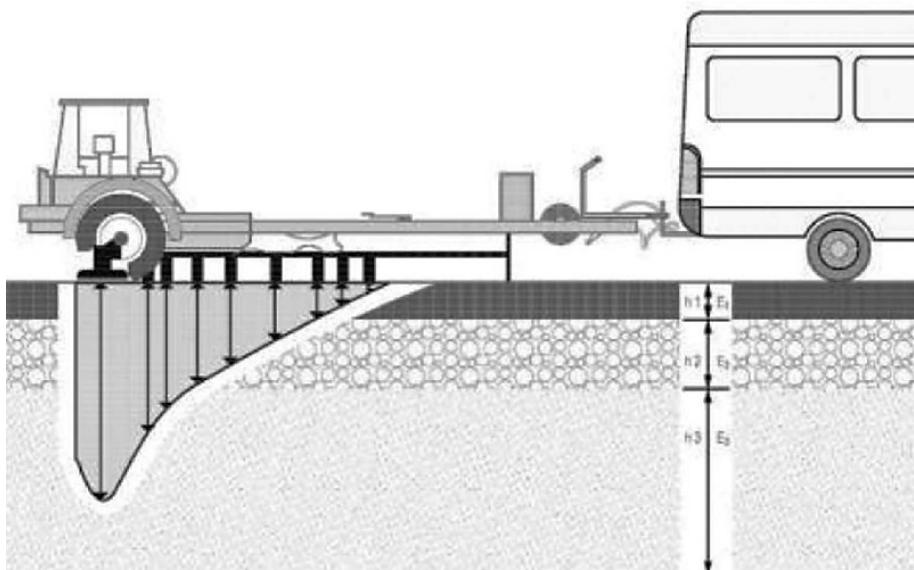


Figura 1.4 Illustrazione del processo di misurazione FWD.

Caduto il peso il risultato è un bacino di deflessione. Questo processo può essere ripetuto varie volte, ottenendo diversi profili di deflessione per la stessa posizione. Le misurazioni sono normalizzate alla pressione a 707 kPa e mediate, creando la misurazione finale.

Sulla parte superiore della piastra di carico è montata una cella di carico per misurare il carico applicato alla superficie della pavimentazione. Solitamente, per le prove su strada, il carico è di circa $50 \text{ kN} \pm 5 \text{ kN}$, equivalenti ad una pressione di 707 kPa sotto la piastra di carico da 300 mm. Inoltre, sotto la piastra di carico è posizionato un cuscinetto di gomma con uno spessore di almeno 5 mm per garantire la risagomatura della piastra di carico il cuscinetto deve essere scanalato. Pertanto, è necessario un contatto uniforme tra la piastra e la superficie della pavimentazione per garantire un'adeguata pressione di contatto uniforme.

La piastra di carico può variare tra diverse dimensioni ma comunemente ha un diametro di 300 mm. Le dimensioni della piastra di carico influiscono sulla zona di sollecitazione della

pavimentazione. Come illustrato nella Figura 1.5, con una piastra di carico più grande, la zona di sollecitazione sarebbe maggiore. I sensori più esterni misurerebbero la risposta di deflessione degli strati più profondi, a causa dall'area di influenza prodotta dalle sollecitazioni della piastra di carico. Le misurazioni da sensori a una distanza maggiore di 2000 mm non possono essere misurate con precisione con la piastra di carico da 300 mm.

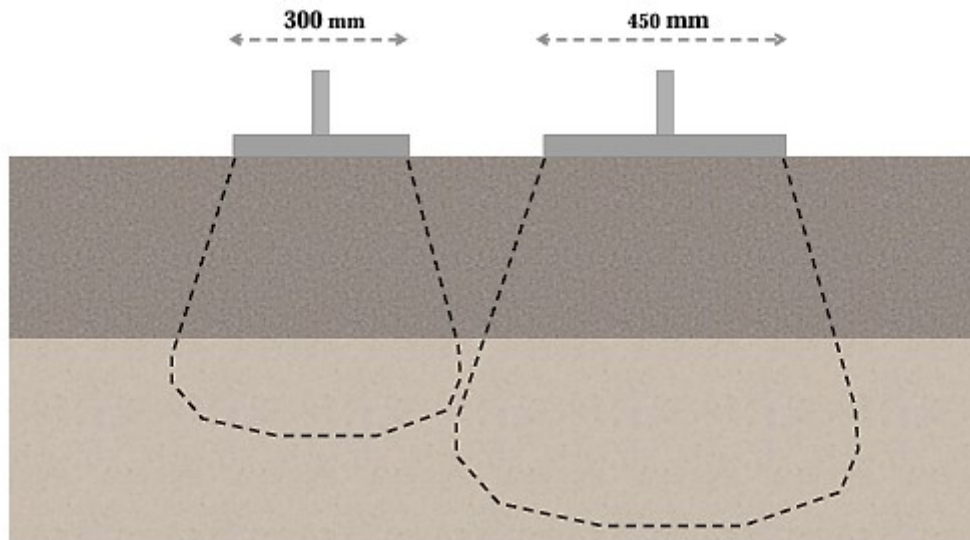


Figura 1.5 Effetto del diametro della piastra sulla zona di sollecitazione

1.5 MOST- Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile

Il Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile (MOST) è un centro di ricerca e innovazione focalizzato sulla promozione di pratiche e tecnologie sostenibili nel settore della mobilità. Situato in Italia, e finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca, il centro si dedica allo sviluppo di soluzioni che mirano a ridurre l'impatto ambientale dei trasporti, migliorare l'efficienza energetica e promuovere l'uso di fonti di energia rinnovabile.

I suoi obiettivi Principali sono:

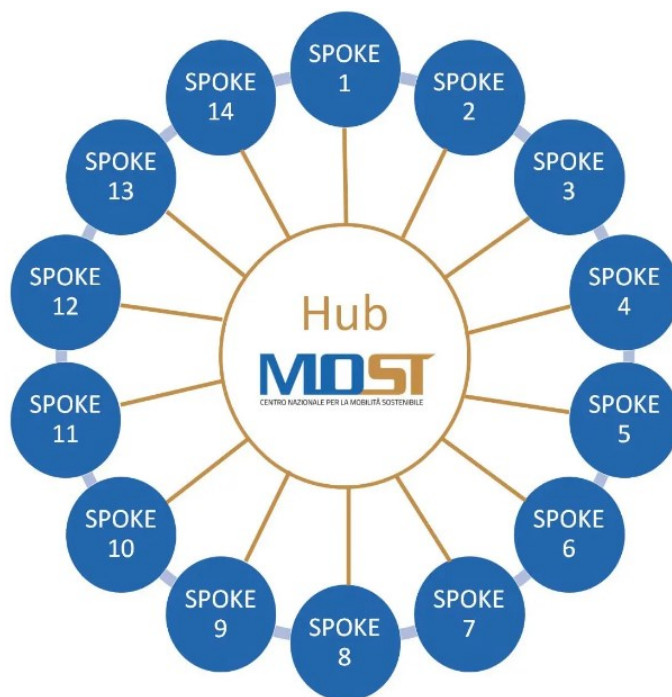
- **Ricerca e Sviluppo:** Condurre studi e ricerche su tecnologie innovative per la mobilità sostenibile, come veicoli elettrici, infrastrutture verdi e sistemi di trasporto intelligenti;
- **Collaborazione:** Lavorare in sinergia con università, enti pubblici e privati per promuovere iniziative e progetti condivisi;
- **Formazione e Sensibilizzazione:** Offrire corsi di formazione, workshop e seminari per aumentare la consapevolezza riguardo le pratiche di mobilità sostenibile tra professionisti e cittadini.

Tra le Attività e Progetti svolti ricadono:

- **Sperimentazione:** Testare e valutare nuove tecnologie di mobilità, come sistemi di car sharing elettrico e reti di trasporto pubblico ecologico;
- **Iniziative di Politica Ambientale:** Collaborare con le amministrazioni locali per implementare politiche che favoriscano la mobilità sostenibile e la riduzione delle emissioni di CO2;
- **Progetti di Innovazione:** Sviluppare progetti pilota che integrino soluzioni tecnologiche avanzate per migliorare la gestione del traffico e l'accessibilità dei trasporti.

Il MOST rappresenta un punto di riferimento per la transizione verso una mobilità più sostenibile, contribuendo a creare un futuro in cui il trasporto sia più efficiente, meno inquinante e maggiormente integrato con le esigenze delle comunità.

Il MOST è organizzato secondo il modello “**Hub&Spoke**”. È un sistema dinamico, con un perno al centro (**Hub MOST**) e attorno i **14 Spoke Leader** che, nella loro interazione, favoriscono la cooperazione con l’ecosistema nazionale e locale.



L’**Hub MOST**, svolge funzioni di coordinamento, definisce le linee strategiche, promuove iniziative trasversali, raccoglie input dal mercato, orienta le progettualità e promuove iniziative di startup intelligence.

Gli **Spoke** sviluppano programmi di ricerca a TRL (Technology Readiness Level) elevato con soluzioni vicine alle esigenze del mercato, tecnologie strategiche del settore a medio e a lungo termine, operano grazie a infrastrutture e a laboratori all’avanguardia.

L'Università Politecnica delle Marche fa parte degli **Spoke 7 e 11**. In particolare, lo spoke 7si focalizza sulla trasformazione del settore della mobilità tramite l'adozione di tecnologie avanzate per la Mobilità Cooperativa Connessa e Automatizzata (CCAM) e le Infrastrutture Intelligenti. La CCAM permette ai veicoli di comunicare tra loro e con le infrastrutture stradali in tempo reale, migliorando la sicurezza stradale e l'efficienza del traffico. Grazie a sensori e sistemi di gestione avanzata, le infrastrutture intelligenti possono monitorare il traffico, gestire i flussi veicolari e fornire informazioni utili agli automobilisti. Questo approccio innovativo mira a ridurre incidenti e congestioni, ottimizzando l'uso delle risorse stradali. Inoltre, promuove una mobilità più sostenibile, diminuendo l'impatto ambientale dei trasporti e contribuendo a un sistema di trasporto più integrato e resiliente. L'obiettivo è creare un ecosistema di trasporto avanzato, sicuro ed efficiente, che risponda alle esigenze future delle città intelligenti.

In particolare, una delle attività svolte da UNIVPM è incentrata sull'analisi e modellazione delle caratteristiche di portanza delle pavimentazioni e comprende:

- Ricerca bibliografica focalizzata sul rilievo con Traffic Speed Deflectometer (TSD) per l'Asset Management System (AMS);
- Sviluppo/perfezionamento di un modello analitico per l'analisi delle deflessioni TSD al network level;
- Valutazione dell'effetto della temperatura e delle modalità di rilievo della temperatura (misure superficiali e profonde) e implementazione nel modello.

Capitolo 2

Traffic Speed Deflectometer

Il Traffic Speed Deflectometer (TSD), sviluppato dalla Greenwood Engineering in collaborazione con il Danish Road Directorate, rappresenta un importante progresso nella tecnologia di monitoraggio delle pavimentazioni stradali, progettato per operare in condizioni di traffico reale senza interrompere il flusso veicolare. La sua nascita risale all'esigenza di disporre di strumenti più efficienti per la valutazione della capacità portante delle infrastrutture stradali, un aspetto cruciale per la manutenzione e la sicurezza delle reti viarie. L'evoluzione del TSD ha visto l'integrazione di tecnologie avanzate, come sistemi di rilevamento automatico e sensori ad alta precisione, che consentono di raccogliere dati in tempo reale mentre il veicolo di misura si muove a velocità simili a quelle del traffico. Questo approccio innovativo ha superato i limiti delle tecniche tradizionali, che richiedevano la chiusura delle corsie e comportavano interruzioni significative per gli utenti della strada.

Il TSD opera quindi senza arrecare disturbo al traffico e garantisce un rendimento molto più alto rispetto al Falling Weight Deflectometer (FWD). A fronte di una copertura della rete estremamente efficiente, i dati raccolti dal TSD non consentono, a oggi, di stimare direttamente i moduli elastici degli strati. Pertanto, esso trova applicazione nel monitoraggio a livello di rete (network level) finalizzato a identificare le sezioni strutturalmente più deboli dove concentrare il rilievo di dettaglio con il FWD (project level). Attualmente il TSD rappresenta lo "stato dell'arte" per il monitoraggio a livello di rete e la ricerca è molto attiva in questo settore, sia per sviluppare correlazioni dirette con le misure del FWD sia per ottenere, dall'enorme mole di dati raccolta dal TSD, indicazioni dirette sugli interventi di manutenzione più opportuni.

2.1 Dalle misure puntuali a quelle in movimento

I metodi più affidabili per monitorare la capacità portante delle pavimentazioni sono quelli non distruttivi basati sulla misura delle deflessioni *Non-Destructive Deflection Testing* (NDT) [30]. Come discusso al Paragrafo 1.3, il FWD, è diventato l'apparecchiatura di tipo impulsiva di riferimento a livello mondiale per la misura della capacità portante, sia a livello di rete che a livello di progetto.

I principali limiti riconducibili alla determinazione della portanza mediante FWD sono dovuti:

- al disturbo recato in diversa misura al traffico in esercizio (che richiede l'ausilio di veicoli di segnalazione oppure la chiusura al traffico del tratto di pavimentazione sottoposto al monitoraggio della portanza),
- alle conseguenti implicazioni in termini di sicurezza,
- al ridotto numero di punti di misura investigati e pertanto la limitata restituzione della reale condizione della sovrastruttura.

Per ovviare a tali problematiche, fin dall'inizio degli anni 1990 sono state sviluppate delle apparecchiature dinamiche mobili, classificate nella letteratura internazionale come *Rolling Wheel Deflectometer (RWD)*, in grado di effettuare misure di portanza a velocità confrontabili con quelle del traffico in esercizio. La risposta della pavimentazione misurata mediante l'impiego di tali apparecchiature è analoga a quella realmente generata dal passaggio dei mezzi pesanti in esercizio.

Tale aspetto è particolarmente importante se si considera che, diversamente da quanto accade durante la storia di carico generata da apparecchiature impulsivo di tipo FWD, nella realtà le direzioni delle tensioni e delle deformazioni principali all'interno della pavimentazione subiscono delle rotazioni durante il passaggio di cariche mobili superficiali. Per tale motivo è da ritenere infondato il tentativo di verificare il medesimo responso nel confronto dei risultati ottenuti con apparecchiature RWD e FWD a causa della diversa natura dei principi di misura a esse associati.

Per tutte queste ragioni i dispositivi RWD hanno progressivamente accresciuto a livello internazionale la loro diffusione presso i principali gestori di reti stradali, grazie anche alla loro efficienza che garantisce apprezzabili ritorni in termini economici. Ad oggi la più importante apparecchiatura dinamica è il *Traffic Speed Deflectometer (TSD)* discusso nel Paragrafo 2.1.1.

2.1.1 Sviluppo e prime applicazioni del TSD

Il *Traffic Speed Deflectometer* (TSD) è un'apparecchiatura per il monitoraggio strutturale ad alta velocità delle pavimentazioni stradali.

Il primo prototipo di apparecchiatura dinamica, denominato "High Speed Deflectograph", fu sviluppato in Danimarca. Il principio di misura era basato sull'impiego di una tecnologia laser che prevede l'utilizzo di due sensori Laser Doppler per la misura dei movimenti verticali generati dal carico trasmesso da un'asse di peso noto. La differenza tra le quote della superficie stradale, misurate in condizioni indisturbate sotto l'azione del carico noto, è assunta come parametro rappresentativo del reale movimento generato dall'asse impiegato. Quest'ultimo e i sensori laser risultano montati su un carrello, come mostrato in Figura 2.1, la cui lunghezza è in grado di evitare il disturbo sulla velocità di deflessione misurata che deriverebbe dall'unità motrice impiegata per il traino. In particolare, i sensori Laser Doppler sono montati su una trave in acciaio rigida (a distanza opportuna) di fronte alla coppia di ruote gemellate poste sull'estremità destra dell'asse di carico, con la possibilità di trasferire sulla superficie stradale livelli di carico fino a 50 kN. La prova può essere eseguita a velocità comprese tra 20 e 95 km/h, assumendo di norma un valore di 70 km/h.

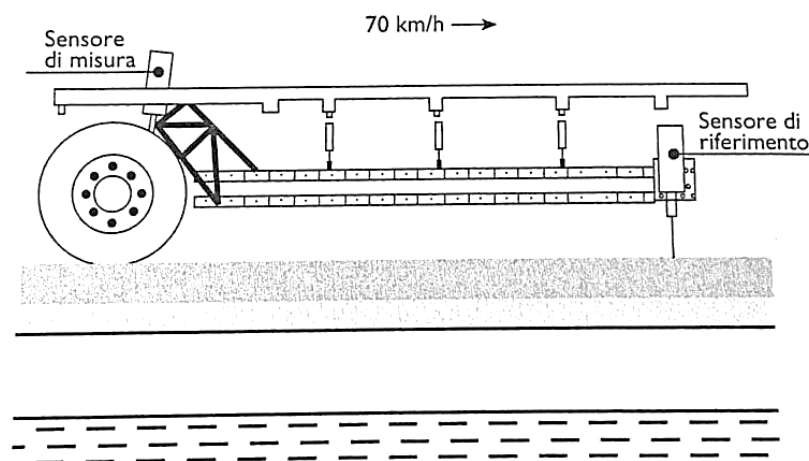


Figura 2.1 High Speed Deflectograph

Successivamente il TSD che conosciamo oggi fu messo a punto nel 2001 [12]. Il modello era dotato di un unico sensore laser Doppler posizionato 250 mm davanti all'asse di carico come mostrato in Figura 2.2. I risultati pubblicati, espressi in termini di pendenza della superficie, rivelarono un'ottima ripetibilità e una buona correlazione con i rilievi FWD, riportati in Figura 2.3. Le prime campagne di misura di una certa estensione furono svolte tra il 2005 e il 2007 dal Danish Road Directorate, utilizzando la prima versione "commerciale" dell'apparecchiatura,

equipaggiata con tre sensori posti a 100, 200 e 300 mm dall'asse di carico [2]. In ciascun anno sono stati effettuati circa 3000 km di rilievo, con una resa di circa 200 km/giorno (circa 10 volte superiore a quella del FWD). I risultati di tali campagne furono per la prima volta presentati in termini di SCI_{300} , definita dall'Equazione:

$$SCI_{300} = d_0 - d_{300} \quad (2.1)$$

Tali risultati confermarono la ripetibilità delle misure e la correlazione con i risultati del FWD. La ripetizione delle misure sulle stesse sezioni in anni successivi evidenziò inoltre come l'apparecchiatura fosse in grado di rilevare un aumento dello SCI_{300} , presumibilmente dovuto al degrado della pavimentazione sotto traffico. Inoltre, tali misure evidenziarono l'effetto della temperatura nei rilievi effettuati nei diversi anni come mostrato in Figura 2.4.

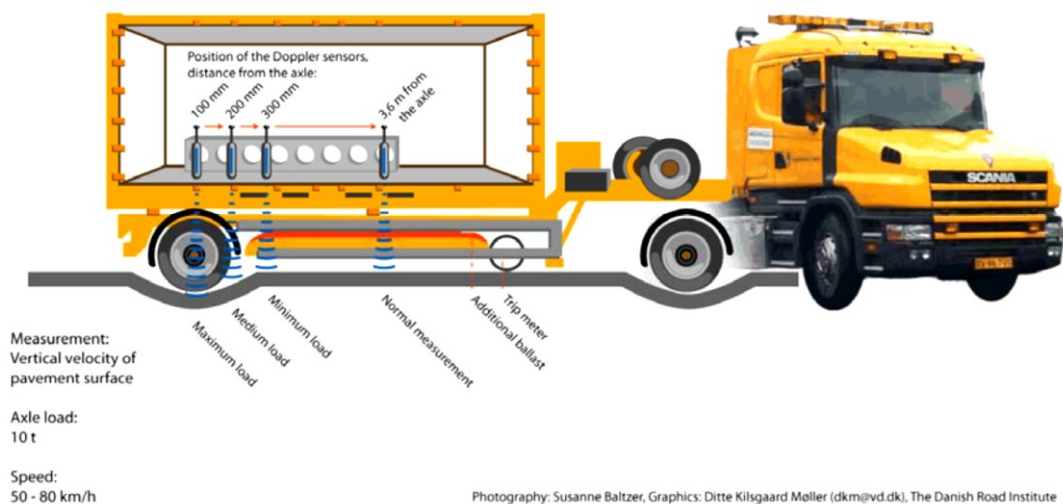


Figura 2.2 Traffic Speed Deflectometer

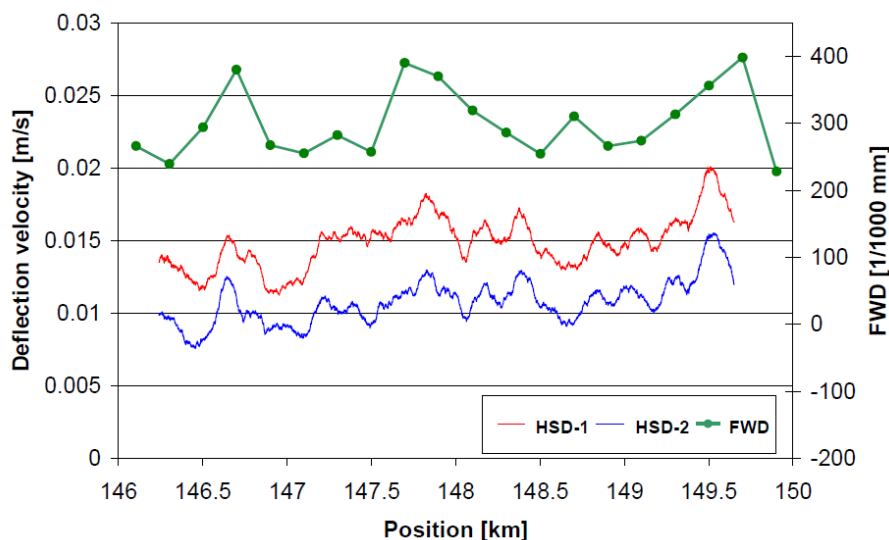


Figura 2.3 Confronto con i risultati FWD

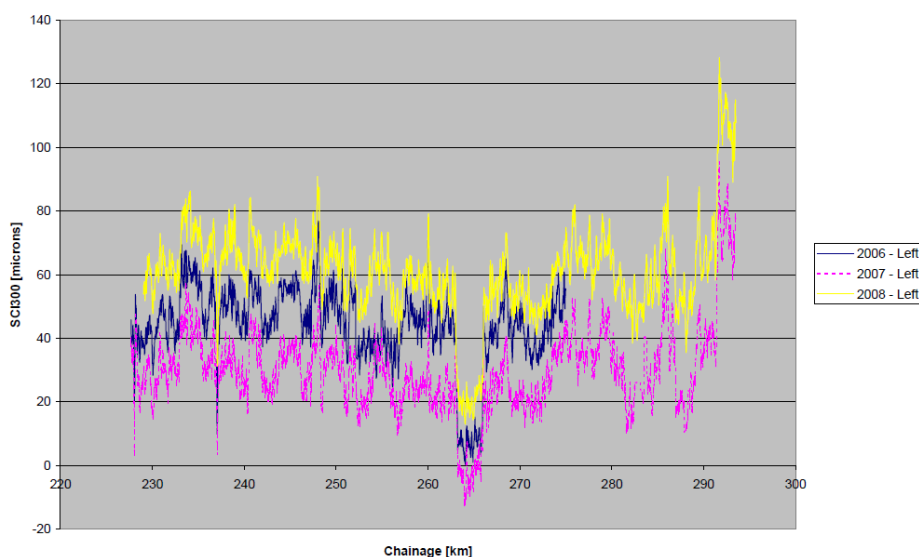


Figura 2.4 Effetto della temperatura sul parametro SCI_{300}

Dopo le misure effettuate in Danimarca, nel 2005 un secondo prototipo di TSD di prima generazione fu acquistato dalla UK Highways Agency e testato dal Transportation Research Laboratory (TRL). Le verifiche riguardarono la percentuale di misurazioni valide (data-rate) in funzione della velocità di rilievo e delle condizioni superficiali. Le misure rivelarono che il data rate aumenta su superfici più chiare, ad esempio pavimentazioni in calcestruzzo, mentre le performance peggiori furono registrate su superfici bituminose di nuova realizzazione. Data rate più bassi si registrano su superfici umide, mentre le misure diventano impossibili su superfici bagnate. Le misure consentirono inoltre di verificare l'ottima ripetibilità nel breve termine. Nel lungo termine fu confermato l'effetto della temperatura, principalmente a causa delle deformazioni termiche della trave di supporto dei sensori. Sulla base di tali risultati fu pertanto introdotto sul TSD un sofisticato sistema di controllo della temperatura.

Il TSD di prima generazione del Danish Road Directorate è stato utilizzato anche per le prime misure fatte in Australia e in Germania.

In Australia, tra il gennaio e il giugno del 2010, furono testati 13.000 km di pavimentazione in New South Wales e 5.000 km in Queensland [3]. Furono verificate la ripetibilità delle misure nel breve termine (ottima), la loro riproducibilità nel lungo termine (evidenziando l'effetto della temperatura) (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Fu inoltre accertata la scarsa dipendenza di risultati dalla velocità del rilievo e la buona correlazione con le altre misurazioni a disposizione (FWD e deflettografo). I risultati furono analizzati soprattutto in termini di deflessione centrale poiché il sistema di gestione a livello di rete era basato su tale parametro, misurato mediante il FWD [4,20]. Fu anche proposto un diverso algoritmo di

calcolo delle deflessioni a partire dalle pendenze misurate [22]. A seguito dell'esito positivo delle campagne di misurazione del 2010, l'Australian Road Research Board (ARRB) acquistò il TSD nel 2014 [33].

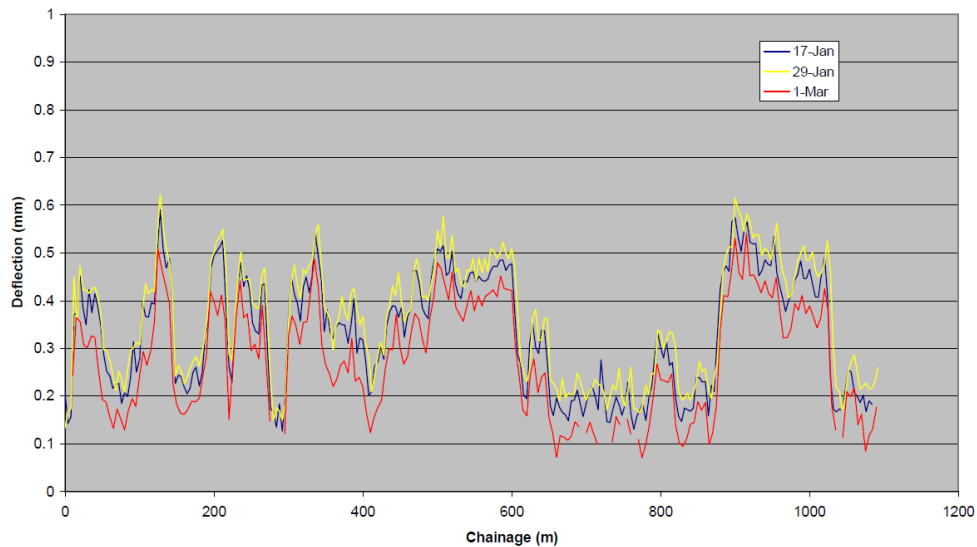


Figura 2.7 Effetto della temperatura sulle misure TSD

In Germania, i risultati ottenuti dal Federal Highway Research Institute (BAST) [13] hanno mostrato le stesse potenzialità e gli stessi limiti delle campagne di indagini precedenti. In particolare, i tecnici del BAST hanno proposto l'inserimenti di un sistema di misura del carico applicato sui ciascuno dei due gruppi di ruote doppie dell'asse di carico. In seguito, sono state effettuate diverse campagne di indagine con il TSD di seconda generazione, tra cui il confronto di due apparecchiature "identiche" come mostrato in Figura 2.8 e hanno infine portato nel 2016 all'acquisto dell'apparecchiatura TSD "multifunzionale" in grado di effettuare contestualmente alla misura delle deflessioni, il rilievo degli spessori (GPR), del profilo trasversale e dei dissesti [25].



Figura 2.8 Confronto tra due TSD in Germania

2.2 Descrizione dell'apparecchiatura

Il TSD misura in continuo le pendenze della superficie stradale durante il passaggio di un autoarticolato, da tali pendenze si calcolano poi le deflessioni superficiali (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..9**) [5]. Il carico considerato è quello applicato dall'asse posteriore del semirimorchio, equipaggiato con ruote doppie. Le pendenze sono misurate con sensori di tipo laser Doppler situati su una trave montata di fronte delle ruote di destra. Sull'asse di carico grava un peso totale di 100 kN ottenuto mediante una zavorra.

Il numero dei sensori laser Doppler varia da quattro (prima generazione) a undici (ultima generazione). Essi sono posizionati a distanza crescente davanti all'asse di carico (100, 200, 300 mm e così via). L'ultimo sensore è posizionato a 3.6 m, dove si suppone che l'effetto del carico sia trascurabile e ha pertanto funzione di riferimento. La trave di supporto e i sensori sono mantenuti costantemente alla temperatura di 20 °C mediante un sistema di condizionamento.

L'equipaggiamento di base del TSD comprende inoltre una unità per il riferimento inerziale, un odometro per la misura della distanza percorsa e della velocità, sensori di temperatura e un sistema di geolocalizzazione GPS. Possono essere installate apparecchiature optional [36], come mostrato in Figura 2.10, quali il Ground Penetration Radar (GPR) che permette di risalire alla stratigrafia della pavimentazione, profilatori stradali per tenere conto della tessitura superficiale oltre che telecamera (ROW), sistema di immagini di superficie (SIS) che permette il rilevamento di fessure.

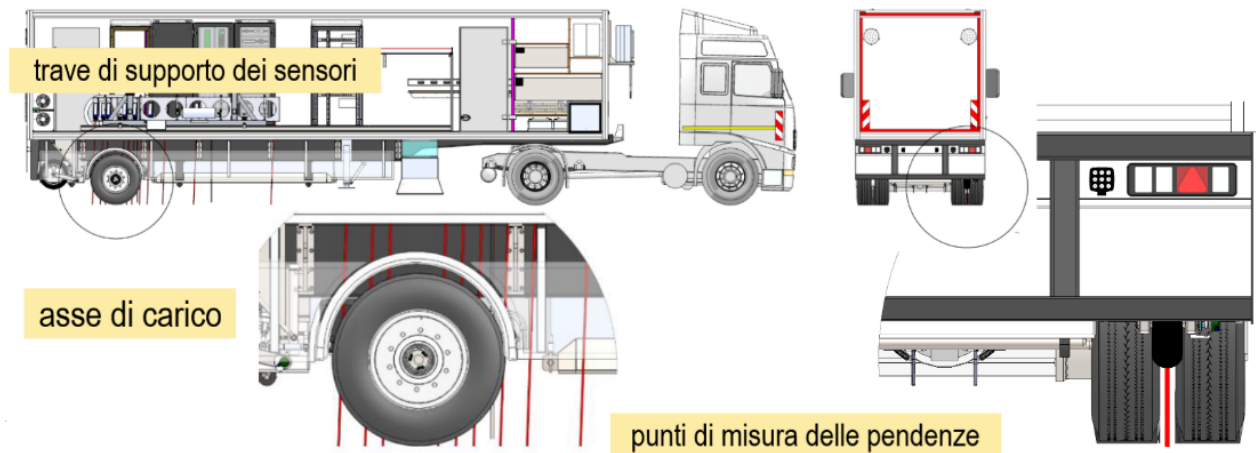


Figura 2.9 Schema di misurazioni del Traffic Speed Deflectometer

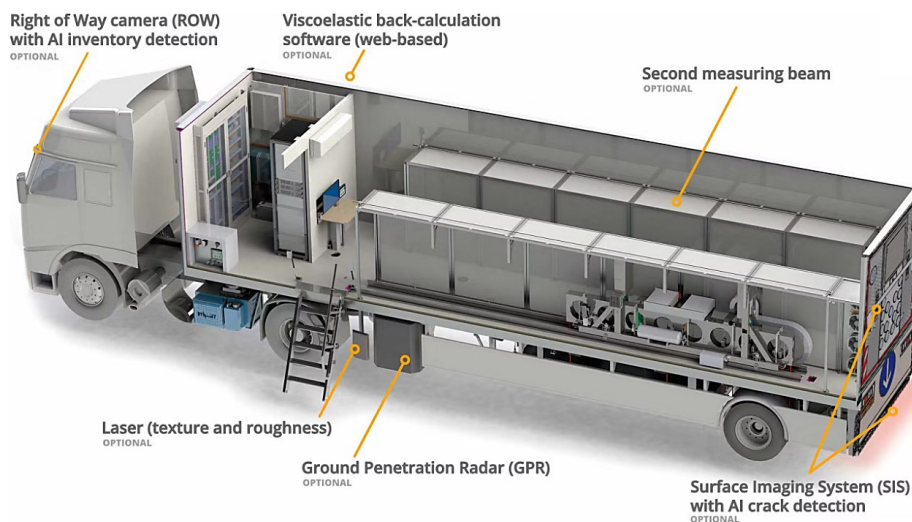


Figura 2.10 Apparecchiature Optional sul TSD

2.2.1 Principio di misura

I sensori laser misurano la velocità di spostamento (Figura 2.11) della superficie stradale (deflection velocity) sfruttando l'effetto Doppler secondo cui la lunghezza d'onda della luce si riduce quando la sorgente si avvicina e aumenta quando la sorgente si allontana, in maniera proporzionale alla velocità della sorgente [12].

I laser sono montati con un angolo di circa 2° rispetto alla verticale. Ciò permette di ridurre drasticamente la variabilità delle misure dovuta al movimento delle sospensioni. In virtù di tale inclinazione la velocità misurata è data dalla sovrapposizione di [7,8]:

- una componente orizzontale dovuta alla velocità del veicolo;
- una componente verticale dovuta alla deflessione della pavimentazione;

- una componente di disturbo (orizzontale e verticale) dovuta al movimento delle sospensioni e della trave di misura.

Dopo aver effettuato le correzioni relative all'ultima di queste tre componenti, la pendenza locale della superficie viene calcolata utilizzando la seguente Equazione:

$$z'(x) = \frac{dz}{dx} = \frac{v_z}{v_x} \quad (2.2)$$

In cui x indica la posizione (ascissa curvilinea) del punto di misura, $z'(x)$ (mm/m) è la pendenza della superficie stradale nel punto, v_z (mm/s) è la sua velocità verticale misurata dal laser e v_x (m/s) è la velocità di avanzamento del veicolo.

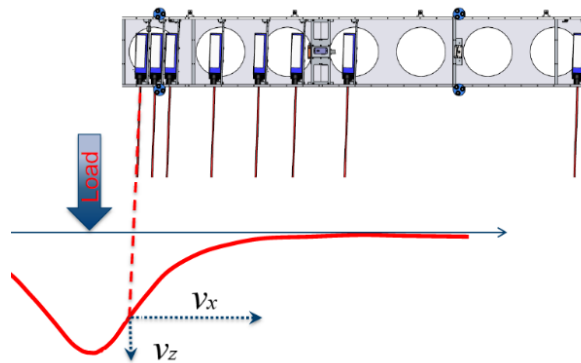


Figura 2.11 Calcolo della velocità di spostamento

2.2.2 Dalle pendenze alle deflessioni

Pur misurando direttamente la pendenza del piano viabile indotta dall'asse di carico, il TSD è in grado di restituire il bacino di deflessione. Le procedure di calcolo prevedono in generale prima una regressione delle pendenze misurate in corrispondenza dei punti di misura e poi l'integrazione di tale funzione. Nel metodo originariamente sviluppato da Greenwood Engineering, per effettuare la regressione viene utilizzata una funzione ottenuta partendo dall'ipotesi che la pavimentazione si deformi come una trave su suolo elastico ("alla Winkler") soggetta ad un carico concentrato [6]:

$$z'(x) = -A \sin(Bx)e^{-Bx} \quad (2.2)$$

in cui A (-) e B (1/mm) sono parametri del modello che rappresentano le caratteristiche della trave (omogenea isotropa linearmente elastica), il modulo di reazione del suolo elastico e il carico applicato. I parametri A e B sono determinati effettuando una regressione dei dati di pendenza misurati.

È interessante notare che uno dei motivi che portarono alla scelta dell'Equazione (2.2) fu che il primo modello di TSD rilevava solo tre deflessioni e quindi un modello più complesso (con più di parametri) non avrebbe avuto senso.

Una volta determinati i valori di A e B il bacino di deflessione è ottenuto integrando la (2.2), aggiungendo l'ulteriore condizione al contorno che la deflessione massima (pendenza nulla) si verifichi in corrispondenza dell'asse del carico ($x = 0$) (Figura 2.12). Si ottiene quindi la seguente espressione per il bacino di deflessione [6,15,27]:

$$z(x) = \frac{A}{2B} e^{-Bx} (\sin Bx + \cos Bx) \quad (2.3)$$

La risoluzione con cui si ottengono le misure di pendenza è estremamente elevata (circa 20 mm) tuttavia, per ridurre la quantità di memoria necessaria e l'effetto dei disturbi, i dati sono normalmente mediati su tratti di lunghezza di 1,0 m o di 10,0 m.

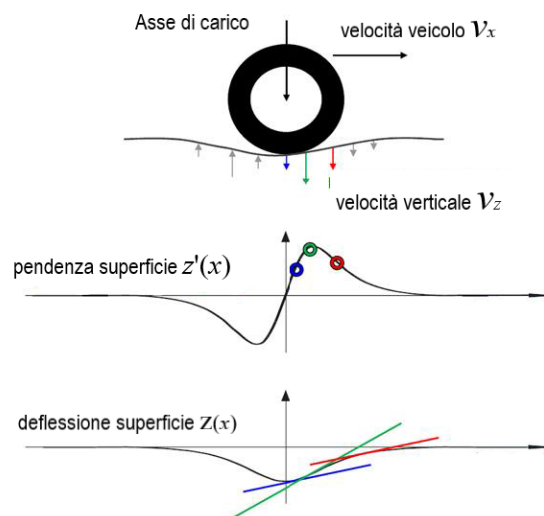


Figura 2.12. Diagramma delle pendenze e della deflessione

Successivamente, sono stati proposti altri metodi per ottenere il bacino di deflessione dalle misure di pendenza. Il primo, sviluppato sulla base dei primi rilievi fatti in Australia [22] prevede l'interpolazione delle pendenze misurate con una spline cubica e la successiva integrazione numerica. Tale metodo è anche noto come Area Under The Curve (AUTC) Method [28].

Un'analisi comparativa tra il metodo della trave su suolo elastico e il metodo AUTC ha rivelato che quest'ultimo può dare risultati più precisi, specialmente se il numero di deflessioni a disposizione è elevato [21]. Il secondo, sviluppato dai ricercatori dell'IBDiM si basa sull'applicazione di un approccio Euleriano, facendo riferimento ad un punto fissato e

analizzando l'evoluzione nel tempo delle deflessioni [34]. Recentemente [Nielsen 2019] Greenwood ha sviluppato una procedura di calcolo delle deflessioni in cui un modello viscoelastico della pavimentazione viene utilizzato per simulare le pendenze. Attraverso un processo di backcalculation si calcolano i moduli che permettono di approssimare al meglio le pendenze e infine viene eseguita un'integrazione numerica per ottenere le deflessioni.

2.2.3 Dalle deflessioni alle condizioni

Il monitoraggio del bacino di deflessione è funzionale a quello della portanza. Quest'ultima è legata ai diversi meccanismi di danno che, a loro volta, sono alle deformazioni della pavimentazione. In particolare:

- la fessurazione a fatica (bottom-up) è legata alla deformazione orizzontale alla base degli strati legati;
- il top-down cracking è legato alla deformazione orizzontale in superficie;
- l'ormaiamento primario è legato alla deformazione tangenziale negli strati legati;
- l'ormaiamento secondario è legato alla deformazione verticale sul piano di sottofondo.

Dalle misure TSD, attraverso la backcalculation, si potrebbe risalire direttamente alle deformazioni e quindi al livello di danno. Tuttavia, per la gestione a livello di rete, tradizionalmente si preferisce utilizzare indici semplificati di danno ottenuti dalle deflessioni. Ad oggi, in Europa, il principale indice utilizzato per analizzare i rilievi effettuati con il TSD è il *Surface Curvature Index* (SCI_{300}), originariamente introdotto per analizzare le misure effettuate con apparecchiature dinamiche, ad esempio il FWD.

in cui d_0 e d_{300} sono le deflessioni misurate in corrispondenza dell'asse del carico e a 300 mm da tale asse. Nel caso del FWD, le deflessioni d_0 e d_{300} sono misurate direttamente dai sensori, mentre nel caso del TSD d_0 è assunta pari a 0 e d_{300} è calcolata utilizzando l'Equazione (2.3) o con un altro dei metodi disponibili.

È interessante notare che lo SCI_{300} è correntemente utilizzato poiché il suo valore è correlabile alla deformazione orizzontale alla sia in superficie (ϵ_{top}) che alla base degli strati bituminosi (ϵ_{bottom}) di pavimentazioni flessibili [17]:

$$\epsilon_{top} = 194.9 - 20.78 \log SCI_{300} \quad (2.4)$$

$$\epsilon_{bottom} = 0.481 + 0.881 \log SCI_{300} \quad (2.5)$$

Pur con le dovute cautele, tali relazioni suggeriscono che l'indice SCI_{300} è in grado di fornire utili informazioni sulla vita utile residua delle pavimentazioni.

Un altro indice correntemente ottenuto a partire dalle deflessioni misurate è il *Base Damage Index*:

$$BDI = d_{300} - d_{600} \quad (2.6)$$

in cui d_{600} è la deflessione misurata a 600 mm dall'asse del carico.

È interessante notare come questo tipo di indici (differenza di due deflessioni) risenta poco dell'errore commesso nella scelta delle condizioni al contorno del processo di integrazione che porta al calcolo delle deflessioni.

2.3 Utilizzo del TSD per il monitoraggio a livello di rete

La diffusione commerciale del TSD è avvenuta dopo il 2010, con i primi modelli di seconda generazione acquistati dall'ANAS (Italia) (Figura 2.13) e da IBDiM (Polonia) e ad al 2021, sono stati prodotti e consegnati 16 TSD (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) [36]. Nelle diverse nazioni, sono quindi state sviluppate diverse strategie di utilizzo dei dati misurati per il Network Level Management. In generale le diverse agenzie hanno cercato di individuare un indice sintetico per rappresentare i dati TSD che fosse correlabile con le misure di portanza in utilizzo. Queste ultime legate normalmente ai dati storici di deflessione, ottenuti in gran parte con il FWD. Un ulteriore e recente sviluppo è quello di utilizzare le misure del TSD per ottenere direttamente i valori delle rigidità degli strati, mediante un processo di backcalculation simile a quello utilizzato per il FWD.



Figura 2.13 Traffic Speed Deflectometer Greenwood in dotazione di ANAS

Tabella 2.1 Distribuzione a livello mondiale del TSD

Nazione	(N) numero di TSD ed ente proprietario
Danimarca	(2) Danish Road Directorate
UK	(2) Highways England
Italia	(1) ANAS
Polonia	(1) IBDiM
Sud Africa	(2) South African National Road Agency (SARNAL), VNA Consulting
Australia e Nuova Zelanda	(1) Australian Road Research Board (ARRB)
USA	(1) Australian Road Research Board ARRB
China	(2) Research Institute of Highway Ministry of Transport (RIOH), RAB.
Germania	(2) Federal Highway Research Institute (BAST), Wuppertal

2.3.1 L'approccio danese

La Danimarca è il Paese che ha la maggiore esperienza di network level management basato sul TSD. Tale esperienza deriva da 13 anni (2007-2019) di misure effettuate con il TSD di prima generazione descritto sopra. Pertanto, essendo disponibili solo tre misure di deflessione (quelle a 100, 200, 300 mm davanti all'asse di carico, oltre a quella a 3,6 m utilizzata come riferimento) l'analisi si è basata sull'utilizzo dello SCI300. In particolare, sono state individuate due soglie di classificazione della capacità portante:

- **Soglia 1** = $600 * N^{-\log 2}$, che identifica sezioni con capacità portante “buona” per cui la frequenza del rilievo TSD può essere mantenuta bassa (es. ogni 3 anni);
- **Soglia 2** = $900 * N^{-\log 2}$, che identifica sezioni con capacità portante “scadente” per cui è necessario effettuare indagini FWD per programmare interventi al project level.

In valore N esprime il traffico espresso in passaggi giornalieri di assi standard da 100 kN. Ad esempio, considerando un livello di traffico annuale pari $10 * 10^6$ assi standard da 100 kN, e ipotizzando che tale traffico insista su un'unica corsia, il valore della soglia che individua la capacità portante “buona” è $SCI300 < 28$ micron, mentre il valore della soglia che individua la capacità portante “bassa” è $SCI300 > 42$ micron.

2.4 Stima vita utile residua da misure TSD

La vita utile residua della pavimentazione può essere stimata a partire dalle deflessioni misurate dal TSD. Il criterio di rottura adottato è quello per fatica del conglomerato bituminoso, in cui il numero massimo di applicazioni di carico è legato alla massima deformazione di trazione alla base degli strati bituminosi, e alla rigidità del materiale. Tali valori sono stati calcolati a partire dall'indice SCI_{300} ottenuto dai rilievi TSD, opportunamente corretti per tenere dell'effetto della temperatura. Il calcolo della vita utile residua si riferisce a tratti (sezioni omogenee) di lunghezza fissa (es: 500 m) all'interno del quale viene inizialmente effettuata un'analisi statistica per determinare un valore rappresentativo dell'indice SCI_{300} .

La procedura di stima vita utile residua può essere schematizzata nei seguenti passi:

1. Correzione dei valori SCI_{300} misurati;
2. Scelta del valore SCI_{300} per sezione omogenea;
3. Calcolo della resistenza a fatica;
4. Calcolo della vita utile residua.

Passo 1. Correzione dei valori SCI_{300} misurati

Tale correzione si rende necessaria per tenere conto di due fonti di variabilità delle deflessioni misurate, e quindi dello SCI_{300} , che riguardano rispettivamente:

- a) il carico applicato sul lato destro (lato di misura) dell'asse posteriore del TSD;
- b) la temperatura della pavimentazione.

Il valore misurato $SCI_{300_{mis}}$ è innanzitutto riportato al carico di riferimento di 50 kN mediante la relazione:

$$SCI_{300_f} = SCI_{300_{mis}} \cdot \frac{5000}{P_{Right}} \quad (2.7)$$

dove P_{Right} (kg) è il carico effettivo applicato sul lato destro dell'asse di misura.

Per effettuare la correzione relativa alla temperatura è stata utilizzata la relazione proposta da Nasimifar et al. [23]:

$$SCI_{300_r} = SCI_{300_f} \cdot \lambda = SCI_{300_f} \cdot \frac{10^{-0,0521 \times T_r + 0,0322 \times T_r \times \log(h_{AC})}}{10^{-0,0521 \times T_f + 0,0322 \times T_f \times \log(h_{AC})}} \quad (2.8)$$

dove T_r è la temperatura di riferimento del calcolo e T_f è la temperatura a metà dello spessore degli strati bituminosi indicato come h_{AC} . I valori di λ , con $T_r = 20^\circ C$ sono illustrati in Figura 2.14.

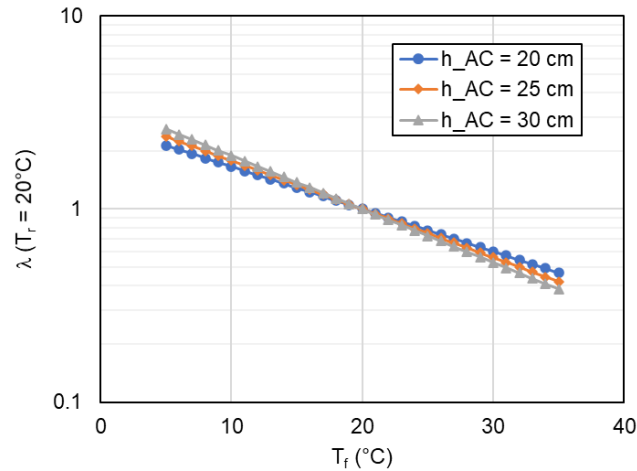


Figura 2.14 Esempio di calcolo del coefficiente di correzione dello SCI300 in funzione della temperatura dei rilievi

Il valore di T_f da inserire nell'Equazione (2.8) è stato stimato utilizzando il modello BELLS3 proposto da Lukanen et al [16]:

$$T_f = 0.95 + 0.892 \cdot T_0 + [\log(h_{AC}/2) - 1.25] \cdot [-0448 \cdot T_0 + 0.621 \cdot T_{1-day} + 1.83 \times \sin(hr_{18} - 15.5)] + 0.042 \cdot T_0 \cdot \sin(hr_{18} - 13.5) \quad (2.9)$$

dove T_0 è la temperatura superficiale della pavimentazione misurata dal TSD, T_{1-day} è la temperatura media dell'aria il giorno precedente a quello delle misure e $\sin(hr_{18} - h_0)$ è la funzione seno calcolata su un periodo di 18 ore.

La Figura 2.15 mostra un'applicazione dell'Equazione 3 in cui sono stati assunti $T_0 = 36^\circ C$, $T_{1-day} = 25^\circ C$ e $h_{AC} = 26$ cm. Si osserva come il modello preveda una temperatura pressoché costante fino alle 11 del mattino e che questo periodo, a partire dalle prime ore di luce, è il più propizio per le misure TSD.

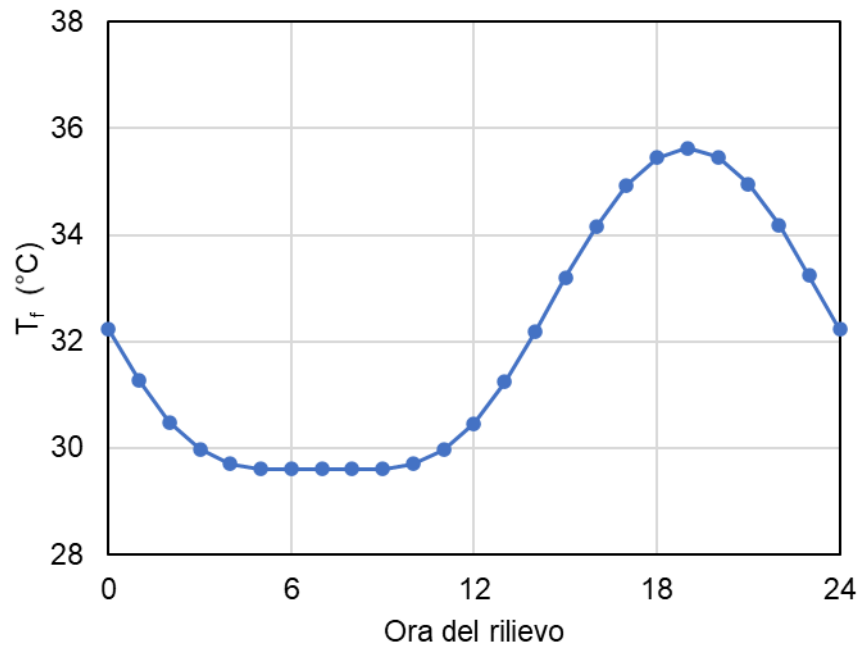


Figura 1.15 Esempio di andamento della temperatura della pavimentazione a metà dello spessore degli strati bituminosi

Passo 2. Scelta del valore $SCI300$ per sezione omogenea

Poiché il calcolo della vita utile è riferito a sezioni omogenee, dai valori corretti $SCI300_r$ si deve determinare un unico valore rappresentativo della sezione in esame. Ricorrere al valore mediano (50-esimo percentile) della sezione risulterebbe poco cautelativo, per cui si è scelto di fare riferimento all'85-esimo percentile, e cioè a quel valore $SCI300_r$ che è superato solo nel 15% dei punti misurati. Per distribuzioni normali, l'85-esimo percentile corrisponde ad una deviazione standard oltre la media. La Figura 2.16 mostra un esempio di calcolo dell'85-esimo percentile dello $SCI300_r$.

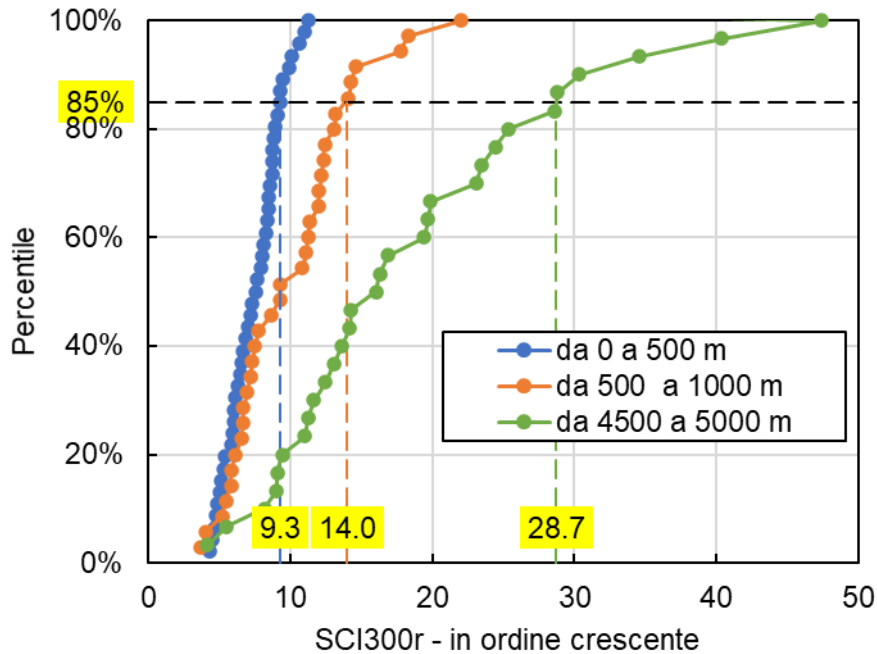


Figura 2.16 Esempi di calcolo dell'85-esimo percentile dello SCI300

Si evidenzia che tale calcolo esclude valori anomali di SCI_{300} che spesso si registrano in corrispondenza di punti o tratti singolari, come ponti e viadotti, in cui la pavimentazione ha caratteristiche non omogenee con il resto della rete.

Passo 3. Calcolo della resistenza a fatica

La resistenza a fatica di una sezione è stata stimata utilizzando l'Equazione di Finn et al. [8]:

$$N_{100}^r = 0,0795 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{t,max}^r} \right)^{3,291} \cdot \left(\frac{1}{E_r} \right)^{0,854} \quad (2.10)$$

dove $\varepsilon_{t,max}^r$ (mm/mm) è la massima deformazione di trazione alla base degli strati bituminosi, E_r (psi) è la rigidezza di tali strati, entrambi alla temperatura di riferimento, e N_{100}^r è la vita residua misurata in assi da 100 kN, come quello del TSD.

L'Equazione (2.14), adottata anche nel metodo di calcolo dell'Asphalt Institute [1], individua la rottura a fatica in corrispondenza di una fessurazione a ragnatela che interessi il 45% delle aree di pavimentazione interessate dal transito degli pneumatici (wheelpath) equivalente a circa il 20% dell'intera superficie della pavimentazione.

I valori di $\varepsilon_{t,max}^r$ ed E_r sono stati stimati utilizzando due Equazioni proposte da Rada et al. [25] nell'ambito di un vasto studio sponsorizzato dalla Federal Highway Administration per supportare l'utilizzo del TSD al network level:

$$\varepsilon_{t,max}^r = a \cdot (SCI300_{r,85})^b \quad (2.11)$$

$$E_r = c \cdot (\varepsilon_{t,max}^r)^d \quad (2.12)$$

Dove a, b, c, d sono coefficienti che dipendono dallo spessore degli stati bituminosi (Figura 2.17).

AC layer thickness	SCI _{TSD} and maximum tensile strain, Equation 2.15			Strain and AC modulus. Equations 2.16	
	a	b	R^2	c	d
76–102 mm (3–4 inches)	2.335	0.962	0.82	3.64E + 06	–1.27
102–127 mm (4–5 inches)	1.875	1.02	0.9	4.52E + 06	–1.36
127–152 mm (5–6 inches)	1.957	1.024	0.95	4.98E + 06	–1.44
152–178 mm (6–7 inches)	2.452	0.987	0.97	4.41E + 06	–1.46
178–203 mm (7–8 inches)	2.876	0.952	0.97	3.42E + 06	–1.46
203–229 mm (8–9 inches)	3.381	0.912	0.97	3.39E + 06	–1.51
229–254 mm (9–10 inches)	3.786	0.882	0.96	2.54E + 06	–1.49
254–279 mm (10–11 inches)	4.375	0.8373	0.95	2.27E + 06	–1.51
279–305 mm (11–12 inches)	4.701	0.8103	0.94	1.99E + 06	–1.52
305–330 mm (12–13 inches)	4.905	0.7895	0.94	1.72E + 06	–1.53
330–356 mm (13–14 inches)	5.392	0.7479	0.92	1.59E + 06	–1.55
356–381 mm (14–15 inches)	5.015	0.7594	0.94	1.11E + 06	–1.49
381–406 mm (15–16 inches)	5.248	0.7285	0.92	1.00E + 06	–1.51
Thin	2.883	0.927	0.9	9.65E + 05	–1.072
76–152 mm (3–6 inches)					
Medium	3.071	0.935	0.97	1.37E + 06	–1.264
152–229 mm (6–9 inches)					
Thick	4.115	0.8412	0.94	2.76E + 05	–1.076
229–406 mm (9–16 inches)					

^aSCI_{TSD} is in μm and AC modulus is in MPa.

Figura 2.17 Valori numerici dei coefficienti nelle Equazioni 2.15 e 2.16.

Passo 4. Calcolo della vita utile residua

Il calcolo della vita utile residua viene effettuato esprimendo la resistenza a fatica in termini di assi standard da 120 kN (N_{120}^r):

$$N_{120}^r = N_{100}^r \cdot \left(\frac{100}{120}\right)^2 \quad (2.13)$$

e quindi dividendo per il traffico annuo previsto (N_0) in termini di assi standard da 120 kN:

$$\text{vita residua (anni)} = \frac{N_{120}^r}{N_0} \quad (2.14)$$

La Figura 2.17 mostra a titolo di esempio il risultato del procedimento di stima della vita utile su una tratta autostradale. In un'ottica di pianificazione al network level, il grafico mostra che sul 6% della tratta esaminata (corrispondente a circa 3.5 km) vanno programmate indagini approfondite al project level per stabilire l'intervento di manutenzione più adatto.

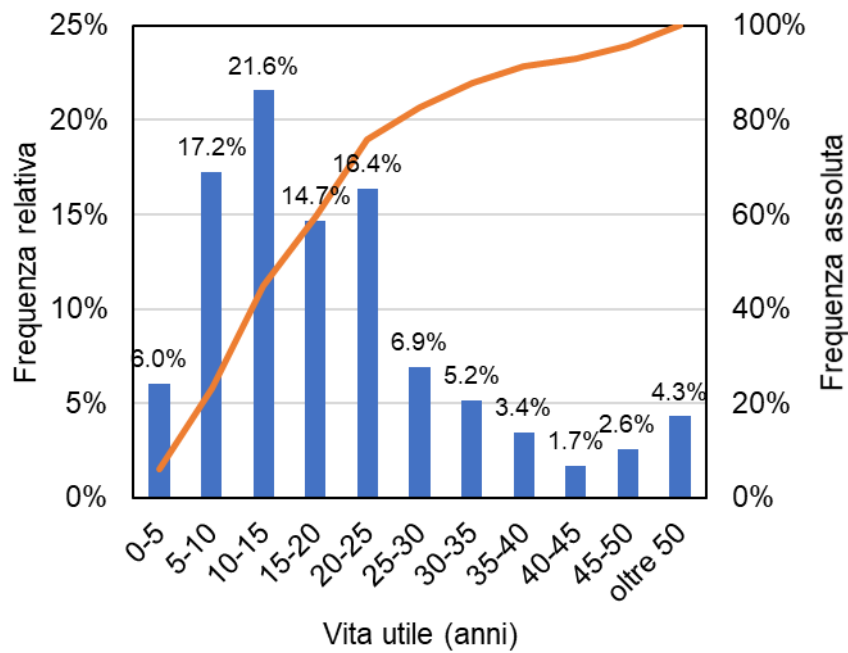


Figura 2.18 Distribuzioni della frequenza relativa e assoluta riferite ai valori di vita utile.

Capitolo 3

Obiettivi

Utilizzando la procedura descritta al Paragrafo 2.4, dalle deflessioni misurate con il TSD è possibile risalire a una stima della vita utile residua della pavimentazione. La procedura si basa su parametri ricavati per pavimentazioni flessibili, perciò, possiamo affermare che il metodo si adatta con una certa precisione a tali pavimentazioni. L'obiettivo principale di questa tesi è estendere la metodologia di stima della vita utile residua nel campo delle pavimentazioni che hanno la caratteristica di avere uno strato di sotto base in misto cementato (pavimentazioni semi-rigide). Per raggiungere questo obiettivo si sono prefissati degli obiettivi specifici che verranno descritti in seguito.

3.1 Obiettivi specifici

Gli obiettivi specifici includono:

- 1. Stimare la rigidità del conglomerato bituminoso (E_{cb}):** Determinare una relazione che consenta di stimare la rigidità dello strato di conglomerato bituminoso in funzione dei parametri del bacino di deflessione, come ad esempio il SCI_{300} , ottenuto dalle deflessioni misurate con il TSD;
- 2. Stimare la deformazione massima di trazione alla base dello strato legato (ϵ_{cb}):** Identificare la migliore relazione che colleghi la deformazione di trazione, responsabile del meccanismo di fessurazione per fatica, con i parametri del bacino di deflessione;
- 3. Correzione per la Temperatura:** Cercare una relazione che permetta di correggere i parametri del bacino di deflessione in funzione della temperatura, affinché le stime della vita utile residua siano più accurate e rappresentative delle condizioni reali.

Questi obiettivi mirano a migliorare la comprensione e la previsione delle prestazioni delle pavimentazioni semirigide, all'interno del network level management, contribuendo a una gestione più efficace delle infrastrutture stradali.

Per raggiungere gli obiettivi preposti, sono state condotte simulazioni numeriche in campo elastico e viscoelastico utilizzando i software **KENPAVE** e **3D-MOVE ANALYSIS** descritti nel dettaglio al Capitolo 4. In particolare, con Kenpave sono state eseguite le analisi elastiche su pavimentazioni flessibili e semirigide, soggette a un carico FWD. Con il 3D-MOVE, invece, sono state eseguite le analisi in campo viscoelastico su pavimentazioni semi-rigide, tipiche delle sezioni autostradali, simulando il carico TSD.

Capitolo 4

SOFTWARE

In questo capitolo, vengono analizzati i software impiegati per condurre studi sulle proprietà elastiche e viscoelastiche delle pavimentazioni. Per le analisi elastiche delle pavimentazioni flessibili “tradizionali” e delle pavimentazioni semi-rigide “autostradali”, è stato scelto il software **Kenpave**, noto per la sua capacità di gestire modelli di pavimentazione e fornire risultati accurati sulle sollecitazioni e deformazioni.

In aggiunta, per le analisi viscoelastiche più complesse, è stato utilizzato il software **3D-MOVE ANALYSIS**. Questo programma offre un approccio avanzato alla modellazione delle pavimentazioni autostradali, consentendo di considerare non solo le proprietà elastiche, ma anche i comportamenti viscoelastici, che sono fondamentali per comprendere le reazioni delle pavimentazioni sotto carico variabile nel tempo.

La combinazione di questi strumenti consente una valutazione dettagliata e approfondita delle prestazioni delle pavimentazioni, supportando decisioni informate nella progettazione e manutenzione delle infrastrutture stradali.

4.1 KENPAVE

Il software Kenpave, sviluppato dal Dr. Yang H. Huang, permette di effettuare analisi su pavimentazioni di tipo flessibile e rigide, e di dimensionarle con il metodo razionale. Il controllo centrale di Kenpave è una schermata principale su cui vengono eseguite varie funzioni attraverso gli 11 pulsanti di comando. Come si evidenzia nella Figura 4.1, la schermata iniziale è suddivisa in due parti, la parte di destra, con i cinque pulsanti, fa riferimento alle pavimentazioni rigide mentre la parte di sinistra con i tre pulsanti alle pavimentazioni flessibili. I restanti tre pulsanti sono per uso generale.

L'utilizzo del software è suddiviso in due fasi. Inizialmente si inseriscono i dati di input della pavimentazione, cliccando sulla voce LAYERINP per le pavimentazioni flessibili o SLABSINP per le pavimentazioni rigide, specificando gli spessori degli strati della pavimentazione, le caratteristiche meccaniche dei materiali, i carichi agenti, i periodi di analisi e i punti in cui effettuare l'analisi. Una volta inseriti i dati di input il software restituisce i risultati richiesti, cliccando sulla voce KENLAYER per le pavimentazioni flessibili o KENSLABS per le pavimentazioni rigide. Per spiegare l'utilizzo dei comandi del software, si è riportato un esempio di analisi su un sistema elastico a tre strati sotto un carico Falling Weight Deflectometer. In questa guida non verrà spiegato l'utilizzo del software per analisi viscoelastiche e analisi di danno.



Figura 4.1. Schermata iniziale

4.1.1 Esempio di analisi elastica di una pavimentazione flessibile a comportamento lineare

Si considera una pavimentazione flessibile composta da 3 strati, che hanno un comportamento elastico lineare, sottoposta a una prova FWD con piastra da 300mm sulla quale agisce un carico di 50KN. In Figura 4.2 si riporta lo schema della pavimentazione in cui si ha:

- Primo strato in conglomerato bituminoso di spessore e rigidezza variabile, il coefficiente di Poisson pari a 0,35;

- Secondo strato in materiale non legato di spessore 250mm e modulo elastico $E=300\text{MPa}$, il coefficiente di Poisson pari a 0,35;
- Il terzo strato è il sottofondo con modulo elastico variabile (20MPa, 50MPa, 100MPa, 200MPa).

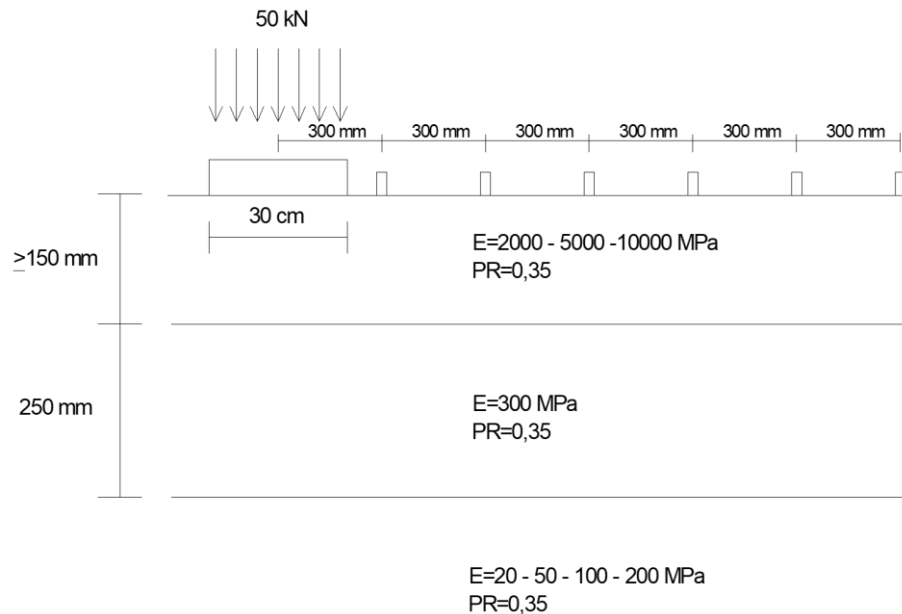


Figura 4.2. Stratigrafia della pavimentazione

Nell'esempio viene illustrata la pavimentazione flessibile con spessore dello strato in conglomerato bituminoso pari a 15 cm e modulo elastico di 2000 MPa.

4.1.2 Inserimento dei dati in INPUT

Procediamo ad inserire i dati in input attraverso la voce LAYERNIP, della schermata principale del Kenpave dove si apre una finestra riportata nella Figura 4.3.

Il menu principale di LAYERNIP vede vari moduli in cui per ognuno si inseriscono i dati richiesti cliccando sull'apposito menu. Se si legge in corrispondenza del modulo un'etichetta rossa con la parola "input" il programma ci indica che mancano dei dati ed è necessario fare clic su di essa per inserirli, una volta inseriti comparirà la parola "done". Se alcuni moduli avranno un'etichetta blu significa che saranno forniti di default dal programma, non è necessario inserire dati a meno che non si desideri modificare i valori predefiniti.

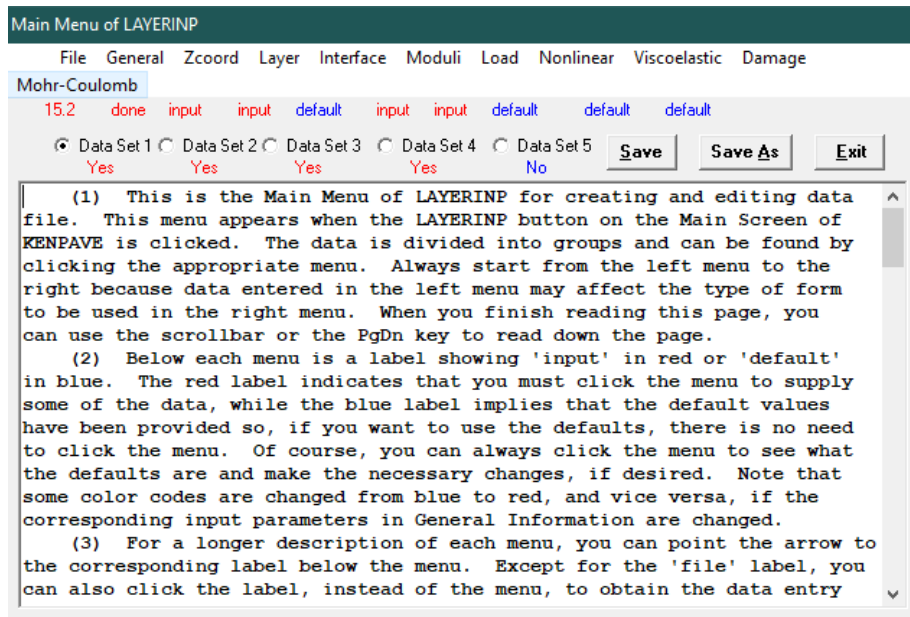


Figura 4. 3. Menu principale di LAYERINP

Inoltre, il programma dà la possibilità di definire diversi insiemi di dati attraverso il “Data Set” fino a un massimo di 5. Questa funzione è molto utile quando vogliamo studiare contemporaneamente la stessa pavimentazione ma con alcuni dati input differenti. Nel nostro esempio, infatti, spessori e rigidità sono variabili quindi per ogni pavimentazione si è mantenuto costante lo spessore e la rigidità del primo e secondo strato, variando nei data set solamente la rigidità dello strato di sottofondo.

Selezionando la voce GENERAL si apre una finestra riportata nella Figura 4.4 dove vengono richiesti i seguenti dati:

- Il titolo che si vuole attribuire al progetto (TITLE);
- La tipologia di materiale che costituisce la sovrastruttura (MATL), nel caso in cui si dispone di un materiale elastico lineare bisogna inserire 1, se si hanno alcuni materiali con comportamento elastico non lineare si inserisce 2, se abbiamo alcuni materiali con comportamento viscoelastico 3 o se si hanno alcuni materiali con comportamento elastico non lineare, altri con comportamento viscoelastico e altri, se presenti con comportamento elastico lineare si inserisce 4;
- L’analisi dei danni (NDAMA), in cui inseriamo 0 se si desidera che il programma non svolga alcuna analisi del danno per le verifiche a fatica e all’ormaiamento. Si inserisce 1 se invece si vuole un risultato dell’analisi del danno sommario che è

raccomandato quando si svolgono analisi grandi periodi e gruppi di carico per alleggerire il processo. Si inserisce “2” per un’analisi dettagliata del danno;

- Numero di periodi dell’anno (NPY) visto il comportamento termo-dipendente del conglomerato bituminoso il programma permette di suddividere il periodo di analisi, convenzionalmente un anno, in diversi periodi per un massimo di 12 che corrispondono ai mesi;
- Numero gruppi di carico (NLG), qui si può inserire un massimo di 12 gruppi di carico per poter considerare nell’analisi i vari tipi di carico che interessano la pavimentazione;
- Tolleranza per l’integrazione numerica (DEL), è un valore predefinito di 0,0001;
- Numero degli strati (NL), si inserisce il numero totale degli strati che compongono la sovrastruttura;
- Numero di coordinate lungo Z in cui fare l’analisi (NZ), si inserisce il numero dei punti lungo la direzione Z in cui si vuole che il programma ci restituisca i valori di output;
- Numero massimo di cicli di integrazione (ICL), è un valore predefinito pari a 80;
- Tipo di risposta (NSTD), se si vuole come dati di output solamente gli spostamenti verticali inseriamo 1, se vogliamo oltre agli spostamenti verticali anche le sollecitazioni nelle quattro direzioni inseriamo 5 o se vogliamo oltre agli spostamenti e alle sollecitazioni anche le deformazioni nelle quattro direzioni inseriamo 9;
- Tipo di interfaccia tra gli strati (NBOND), se l’interfaccia tra gli strati è perfettamente aderente si inserisce 1, quando invece l’interfaccia non è perfettamente aderente si inserisce 2;
- Numero di strati in conglomerato bituminoso (NLBT), si inserisce il numero di strati in conglomerato bituminoso, di solito uno, in cui far eseguire l’analisi del danno relativa alla determinazione della tensione di trazione alla base dello strato stesso. Se si dispone di più strati il programma confronta i vari risultati sui vari strati e restituisce il rapporto massimo.
- Numero di strati non legati (NLTC), inseriamo il numero di strati non legati, di solito uno, in cui far eseguire l’analisi del danno relativa alla determinazione della tensione di compressione alla sommità dello strato stesso. Se abbiamo più strati

il programma confronta i vari risultati sui vari strati e ci restituisce il rapporto massimo.

- Sistema di unità (NUNIT), inseriamo 1 per utilizzare il sistema internazionale oppure 0 per il sistema inglese.

Nella parte inferiore di ogni finestra c'è una sezione di aiuto che riporta tutte le informazioni utili per l'utilizzo della finestra stessa.

General Information of LAYERINP		
TITLE	FWD VAN GURP	
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	0
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0.001
Number of layers	(NL)	3
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	2
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	1
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	0
Number of layers for top compression	(NLTC)	0
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	1

(1) This form appears when the 'General' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. To read this textbox more easily with more lines in sight, you may want to resize this form by moving it up and dragging the bottom boundary down. If you want to use the PgDn key to scroll down the page, you must click this textbox first to make it active, as indicated by the blinking cursor. When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system of units, so they are generated after NUNIT is specified and this form activated. These default values are generated only once, i.e.

Figura 4.4. voce GENERAL

Andando successivamente alla voce ZCOORD, si apre una finestra riportata nella Figura 4.5 dove inseriamo le coordinate lungo la direzione Z in cui si vuole che il programma ci restituisca i valori di output, dei punti che si sono definiti in precedenza sotto la voce NZ. Un aspetto importante da considerare è che, se il punto si trova all'interfaccia tra due strati, il programma automaticamente genera i risultati nella parte inferiore dello strato superiore. Se si desidera avere i risultati nella parte superiore dello strato inferiore è necessario invece una coordinata leggermente più grande, ad esempio 0,0001 più grande.

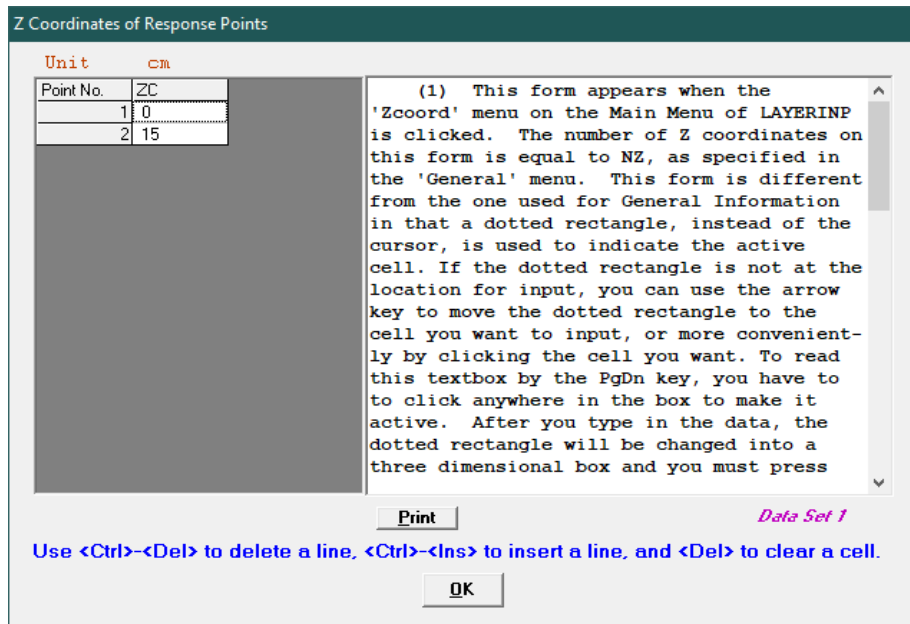


Figura 4.5. voce ZCOORD

Andando poi sulla voce LAYER si apre una finestra riportata nella Figura 4.6 dove ci vengono richiesti gli spessori di ogni singolo strato che costituisce la nostra sovrastruttura e il coefficiente di Poisson.

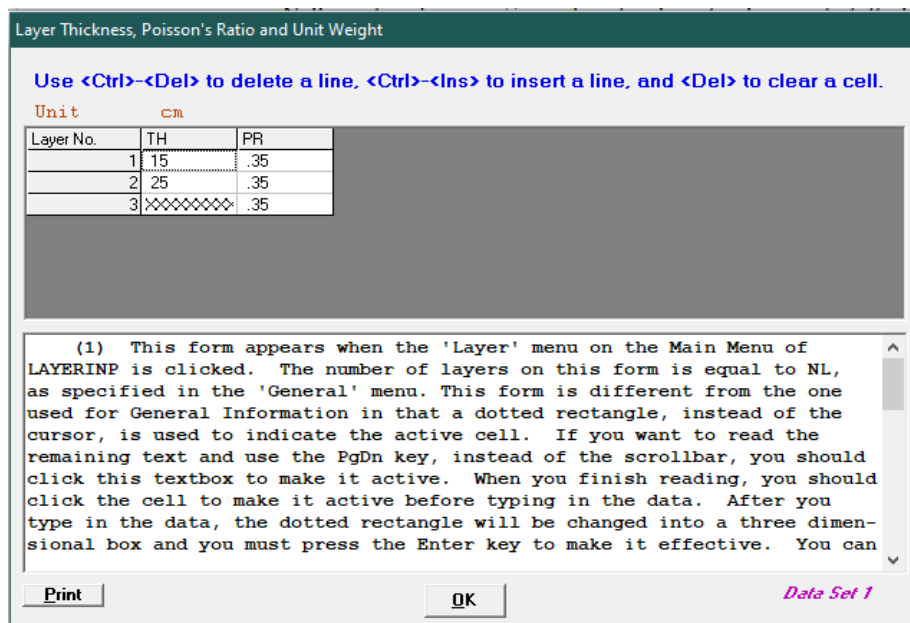


Figura 4.6. voce LAYER

Andando nella voce MODULI si apre una finestra (Figura 4.7) dove vengono riportati i periodi di analisi definiti alla voce NPY specificati nel menù GENERAL, nel caso specifico è riportato un solo periodo di analisi. Cliccando sulla voce Period1 si apre un'ulteriore finestra riportata nella Figura 4.8 dove vengono richiesti i valori del modulo elastico di ogni strato della nostra sovrastruttura.

Layer Modulus of each period

Period1

input

(1) This form appears when the 'Moduli' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of periods on this form is equal to NPY, as specified in the 'General' menu. The 12 buttons on the form indicates that a maximum of 12 periods may be used. However, only the periods being actually specified are marked with the period number on the button.

(2) Below the period button is a label showing 'input' in red, indicating that there are no defaults and you must enter the elastic modulus for each layer. After the data are entered, the letter 'input' will be changed to 'done'.

(3) If you want to print this text, you can click the print button below at the left corner.

(4) Now you can click the 'Period1' button to enter the data. After the data for all periods are entered, as indicated by 'done' under each

Print Data Set 1

OK

Figura 4.7 voce MODULI

Layer Moduli for Period No. 1

Unit	kPa
Layer No.	E
1	2000000
2	300000
3	20000

(1) This form appears when the period button on the Layer Modulus of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu.

(2) E (elastic modulus of each layer): If more convenient, you can enter the modulus in exponential form such as 1.234E5. Assign 0 or any value for viscoelastic layer. For a nonlinear layer, E is the assumed modulus for the first iteration and a convenient E to be assumed for both granular base and clayey subgrade is their K1 value

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one

Print Data Set 1

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Figura 4.8. Voce PERIOD1

Infine, si procede sulla voce LOAD, in cui si apre una finestra riportata nella Figura 4.9 dove vengono riportati sulla prima colonna i gruppi di carico che sono stati definiti in precedenza nel menù GENERAL alla voce NLG. Sulla seconda colonna sotto la dicitura LOAD dobbiamo andare a specificare il tipo di carico che si suppone agisca sulla pavimentazione. Possiamo avere tre differenti configurazioni di carico, di seguito riportate:

- Asse singolo con singola ruota;
- Asse singolo con ruota doppia;
- Asse doppio;

- Asse triplo.

In Figura 4.10 si riportano le suddette configurazioni. Nell'esempio sottoponendo la pavimentazione ad una prova FWD, possiamo modellare il carico assimilandolo ad un'asse singolo su ruota singola e quindi assegniamo il valore 0 alla voce LOAD. Nella terza colonna alla voce CR viene richiesto il raggio di contatto dello pneumatico sulla pavimentazione. Nel caso in esempio considerando la piastra di carico di diametro 30cm. Nella quarta colonna sotto la voce CP viene richiesta la pressione che esercita il carico sulla pavimentazione. Nelle colonne YW e XW si inseriscono i valori che corrispondono alla distanza tra gli assi degli pneumatici nella direzione X e Y, che dipendono dalla configurazione del carico. Questi valori sono posti uguale a 0 in quanto stiamo considerando un singolo pneumatico. Per ultimo nella colonna NR or NPT inseriamo il numero di coordinate radiali da analizzare sotto il nostro carico. Cliccando su questa voce si apre una finestra, come mostrato in Figura 4.11, nella quale inseriamo le coordinate dei punti di interesse secondo un sistema di riferimento. In particolare, si sono inserite le coordinate dei geofoni della prova FWD distanti tra loro 30 cm a partire dalla piastra di carico.

Double click anywhere on a line to get auxiliary form for NR or NPT.

Unit	cm	kPa	cm	cm		
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	XW	NR or NPT
1	0	15	707.7141	0	0	8

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

(1) This form appears when the 'Load' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of lines, or load groups, is equal to NLG, as specified in the 'General' menu. Please refer to Figure 3.8, p. 104, for axle arrangements.

(2) LOAD (type of loading): Assign 0 for single axle with single tire, 1 for single axle with dual tires, 2 for tandem axles, and 3 for tridem axles.

(3) CR (contact radius of circular loaded ares).

(4) CP (contact pressure on circular loaded ares).

(5) YW (center to center spacing between two dual wheels along the y

Print OK Data Set 1

Figura 4.9. Voce LOAD

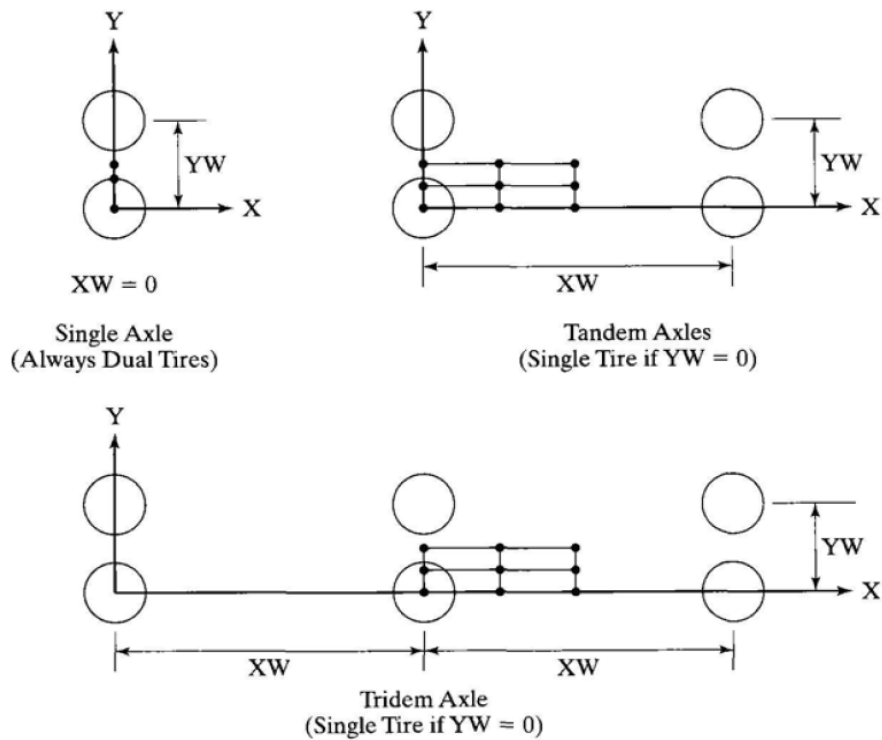


Figura 4.10. Configurazioni di carico

Radial Coordinates of Response Points for Load Group No. 1

Point No.	RC
1	0
2	30
3	60
4	90
5	120
6	150
7	180
8	210

(1) This auxiliary form appears automatically when NR of a given load is typed on the main form. If NR was specified previously, you can also enter this auxiliary form by double clicking the main form anywhere on the given load group, instead of retyping NR, to enter this auxiliary form.

(2) RC (radial distances, or R coordinates, of points to be analyzed).

(3) After typing the data in a cell, be sure to press the Enter or down arrow key to make it effective.

(4) You can delete a line, or one of the points, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NR in the main form will be reduced automatically by 1.

Print Data Set 1

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Figura 4.11. Voce NR or NPT

Completato l'inserimento dei dati in input, torniamo nella finestra principale di LAYERNIP. Assicuriamoci di salvare il file e clicchiamo sul tasto EXIT per chiudere.

Per modificare qualche dato o semplicemente ispezionare i dati inseriti possiamo operare in due modi. Il primo modo è quello di riaprire il file attraverso LAYERNIP e procedere, oppure

un modo più rapido è quello di aprire la voce EDITOR dalla schermata iniziale del KENPAVE mostra in Figura 4.12.

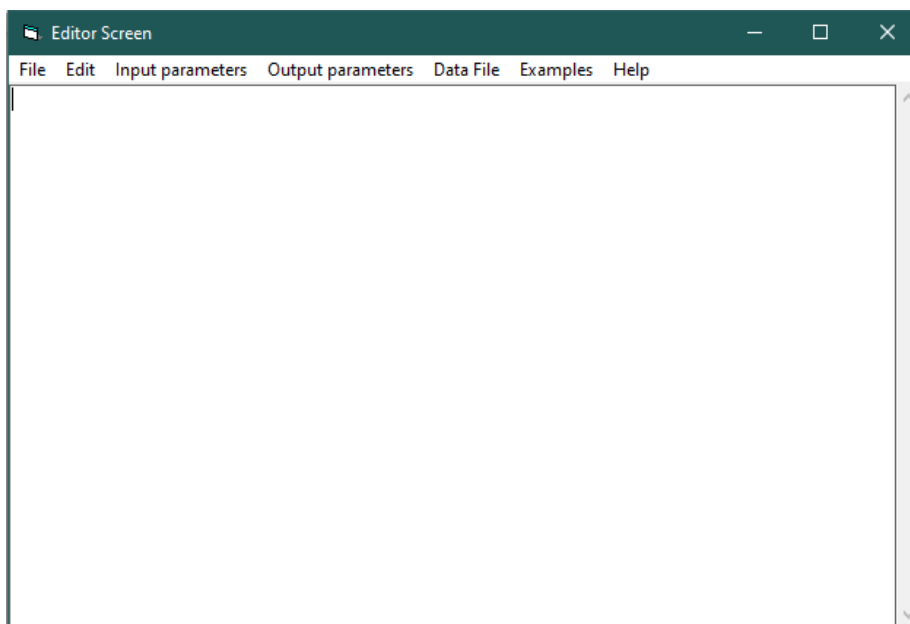


Figura 4.12. Voce EDITOR dalla schermata iniziale

In questo modo è più facile immettere il file e visualizzarne l'intero contenuto. Tuttavia, è necessario fare attenzione a non commettere errori durante l'editing. Se si commettesse un errore, potrebbe non essere possibile caricare e modificare il file tramite LAYERNIP a causa dell'incompatibilità dei dati. Se ciò si verifica il programma produce un messaggio di errore ed è necessario ispezionare il file dati da EDITOR, scoprire l'errore commesso e apportare le correzioni necessarie.

4.1.3 Estrazione dei dati OUTPUT

Una volta terminato l'inserimento dei dati di input richiesti dal programma si torna alla schermata principale riportata nella Figura 4.1 e si seleziona la voce KENLAYER, così facendo il programma avvia l'analisi secondo i dati forniti e crea un file di testo dove troveremo i dati di output che è possibile salvare. Nel file di output vengono restituite le informazioni di input riassunte, come si vede in Figura 4.14 e i risultati richiesti nelle coordinate radiali e verticali (RC, ZC). In particolare, come si evidenzia in Figura 4.15 il programma ci restituisce risposte come lo spostamento verticale, tensioni e deformazioni radiali, verticali, tangenziali e di taglio. Nella Figura 4.16 viene riportato lo schema delle tensioni principali all'interno del multistrato elastico.

```

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\ANALISI\FWD Van Gulp\15.2.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 4

TITLE -FWD VAN GURP

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 2
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 15 25
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.35 0.35
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 15
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 2.000E+06 2 3.000E+05
3 2.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 15
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 707.7141
RADIAL COORDINATES OF 8 POINT(S) (RC) ARE : 0 30 60 90 120 150 180
210

```

Figura 4.14. File di output, riepilogo dei dati input inseriti

PERIOD NO.	LOAD GROUP NO.	RADIAL COORDINATE	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPLACEMENT	VERTICAL STRESS (STRAIN)	RADIAL STRESS (STRAIN)	TANGENTIAL STRESS (STRAIN)	SHEAR STRESS (STRAIN)
1	1	0.00000	0.00000	0.12468	707.714	1026.684	1026.684	0.000
		(STRAIN)			-1.928E-04	2.754E-04	2.754E-04	.000E+00
		0.00000	15.00000	0.12721	220.180	-841.511	-841.511	0.000
		(STRAIN)			4.046E-04	-3.120E-04	-3.120E-04	.000E+00
		30.00000	0.00000	0.10974	0.000	447.565	525.994	0.000
		(STRAIN)			-1.230E-04	1.151E-04	1.681E-04	-.138E-10
		30.00000	15.00000	0.10911	33.387	14.177	-234.173	68.869
		(STRAIN)			5.519E-05	4.223E-05	-1.254E-04	.930E-04
		60.00000	0.00000	0.09062	0.000	181.500	228.018	0.000
		(STRAIN)			-5.939E-05	4.655E-05	7.795E-05	.105E-10
		60.00000	15.00000	0.08894	4.685	43.967	-66.948	31.457
		(STRAIN)			6.364E-06	3.288E-05	-4.199E-05	.425E-04
		90.00000	0.00000	0.07643	0.000	89.234	142.103	0.000
		(STRAIN)			-3.439E-05	1.761E-05	5.330E-05	-.358E-11
		90.00000	15.00000	0.07277	2.318	34.064	-25.798	15.152
		(STRAIN)			-2.877E-07	2.114E-05	-1.927E-05	.205E-04
		120.00000	0.00000	0.06468	0.000	50.100	86.360	0.000
		(STRAIN)			-2.044E-05	8.733E-06	3.321E-05	-.472E-11
		120.00000	15.00000	0.05980	1.333	27.535	-9.822	7.498
		(STRAIN)			-2.433E-06	1.525E-05	-9.963E-06	.101E-04
		150.00000	0.00000	0.05547	0.000	30.715	55.875	0.000
		(STRAIN)			-1.295E-05	4.808E-06	2.179E-05	.474E-11
		150.00000	15.00000	0.04954	0.753	21.928	-2.733	3.656
		(STRAIN)			-2.982E-06	1.131E-05	-5.336E-06	.494E-05
		180.00000	0.00000	0.04824	0.000	20.273	38.058	0.000
		(STRAIN)			-8.676E-06	2.940E-06	1.495E-05	.193E-11
		180.00000	15.00000	0.04149	0.412	17.085	0.491	1.675
		(STRAIN)			-2.870E-06	8.384E-06	-2.817E-06	.226E-05
		210.00000	0.00000	0.04251	0.000	14.225	27.100	0.000
		(STRAIN)			-6.106E-06	1.976E-06	1.067E-05	.125E-11
		210.00000	15.00000	0.03522	0.214	13.085	1.891	0.663
		(STRAIN)			-2.514E-06	6.174E-06	-1.382E-06	.895E-06

Figura 4.15. File di output, risposta della pavimentazione

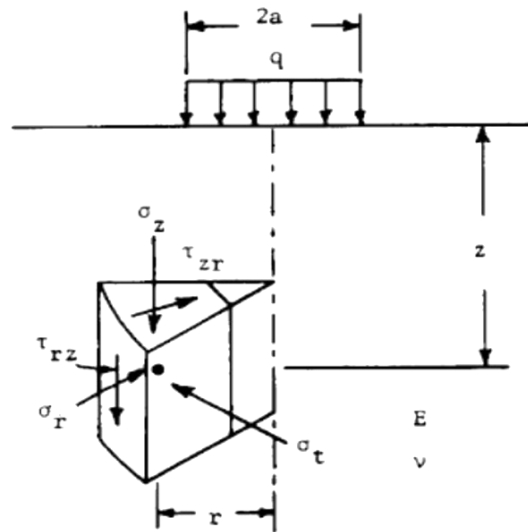


Figura 4.16. Tensioni principali nel mezzo elastico

Infine, dai risultati ottenuti si possono costruire grafici che spieghino meglio il dato stesso. Per esempio, dai dati di spostamento verticale dei punti sulla superficie della pavimentazione presa in esame si può creare un grafico in cui si riportano le deflessioni della pavimentazione dovute al passaggio del carico. (Figura 4.17)

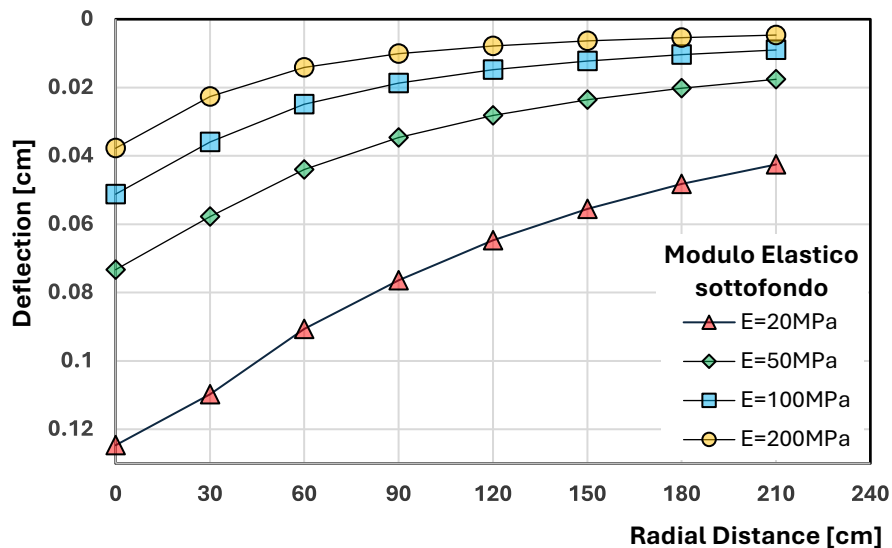


Figura 4.17. Grafico di deflessione sviluppato dai dati output

4.2 3D-MOVE ANALYSIS

Il software 3D-MOVE ANALYSIS, sviluppato dall'università del Nevada-Reno permette di ottenere analisi elastiche e soprattutto viscoelastiche su pavimentazioni stradali con il metodo degli strati finiti. Il modello di analisi 3D-Move può tenere conto di importanti fattori di risposta della pavimentazione, come le complesse distribuzioni delle sollecitazioni di contatto 3D indotte dal traffico in movimento (normali e a taglio) di qualsiasi forma, la velocità del veicolo e la caratterizzazione del materiale viscoelastico per gli strati della pavimentazione. Questo approccio tratta ogni strato di pavimentazione come un continuo e utilizza la tecnica della trasformata di Fourier. Pertanto, è in grado di gestire carichi superficiali complessi come carichi multipli e distribuzione non uniforme delle sollecitazioni di contatto con la pavimentazione dello pneumatico. Poiché l'impronta dello pneumatico può essere di qualsiasi forma, questo modello di analisi è adatto per analizzare le impronte dello pneumatico. Il metodo degli strati finiti è molto più efficiente dal punto di vista computazionale rispetto ai modelli di carico mobile basati sul metodo degli elementi finiti. Ciò è dovuto al fatto che spesso le pavimentazioni sono stratificate orizzontalmente e le risposte della pavimentazione sono solitamente richieste solo in alcune posizioni selezionate e per tali problemi l'approccio a strati finiti dell'analisi 3D-Move è l'ideale. Poiché l'approccio può tenere conto delle proprietà del materiale dipendenti dalla velocità (viscoelastico), è uno strumento ideale per modellare il comportamento dello strato di conglomerato bituminoso (CB) e anche per studiare la risposta della pavimentazione in funzione della velocità del veicolo.

Di seguito viene illustrata la guida del software passo dopo passo.

4.2.1 Installare 3D-MOVE ANALYSIS

Per installare il software:

1. Avviare Windows;
2. Eseguire Setup.exe file associato al programma 3D-Move.

Segui semplicemente le istruzioni sullo schermo per installare 3D-Move Analysis. Fare clic su "Avanti" per avviare l'installazione nella schermata di benvenuto. La directory predefinita per l'installazione dei file di programma è C: Program Files/UNR/3D-Move Analysis. All'utente

viene fornita la possibilità di modificare la directory di installazione. Il programma di installazione copia diversi file nella directory principale del programma 3D-Move Analysis.

Durante l'installazione, il programma 3D-Move Analysis verrà aggiunto al menu Start di Windows. Per trovare il software, fai clic sul pulsante "Avvia" nell'angolo in basso a sinistra dello schermo. Vai all'opzione "Programmi" con il cursore per visualizzare un elenco di cartelle e programmi. Selezionare la cartella "UNR" e quindi selezionare l'icona 3D-Move Analysis. In alternativa, il programma può essere eseguito anche facendo doppio clic sull'icona del programma presente sul desktop.

4.2.2 Disinstallare 3D-MOVE ANALYSIS

Per disinstallare il software 3D-Move Analysis:

1. Seleziona il pulsante "Start" di Windows;
2. Seleziona o sposta il mouse su Impostazioni;
3. Selezionare "Pannello di controllo"; Seleziona "Aggiungi/Rimuovi programmi";
Disinstallare il software di analisi 3D-Move.

4.2.3 Interfaccia grafica di 3D-MOVE ANALYSIS

Una volta aperto il programma apparirà la schermata iniziale mostrata in Figura 4.18. Come si mostrato sono attive solo le barre dei menu File, Guida e informazioni.

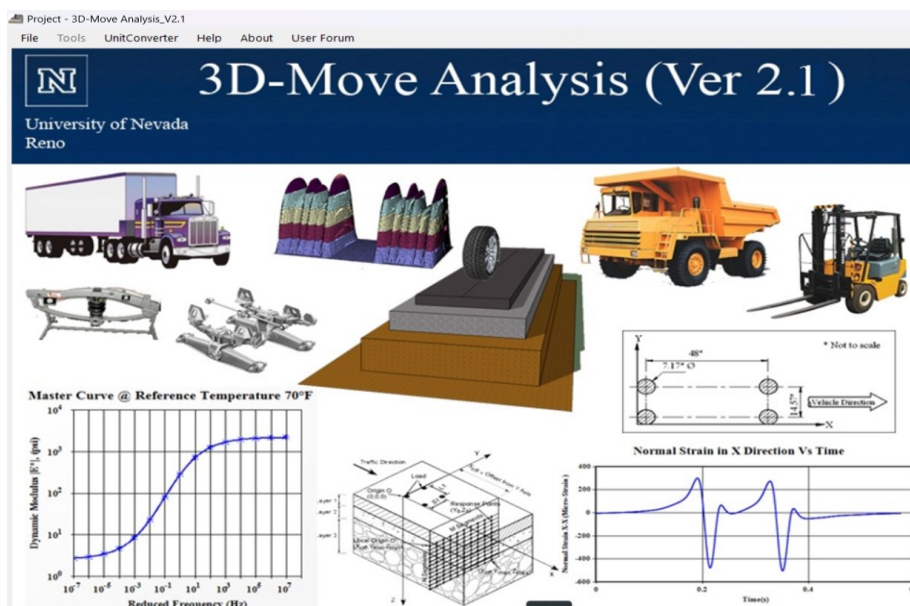


Figura 4.18 Schermata iniziale del software 3D-Move Analysis

Selezionando dalla barra dei menu FILE > NEW creiamo un nuovo progetto (Figura 4.19) e nella casella di testo PROJECT NAME specifichiamo il titolo che vogliamo attribuire. La cartella del progetto (PROJECT FOLDER) è la posizione in cui sono memorizzati i file di input e output relativi a questo progetto. La posizione della cartella del progetto può essere modificata.

Nel caso in cui si carichi un progetto esistente che è stato memorizzato in un lavoro precedente, fare clic su FILE > OPEN dalla barra dei menu e specificare un nome file esistente.

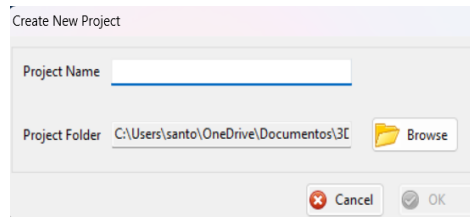


Figura 4.19 Finestra per un nuovo progetto

È consigliabile attribuire al file solamente titoli privi di numeri e spazi per non incorrere in bug del programma.

Nel menu HELP, Figura 4.20, è possibile accedere alla guida del programma dove sono riportati la spiegazione di alcuni argomenti e degli esempi pratici in modo da indirizzare l'utente ad una migliore comprensione.



Figura 4.20. Finestra Help di 3D-Move Analysis

Accedendo al menu USER FORUM è possibile fornire indicazioni e feedback agli utenti; è stato creato un forum su Internet "3D-Move Discussion Group" a cui è possibile accedere utilizzando l'URL <http://3dmove.finddiscussion.com>. Questo sito è dedicato alla raccolta di feedback, commenti, problemi e preoccupazioni, ecc. di persone che stanno valutando e/o utilizzando 3D-Move. Ci sono due forum disponibili su questo sito: 3D-Move Discussion e 3D-Move

Newsletter. Il primo è dedicato alla discussione sulle caratteristiche di 3D-Move e fornisce la soluzione e il feedback alle domande degli utenti. Gli utenti registrati possono inviare domande nel forum di 3D-Move Discussion e gli amministratori di 3D-Move possono fornire risposte e altri suggerimenti utili agli utenti. Le discussioni possono andare avanti tra gli utenti e gli amministratori del software e anche tra gli utenti. Queste discussioni saranno disponibili sul sito per la visualizzazione da parte di tutti gli utenti registrati. L'altro forum, 3D-MOVE Newsletter, è dedicato a elementi come note sugli aggiornamenti software e anche a pubblicare informazioni significative relative all'uso software. In Figura 4.21 viene mostrata la pagina Internet del “3D-Move Discussion Group”.

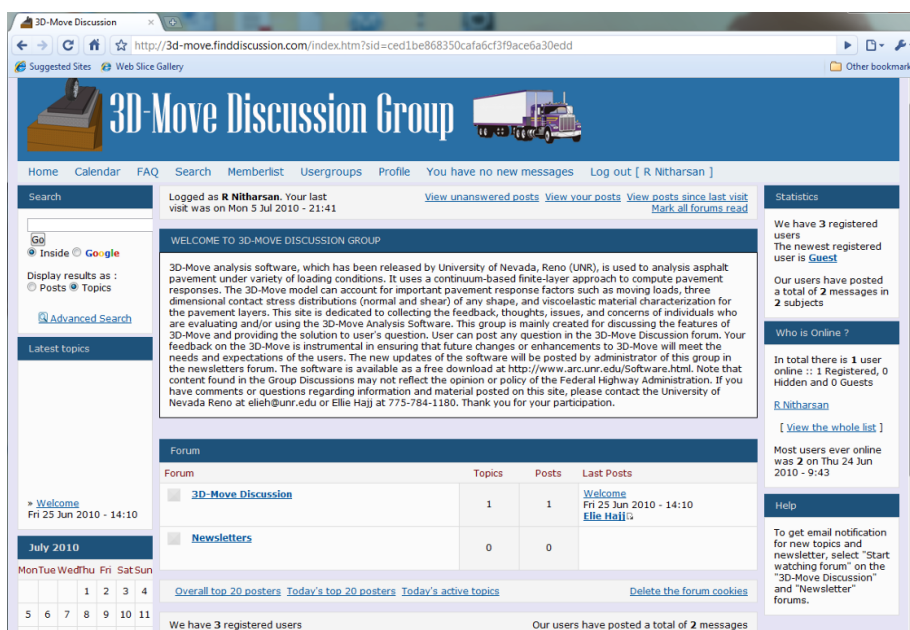


Figura 4.21 User Forum di 3D-Move Analysis

4.2.4 Inserimento dati nel 3D-MOVE ANALYSIS

Dopo aver creato un nuovo progetto, come si mostra in Figura 4.22, si aprirà la finestra principale di 3D-Move. Questa finestra è suddivisa in più pannelli, nella parte in alto troviamo le informazioni riferiti al progetto (PROJECT) come il sito e la tipologia di analisi che vogliamo effettuare sulla pavimentazione. Nella parte bassa, possiamo vedere due pannelli, quello di sinistra riguardante l’inserimento dei dati in input (INPUTS) riferiti alla pavimentazione, quello a destra dedicato all’output (RESULTS). Ogni voce è affiancata da un indicatore che inizialmente si presenta di colore rosso, il che significa il dato non è stato inserito. Inserito il dato, l’indicatore cambierà colore diventando verde. Di lato abbiamo informazioni riguardanti

lo stato dell'analisi (ANALYSIS STATUS) una volta che il la si avvia, e le informazioni del progetto a mano a mano che si inseriscono i dati (PROJECT INFORMATION).

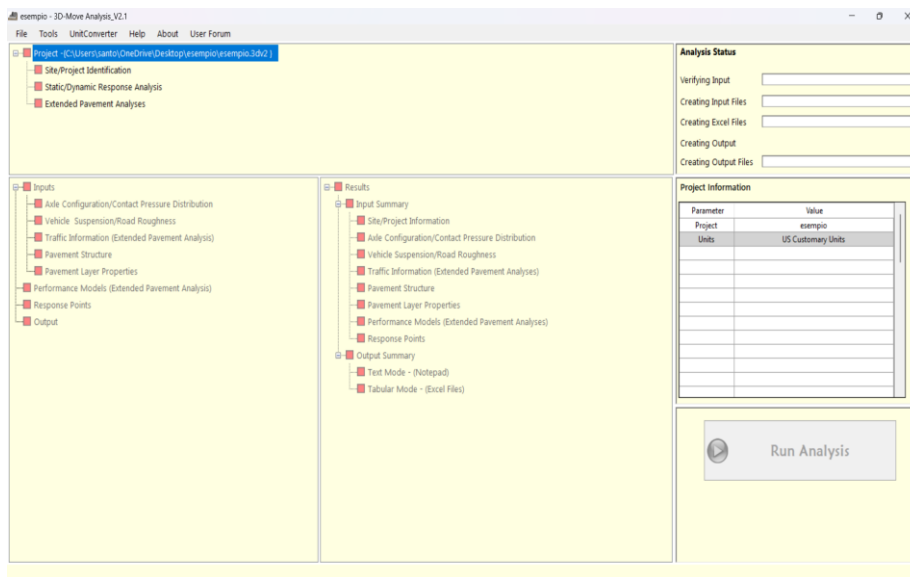


Figura 4.22. Finestra principale di 3D-Move Analysis

Prima di procedere con l'inserimento dei dati, è importante definire il sistema di unità da utilizzare. Il programma 3D-Move è in grado di analizzare un problema utilizzando due sistemi di unità differenti. Questi sono:

- Sistema di unità degli Stati Uniti (in, lb, °F, mph);
- Unità SI (m, kN, °C, km/h).

Il sistema di unità può essere modificato facendo clic su TOOLS > UNITS (Figura 4.23) dalla barra dei menu. Per impostazione predefinita, il sistema di unità è impostato sul sistema di unità statunitensi. Il programma non permette di cambiare questa impostazione una volta iniziato l'inserimento dei dati input.

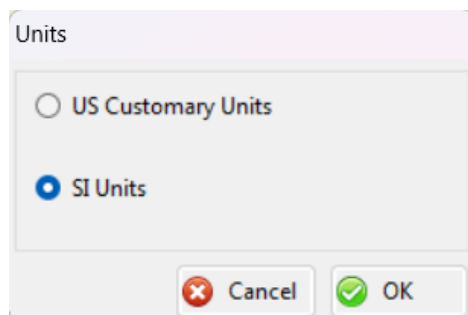


Figura 4.23. Finestra Units di 3D-Move Analysis

Come notato sopra, l'analisi 3D-Move è in grado di gestire unità SI e US e il convertitore di unità (UNIT CONVERTER) fornisce i fattori di conversione per lunghezza, forza, sollecitazione e velocità tra le unità. Si raccomanda di verificare questi fattori poiché alcuni di essi sono affetti da errore (in Figura 4.24 è evidenziato in rosso i fattori in errore).

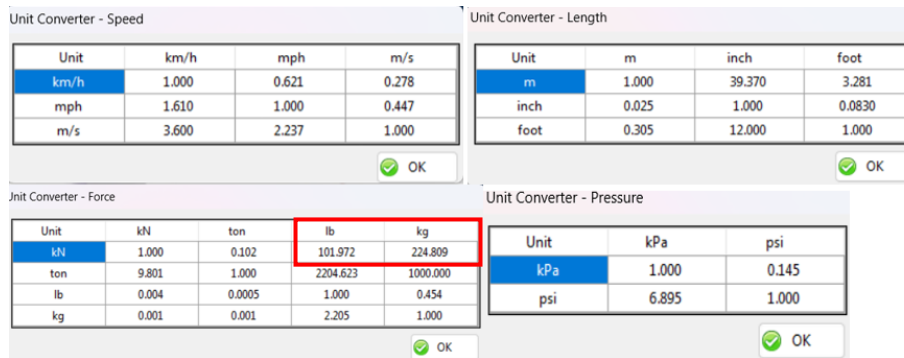


Figura 4.24. Finestra Unit Converter di 3D-Move Analysis

Si descrive step by step ogni singola voce di ogni pannello della finestra principale del 3D-MOVE ANALYSIS

4.2.4.1 PROJECT

Questo è un pannello principale di 3D-Move Analysis. L'utente può inserire informazioni generali sul progetto e sul sito, sul tipo di analisi e sul tipo di analisi estesa.

Site/ Project Identification

Il primo passo è quello di inserire le informazioni sul progetto, fare clic su Identificazione sito/progetto nella finestra principale mostrata in Figura 4.22 e verrà visualizzata la finestra in Figura 4.25. Qui viene richiesto di inserire i dettagli del progetto. Una volta forniti tutti gli input, fare clic su OK per accettare le modifiche apportate.

Figura 4.25 Finestra Site/Project Identification

Type of Analysis

Nell'analisi 3D-Move, la struttura della pavimentazione può essere analizzata come segue:

- 1) Analisi Statica - In questo caso, la velocità del veicolo sarà zero;
- 2) Analisi Dinamica - In questo caso, l'utente deve inserire la velocità del veicolo.

La Figura 4.26 mostra la finestra di input per il tipo di analisi, l'impostazione di default è Analisi statica.

Figura 4.26 Finestra di input per il tipo di analisi

Extended Pavement Analysis

Il 3D-MOVE ANALYSIS permette di avere un'analisi sulle prestazioni della pavimentazione in termini di danno. Il software è dotato di due modelli di previsione della pavimentazione:

- NCHRP 1-37A ;
- VESYS.

In questi modelli, le principali modalità di rottura della pavimentazione avvengono per fessurazione e ormaimento. Se si decide di avere questo tipo di analisi, è possibile scegliere

il modello più avanti, alla voce PERFORMANCE MODELS, disponibile nella finestra principale 3D-MOVE.

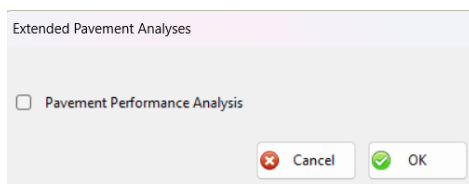


Figura 4.27. Finestra di analisi estesa della pavimentazione

4.2.4.2 INPUTS

Axle Configuration and Contact Pressure Distribution

Uno degli input importanti per l'analisi 3D-Move è la distribuzione delle sollecitazioni di contatto della pavimentazione. È consuetudine assumere distribuzioni delle sollecitazioni di contatto più semplici, ad esempio aree caricate circolari o ellittiche con sollecitazione verticale uniforme. Tuttavia, le distribuzioni delle sollecitazioni di contatto della pavimentazione non sono uniformi e sono più complesse. Studi precedenti hanno rivelato che è importante includere le distribuzioni di stress non uniformi poiché le distribuzioni più semplici non sono né realistiche né conservative. Cliccando sulla prima voce AXIS CONFIGURATION AND CONTACT PRESSURE DISTRIBUTION, si aprirà la finestra in Figura 4.28, dove l'utente specifica la propria condizione di carico tra i sei tipi di carico a disposizione.

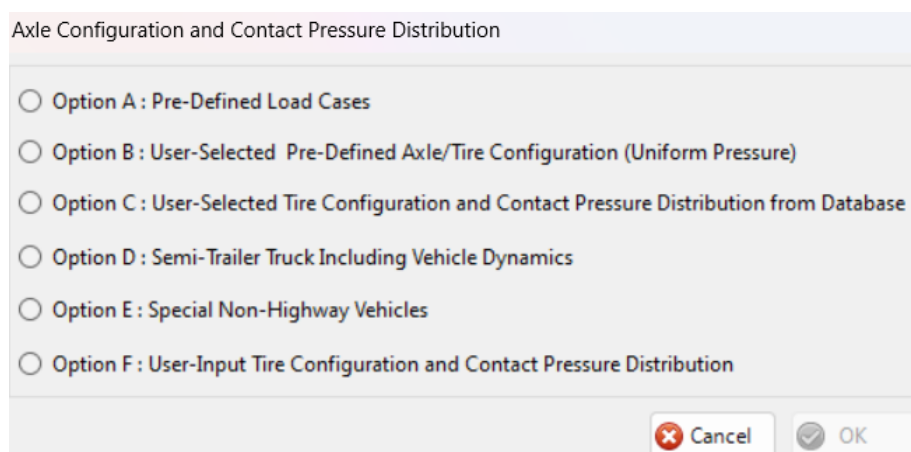


Figura 4.28. Finestra Axle Configuration and Contact Pressure Distribution

Option A – Pre-Defined Load Cases

Qui la forma dell'area caricata è uniforme. Con questa opzione, nel programma sono stati predefiniti nove casi di carico e non è possibile modificarne i parametri (carico dello pneumatico, pressione dello pneumatico e forma dell'area caricata). I dettagli sui casi di carico sono forniti nelle seguenti figure.

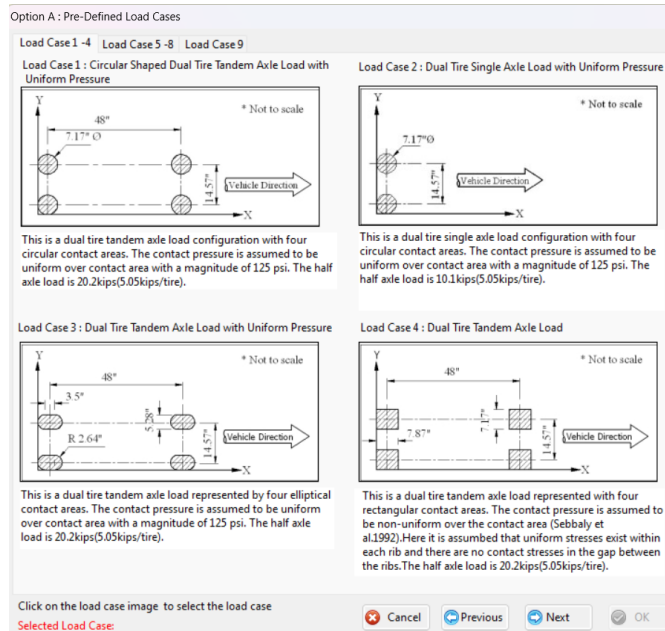


Figura 4.29. Finestra Opzione A – Pre-Defined Load Cases 1-4

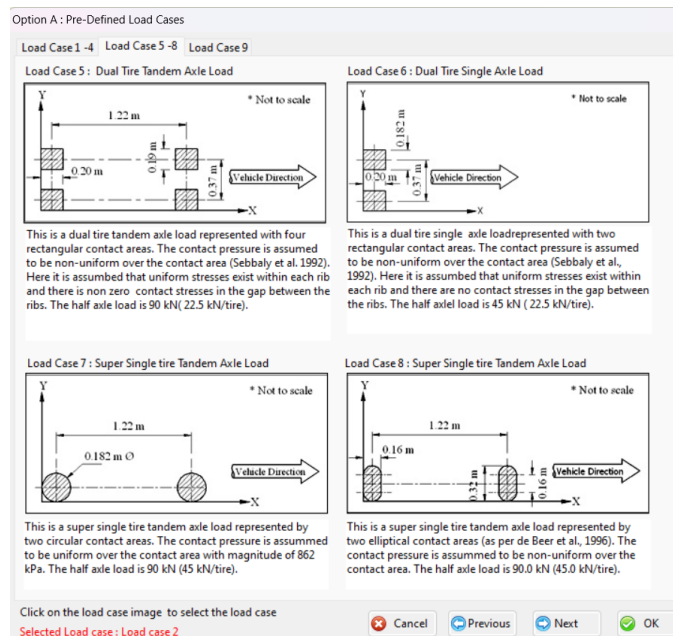


Figura 4.30. Finestra Opzione A – Pre-Defined Load Cases 5-8

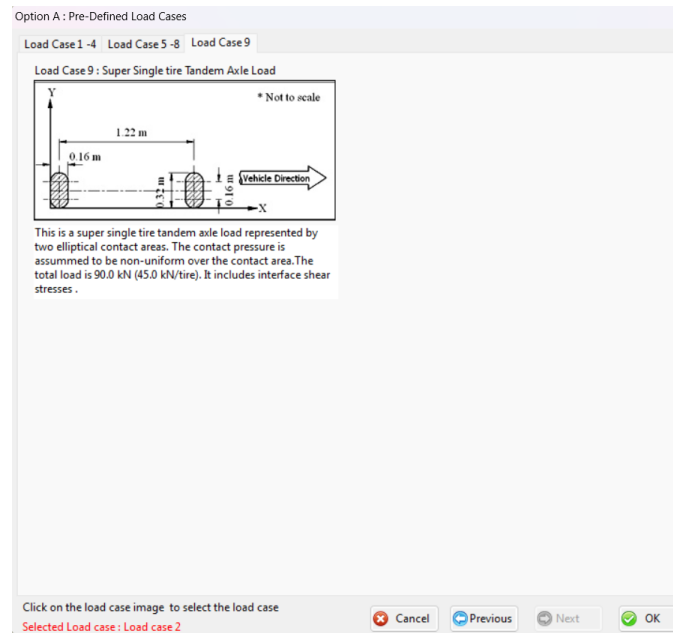


Figura 4.31. Finestra Opzione A – Pre-Defined Load Cases 9

Option B – User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)

Con questa opzione si offre all'utente la libertà di creare il carico uniforme a differenza dell'opzione A, inserendo manualmente la forma dell'area caricata tra le tre opzioni disponibili, la configurazione dell'asse e dello pneumatico. Si deve fornire il valore di pressione del pneumatico, il carico agente e la spaziatura degli assi. Inoltre, si può fornire informazioni per il coefficiente di attrito (necessario per la distribuzione della sollecitazione di taglio a contatto di interfaccia). Il programma genererà internamente la distribuzione uniforme della pressione di contatto per la forma selezionata e la distanza tra gli assi. A seconda della dell'area caricata selezionata il programma utilizza delle equazioni per calcolare il parametro geometrico:

- Raggio del cerchio, R

$$R = \sqrt{\frac{Tire Load}{\pi * Tire Pressure}} \quad (4.1)$$

- Lunghezza dell'ellisse, L

$$L = \sqrt{\frac{Tire Load}{0.5227 * Tire Pressure}} \quad (4.2)$$

- Lunghezza del rettangolo, a e b

$$a = \sqrt{\frac{\text{Tire Load} * \text{aspect ratio}(a/b)}{\text{Tire Pressure}}} \quad (4.3)$$

$$b = \sqrt{\frac{\text{Tire Load}}{\text{Tire Pressure} * \text{aspect ratio}(a/b)}} \quad (4.4)$$

Option B : User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)

Reference Title for Axle ASSE 1


Tire Pressure 800 kPa Tire Load 30 kN

Geometry of Loaded Area

Circle

Ellipse

Rectangle



Note:

$$R = \sqrt{\frac{\text{Tire Load}}{\pi * \text{Tire Pressure}}}$$

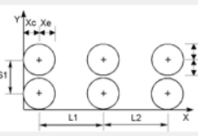
Calculated R 0.109 m

Axle Spacing

L1 0 m

L2 0 m

S1 0.35 m



Xc = 0.109 m Yc = 0.109 m

Xe = 0.109 m Ye = 0.109 m

Friction Coefficient

Rolling Friction Coefficient

Bracking Friction Coefficient 0.4

Note: Default for Friction Coefficient is zero.

Note:

1. As many as , six Single Loaded Areas can be specified
2. A Single Tire can be represented by using S1 = L1 = L2 = 0
3. A Single Axle Dual Tire can be represented by L1 = L2 = 0 and S1 ≠ 0
4. A Tandem Axle Dual Tire can be represented by L2 = 0 and S1 ≠ 0, L1 ≠ 0
5. L1 > Xc+Xe, L2 > Xc+Xe, and S1 > Yc+Ye.

Cancel Previous Next OK

Figura 4.32. Finestra Opzione B – User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure) – Geometrica circolare dell’area di carico

Option B : User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)

Reference Title for Axle

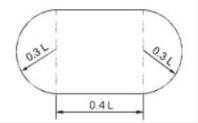
Tire Pressure 800 kPa Tire Load 30 kN

Geometry of Loaded Area

Circle

Ellipse

Rectangle



Note:

$$L = \sqrt{\frac{\text{Tire load}}{0.5227 * \text{Tire Pressure}}}$$

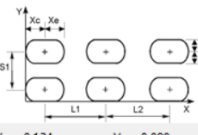
Calculated L 0.268 m

Axle Spacing

L1 m

L2 m

S1 m



Xc = 0.134 m Yc = 0.080 m

Xe = 0.134 m Ye = 0.080 m

Friction Coefficient

Rolling Friction Coefficient

Bracking Friction Coefficient

Note: Default for Friction Coefficient is zero.

Note:

1. As many as , six Single Loaded Areas can be specified
2. A Single Tire can be represented by using S1 = L1 = L2 = 0
3. A Single Axle Dual Tire can be represented by L1 = L2 = 0 and S1 ≠ 0
4. A Tandem Axle Dual Tire can be represented by L2 = 0 and S1 ≠ 0, L1 ≠ 0
5. L1 > Xc+Xe, L2 > Xc+Xe, and S1 > Yc+Ye.

Cancel Previous Next OK

Figura 4.33. Finestra Opzione B – User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)
– Geometrica ellittica dell'area di carico

Figura 4.34. Finestra Opzione B – User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)
– Geometrica rettangolare dell'area di carico

Option C – User-Selected Tire Configuration and Contact Pressure Distribution from Database

Questa opzione consente di specificare distribuzioni non uniformi delle pressioni di contatto. Il primo passo è quello di inserire il tipo di pneumatico e il dispositivo di misurazione che è in grado di misurare sollecitazioni di taglio verticale, longitudinale e trasversale a una determinata velocità di scorrimento. Successivamente si deve inserire la pressione degli pneumatici, la velocità del veicolo e il carico dello pneumatico. Si può anche considerare un carico intermedio dello pneumatico per il quale viene utilizzata un'interpolazione lineare e l'interpolazione è consentita solo all'interno dell'intervallo per il quale sono disponibili i dati. Andando avanti va specificata la configurazione dell'asse, che varia da un singolo pneumatico a una configurazione a doppio pneumatico ad asse tridem. Il tipo di configurazione è specificato utilizzando i parametri di spaziatura dell'asse (S1, L1 e L2) mostrati in Figura 4.35.

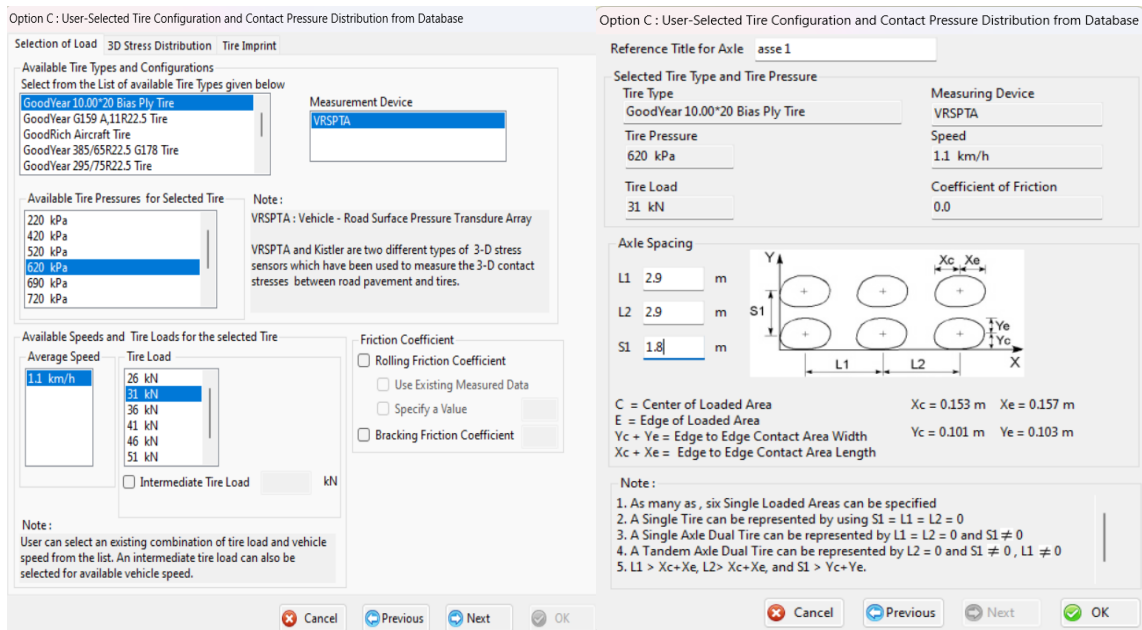


Figura 4.35. Finestra Opzione C – User-Selected Tire Configuration and Contact Pressure Distribution from Database

Selezionando sul menu *3D Stress Distribution* si aprirà la finestra in Figura 4.36 la quale mostrerà graficamente l'andamento delle sollecitazioni non uniformi sulla pavimentazione e i dati di riepilogo sullo pneumatico selezionato in precedenza.

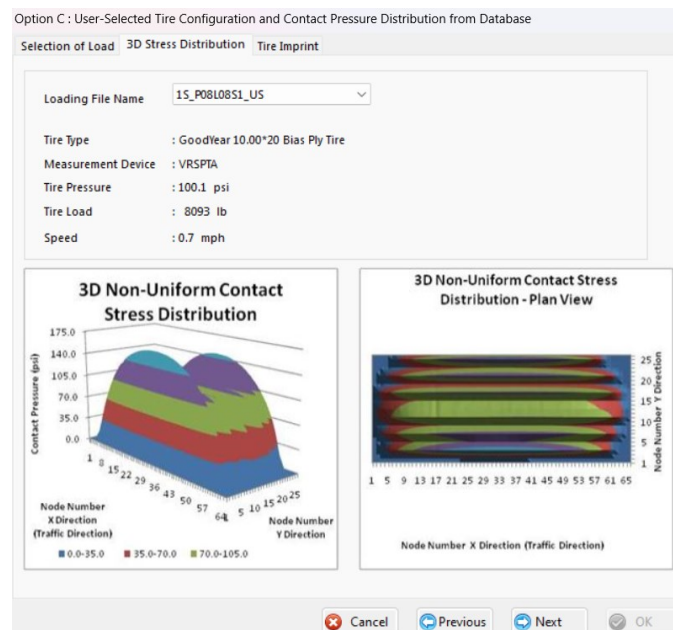


Figura 4.36. Finestra Opzione C

Option D – Semi-Trailer Truck Including Vehicle Dynamics

Questa opzione calcola la distribuzione del carico sugli pneumatici, durante la marcia e durante la frenata, dell'autoarticolato a quattro assi:

- l'asse sterzante della motrice, con ruote singole;

- l'asse della motrice, asse singolo con ruote gemellate;
- l'asse tandem del rimorchio.

La frenata provoca la decelerazione del veicolo e il trasferimento dei carichi sulla parte anteriore del veicolo. Rispetto a un veicolo a due assi, le caratteristiche di frenata di un autoarticolato sono significativamente più complesse. Per un determinato veicolo a due assi, il trasferimento del carico è solo una funzione della velocità di decelerazione, mentre per un autoarticolato, il trasferimento del carico durante la frenata dipende non solo dalla velocità di decelerazione, ma anche dalla forza frenante del semirimorchio. Poiché il carico viene trasferito dall'asse posteriore all'asse anteriore durante la frenata, il carico risultante sull'asse può essere superiore o inferiore al carico statico iniziale, a seconda della posizione dell'asse. Per calcolare il carico verticale su ciascun asse, la motrice e l'unità semirimorchio sono considerati come corpi liberi separatamente e combinati.

La Figura 4.37 mostra la finestra di input per le dimensioni geometriche dell'autoarticolato le proprietà del sistema frenante e la distanza tra gli assi, con il valore predefinito, per calcolare i carichi degli pneumatici.

Una volta inseriti tutti gli input richiesti, si passa alla finestra successiva. Si seleziona l'asse da analizzare e si specifica la distribuzione delle pressioni di contatto dello pneumatico (Figura 4.38). Il carico corrispondente all'asse e il coefficiente di attrito durante la frenata verranno visualizzati sotto la selezione. L' *analisi 3D-Move* consente all'utente di selezionare la distribuzione della pressione di contatto tra due diverse opzioni, quali:

1. Distribuzione uniforme della pressione di contatto;
2. Distribuzione della pressione di contatto da database.

Nel primo caso, si presume che la distribuzione della pressione di contatto sia uniforme. L'utente deve selezionare la geometria dell'area caricata e inserire la pressione degli pneumatici.

Nel secondo caso, distribuzione della pressione di contatto da database, si seleziona il tipo di pneumatico come nell'opzione C, con la differenza che il carico dello pneumatico è già stato calcolato.

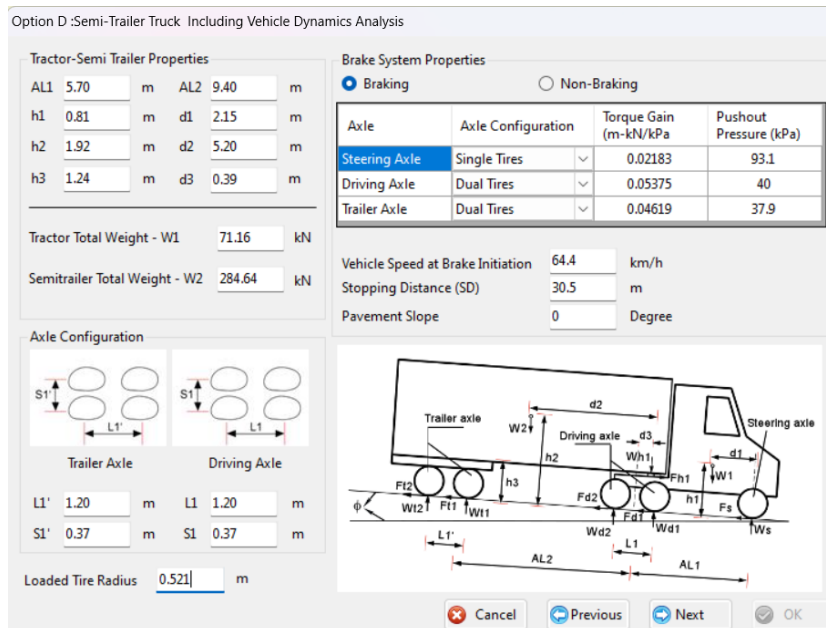


Figura 4.37 Finestra Opzione D-Semi-Trailer truck including Vehicle Dynamics Analysis per la condizione di frenata

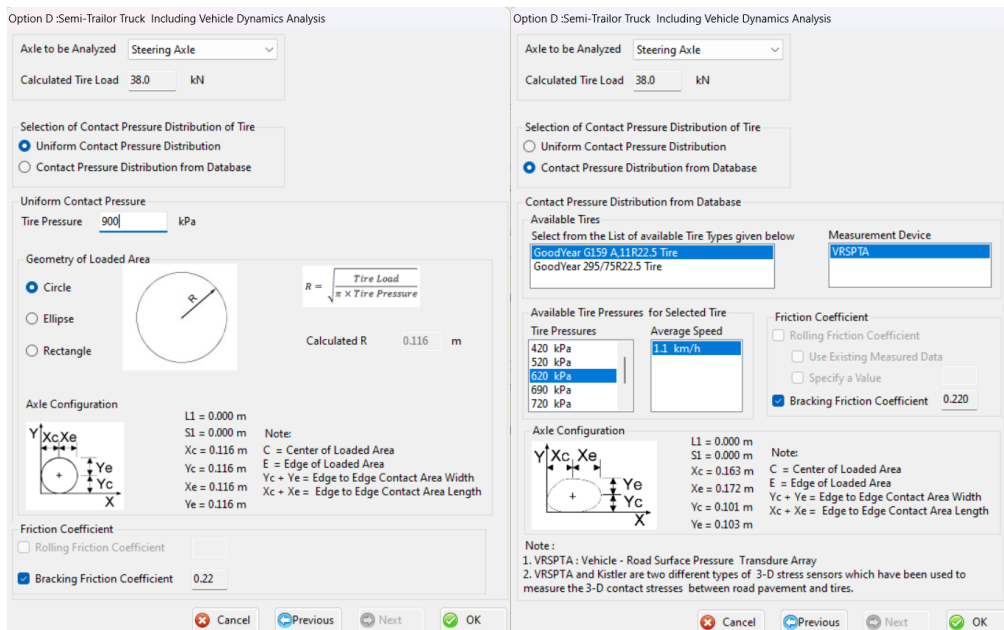


Figura 4.38 Finestra di input per la distribuzione della pressione di contatto

Option E – Special Non-Highway Vehicles

Questa opzione permetta di creare la distribuzione uniforme delle sollecitazioni di contatto per i veicoli "non stradali". Questi veicoli hanno dimensioni insolite, diversi tipi di pneumatici con tacchettature importanti e non standard. Inoltre, hanno carichi elevati e basse pressioni di gonfiaggio rispetto agli pneumatici convenzionali utilizzati dai mezzi pesanti circolanti in autostrada. Pertanto, le aree di carico compressive sotto di essi sono molto più ampie di quelle

sotto gli pneumatici convenzionali per autocarri. Per gli pneumatici off-road, la presenza dei tasselli rende più complessa la distribuzione delle sollecitazioni di contatto. Per questo nell'analisi 3D-Move, la distribuzione delle sollecitazioni di contatto è considerata uniforme. I tipi di veicoli che sono stati inclusi sono:

- autocarro con cassone ribaltabile;
- carrello elevatore.

I dati richiesti per ogni tipo di veicolo sono estratti dalle specifiche del produttore e sono forniti internamente al programma.

Per ognuno di questi tipi di veicoli, ci sono molte opzioni (o ID prodotto) e questi veicoli sono commercializzati da molti produttori diversi. L'utente deve selezionare il tipo di veicolo e inserire il carico utile e la percentuale di distribuzione del carico quando caricato. Una volta che l'utente ha inserito le variabili sopra menzionate, il programma calcolerà il carico sull'asse. Quindi l'utente deve specificare l'asse che deve essere analizzato e la forma dell'area caricata per creare la distribuzione uniforme della sollecitazione di contatto appropriata per l'asse selezionato. La Figura 3.38 mostra la finestra di input per l'autocarro con cassone ribaltabile. Ogni volta che l'utente seleziona questo veicolo, il programma visualizzerà le variabili richieste con il valore predefinito per calcolare il carico dello pneumatico associato alla selezione. I parametri principali per l'autocarro con cassone ribaltabile sono il tipo di pneumatico, l'area caricata, il carico vuoto, il carico utile e la distribuzione del carico in percentuale. L'utente può modificare questi parametri in base alle esigenze. Il dato di payload va inserito dall'utente in funzione della sua esigenza. Se si inserisce un valore superiore al valore consentito, il programma visualizzerà il payload in rosso per indicare un avviso di errore.

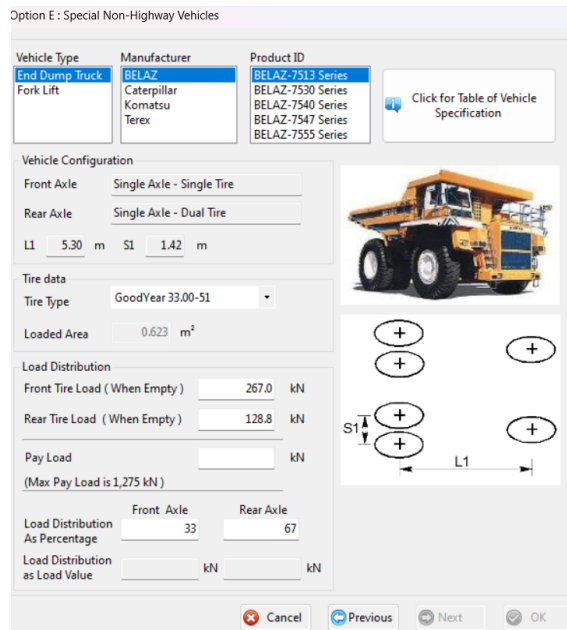


Figura 4.39. Finestra Opzione E- Special Non-Highway Vehicles

Una volta che l'utente ha terminato l'input per la prima finestra (Figura 4.39), il programma consentirà all'utente di passare alla finestra successiva facendo clic sul pulsante "NEXT". Nel caso in cui l'utente non completi la selezione dell'input della prima finestra, il programma non consentirà all'utente di passare alla finestra successiva disabilitando il pulsante "NEXT". Il passo successivo consiste nel selezionare le distribuzioni delle sollecitazioni di contatto sotto gli pneumatici (Figura 4.40). Questa impresa richiede inizialmente l'inserimento di una scelta per l'asse per l'analisi e quindi la fornitura di informazioni per il coefficiente di attrito (necessario per la distribuzione della sollecitazione di taglio da contatto) e la forma dell'area caricata. Dal carico dello pneumatico e dall'area di contatto assegnati (Figura 4.40), la pressione di contatto viene determinata internamente e viene visualizzata vicino al centro della finestra. Il dimensionamento dell'area di contatto, a seconda della forma selezionata nella parte inferiore della finestra, viene calcolato internamente insieme all'intera distribuzione della sollecitazione di contatto per l'asse (un lato dell'asse).

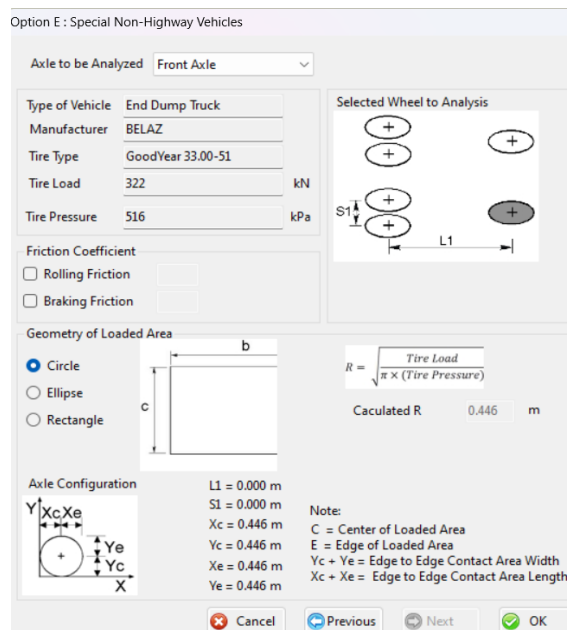


Figura 4.40. Finestra di input per la distribuzione della pressione di contatto per autocarro con cassone ribaltabile

La stessa procedura vale nel caso l'utente seleziona il carrello elevatore come tipologia di veicolo.

Option F – User-Input Tire Configuration and Contact Pressure Distribution

Questa opzione consente all'utente di definire qualsiasi distribuzione della pressione di contatto. L'area caricata si trova sul piano X-Y (globale, vedi Figura 4.41) sulla superficie superiore. Il programma utilizza la tecnica della trasformata di Fourier per scomporre l'area caricata in componenti armonici. Pertanto, il programma è in grado di gestire qualsiasi area di carico irregolare con distribuzione uniforme/non uniforme della pressione di contatto. In generale, l'area caricata deve essere vista come una mesh rettangolare nel piano X-Y e i valori di sollecitazione di contatto possono variare da punto a punto all'interno della mesh che copre l'area caricata. Ci sono tre componenti per le tensioni di contatto:

- la tensione verticale;
- la tensione di taglio longitudinale;
- la tensione di taglio trasversale.

La Figura 4.41 mostra un diagramma schematico per la regione caricata rappresentata da quattro aree di contatto dello pneumatico, mostrate come forme ombreggiate. Il resto dell'area caricata è "quite zone". La regione caricata deve essere divisa in piccole unità secondo una maglia rettangolare. Gli incrementi di lunghezza della mesh sono DX e DY

rispettivamente nelle direzioni X e Y. La regione caricata si trova sempre nel lato positivo degli assi X e Y. La rete non deve essere né troppo fine né troppo grossa. Valori bassi per DX e DY porteranno a un tempo di elaborazione da parte del computer sostanzialmente maggiore. Pertanto, la selezione dei valori DX e DY deve essere effettuata tenendo conto del tempo di elaborazione e della capacità del computer.

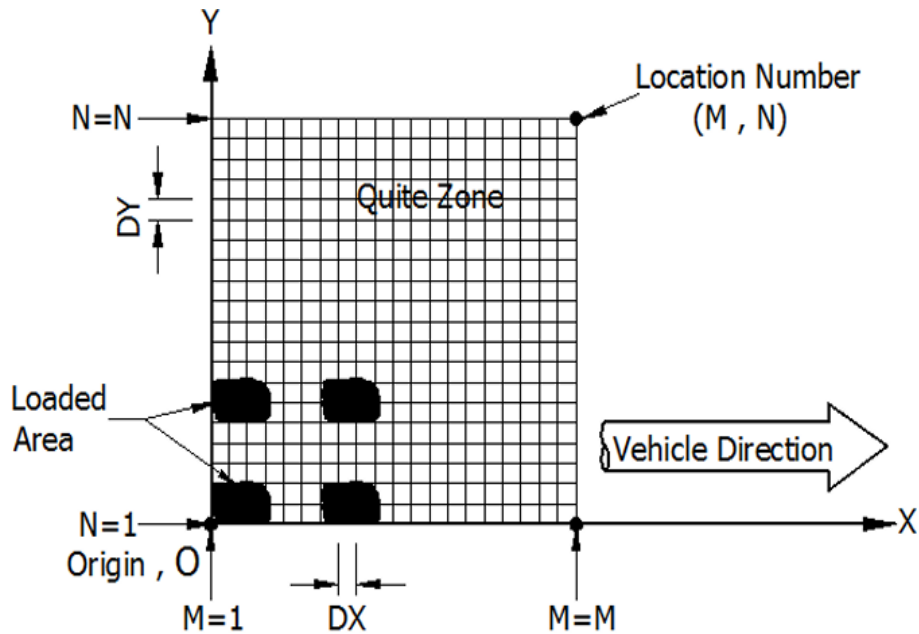


Figura 4.41. Diagramma schematico della regione caricata

La Figura 4.42 mostra la finestra di input per questa opzione. Per primo l'utente deve definire la dimensione della rete. Il valore predefinito per DX e DY è 5 mm (o 0,1 pollici). Il passo successivo consiste nell'inserire la sollecitazione verticale e la sollecitazione di taglio in ciascun nodo. Nel programma 3D-Move, l'utente può inserire la distribuzione delle sollecitazioni di contatto tramite due opzioni:

1. Caricamento – Importazione da file di testo;
2. Caricamento – Input diretto (specificandone i valori che devono essere diversi da zero).

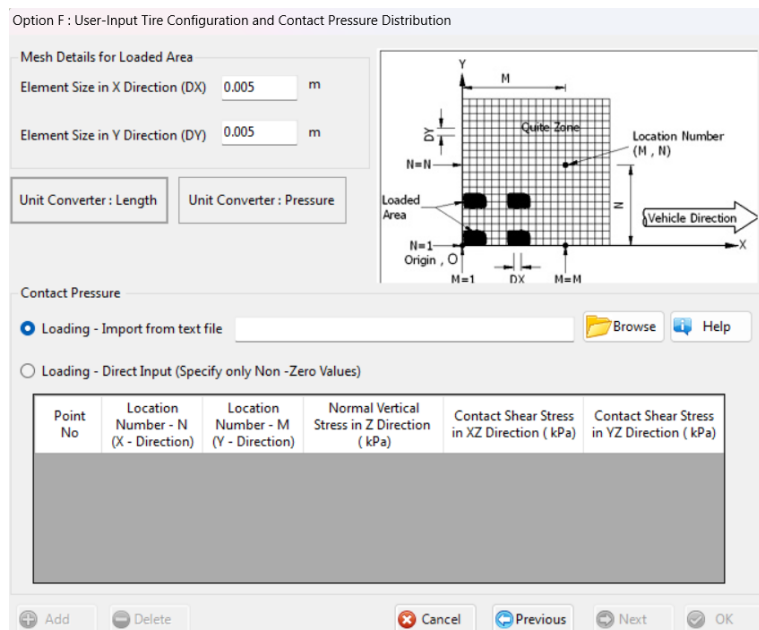


Figura 4.42. Finestra Opzione F- User-Input Tire Configuration and Contact Pressure Distribution

Vehicle Suspension and Road Roughness

Questo modulo è opzionale nel momento in cui si sceglie un'analisi di tipo dinamica. Il carico dello pneumatico che dà origine alla distribuzione delle sollecitazioni di contatto della pavimentazione è un carico in movimento che varia nel tempo intorno al suo valore medio mentre lo pneumatico attraversa la pavimentazione. Pertanto, il carico dello pneumatico $P(x)$ può essere caratterizzato da un valore medio $\bar{P}(x)$ e una componente variabile aggiuntiva $\tilde{P}(x)$, che rappresenta perturbazione del carico intorno alla media (Figura 4.43). Numerosi studi precedenti si sono concentrati sulla quantificazione della variazione di carico (o perturbazione) misurata nei test sul campo e calcolata analiticamente a partire da modelli di interazione veicolo-strada. Molti di questi modelli hanno utilizzato il coefficiente di carico dinamico (DLC), che è stato definito come:

$$DLC = \frac{\tilde{P}(x)}{\bar{P}(x)}$$

La variazione del carico dello pneumatico dipende fortemente dalla rugosità della strada, dalla velocità del veicolo e dal sistema di sospensione del veicolo. Maggiore è il valore di DLC più risulta accentuata la rugosità della pavimentazione.

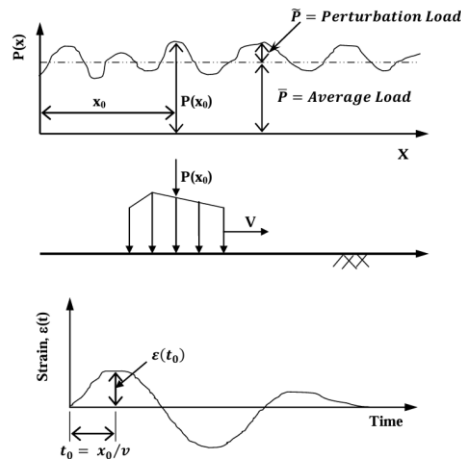


Figura 4.43. Variazione Dinamica del carico

Selezionando questa voce si aprirà la finestra in Figura 4.44 dove il 3D-Move ci chiederà di definire la variabilità della risposta della pavimentazione attraverso il coefficiente di carico dinamico (DLC). Il software permette di procedere in diversi modi:

- Opzione 1, proseguire senza DLC;
- Opzione 2, proseguire con DLC fornito dal database del programma;
- Opzione 3, proseguire con DLC dato dall'equazione di regressione di Sweatman

Procedere senza DLC significa semplicemente fornire un input al programma per passare al modulo successivo. Con l'opzione 2, come illustrato nella Figura 4.45, una volta che l'utente seleziona il tipo di sospensione, la fonte dei dati e la rugosità della strada (che può essere liscia, media o sconnessa), il valore DLC verrà visualizzato nella casella di testo della finestra.

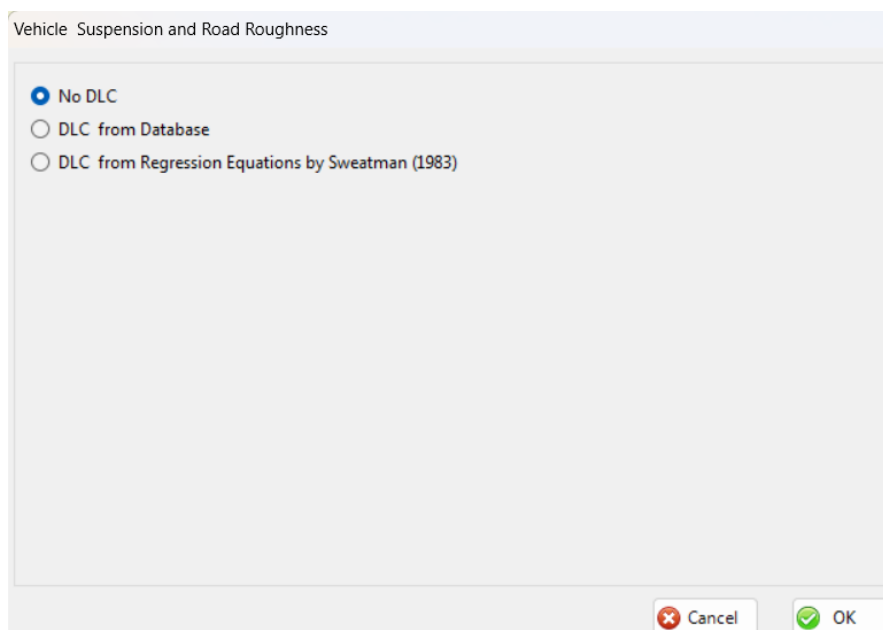


Figura 4.44. Finestra di input Vehicle Suspension and Road Roughness con opzione no DLC

The dialog box is titled "Vehicle Suspension and Road Roughness". It contains three radio button options: "No DLC" (selected), "DLC from Database", and "DLC from Regression Equations by Sweatman (1983)". Below the options are four dropdown menus: "Vehicle Suspension Type" set to "Air Bag", "Source of Data" set to "Sweatman (1983)", "Road Roughness" set to "Smooth", and "DLC" set to "0.055". A "Note" section explains that DLC stands for Dynamic Load Coefficient and that vehicle suspension and road roughness are required only if statistical variation of pavement responses are needed. At the bottom right are "Cancel" and "OK" buttons.

Figura 4.45. Finestra di input Vehicle Suspension and Road Roughness per DLC da database

Selezionando l'opzione 3 si aprirà la finestra in Figura 4.46. Il DLC viene ricavato da equazioni di regressioni sviluppate da Sweatman (1983) per ogni tipo di sistema di sospensione presente nel database del programma. Per utilizzare questa opzione e calcolare il corrispondente DLC, l'utente deve inserire la tipologia di asse (se asse motore o asse del rimorchio), il sistema di sospensione tra quelli proposti e il valore della rugosità, misurata in conteggi per chilometro (counts/km).

The dialog box is titled "Vehicle Suspension and Road Roughness". It contains three radio button options: "No DLC", "DLC from Database", and "DLC from Regression Equations by Sweatman (1983)" (selected). Below the options are four dropdown menus: "Axle Type" set to "Tandem Drive Axle", "Vehicle Suspension Type" set to "Hendrickson RT 340 Walking beam", "Road Roughness" set to "5 counts/km", and "DLC" set to "0.110". A "Note" section explains that DLC stands for Dynamic Load Coefficient and that vehicle suspension and road roughness are required only if statistical variation of pavement responses are needed. At the bottom right are "Cancel" and "OK" buttons.

Figura 4.46. Finestra di input Vehicle Suspension and Road Roughness per DLC ottenuta da equazioni di regressione di Sweatman

Traffic Information

Questa voce è selezionabile se in precedenza abbiamo scelto di effettuare un'analisi estesa della pavimentazione. La finestra delle informazioni sul traffico consente di stimare il traffico in termini di ripetizioni del carico per asse di progetto, che è uno dei parametri necessari per l'analisi delle prestazioni della pavimentazione. La finestra di input "traffic information" è mostrata in Figura 4.47, permette di inserire il numero di stagioni o periodi durante l'anno e consente all'utente di specificare la variazione di ciascun parametro per ciascuna stagione. 3D-MOVE calcolerà le ripetizioni di carico per ogni stagione; quindi, calcolerà e visualizzerà le ripetizioni di carico totali.

Parameter	Value	Season 1	Season 2	Season 3
Number of Seasons/Periods	1			
Name of the Seasons/Periods	Spring			
Duration of the Seasons/Periods (Months) (computed in twelve month increments)	12			
One-way average daily repetitions of design axle	200			
Percentage of design axles in design lane (%)	90			
Design axle growth rate (%)	0			
Design Life (Years)	15			
Design axle repetitions per Season/Period	972,000			
Total design axle repetitions	972,000			

Figura 4.47. Finestra di input Traffic Information

Pavement Structure

In questo modulo, il 3D-MOVE consente di inserire un input importante: la stratigrafia della pavimentazione. Selezionando questo menu, si apre la finestra mostrata in Figura 4.48. Cliccando su "ADD" in basso a sinistra, l'utente può aggiungere il numero degli strati. Successivamente è necessario definire per ogni strato la tipologia e lo spessore. Gli strati disponibili sono:

- Asphalt
- Base

- Subbase
- Subgrade

Non ci sono restrizioni sul numero di strati che si possono inserire in questa opzione. Per rimuovere uno strato basta cliccare il tasto “DELETE”. Il 3D-MOVE, considera i materiali degli strati di asfalto come elastici lineari o viscoelastici, mentre gli altri materiali sono considerati elastici lineari. Lo strato di sottofondo è considerato come strato semi-infinito e, di default, il programma lo considera con spessore pari a 0.

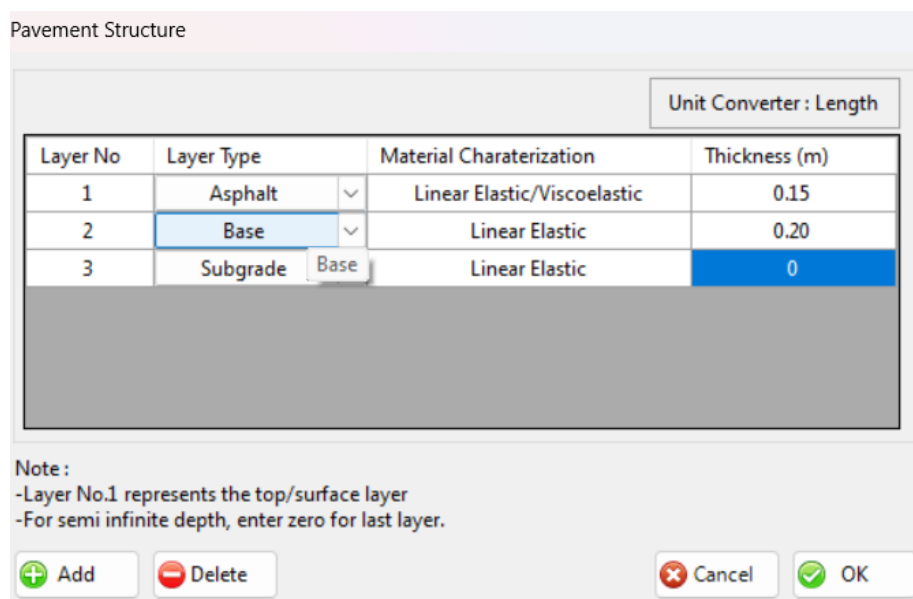


Figura 4.48. Finestra Pavement Structure

Alcune informazioni finora inserite relative al progetto, compresa la stratigrafia, saranno visualizzate nel pannello "PROJECT INFORMATION" a destra della finestra principale del 3D-Move. Inoltre, come mostrato in Figura 4.49, gli input inseriti verranno evidenziati con un indicatore di colore verde.

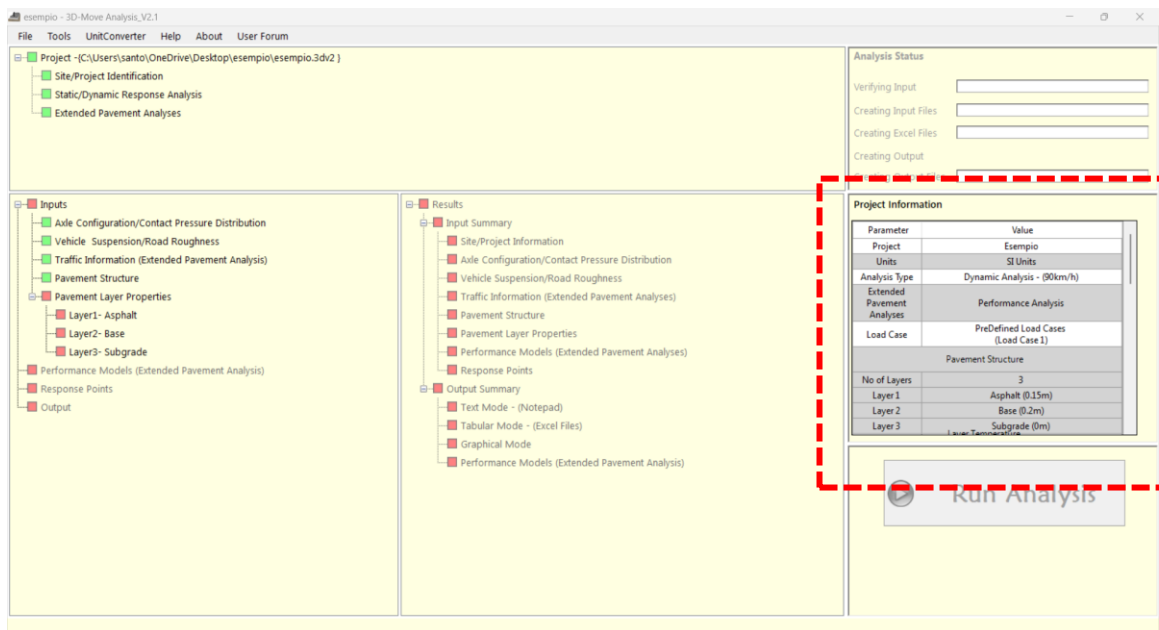


Figura 4.49 Finestra principale di 3D-Move dopo aver definito la voce Pavement Structure

Pavement Layer Properties

Una volta inserita la stratigrafia, tutti gli strati appariranno nel menu "PAVEMENT LAYER PROPERTIES" nella finestra principale del 3D-MOVE ANALYSIS. In questo modulo, l'utente deve specificare le proprietà per ciascun strato precedentemente inserito nel modulo "PAVEMENT STRUCTURE".

▪ Asphalt Layer

Lo strato in conglomerato bituminoso può essere considerato sia un materiale elastico lineare che un materiale viscoelastico lineare.

MATERIALE ELASTICO LINEARE

La Figura 4.50 mostra la finestra di input per i materiali elastici lineari per il caso statico.

L'utente deve inserire:

- Modulo di elasticità (E);
- Rapporto di Poisson, che può essere fornito in due modalità:
 - Rapporto di Poisson costante: l'utente deve fornire un valore specifico per il rapporto di Poisson;
 - Rapporto di Poisson dal modello: in questo caso, il rapporto di Poisson è stimato da un modello mostrato in Figura 4.51, e l'utente deve fornire i

valori di a e b. I valori tipici per a e b sono rispettivamente -1,63 e 0,00000384.

È importante notare che la temperatura dello strato è obbligatoria solo se è selezionata l'opzione *Pavement Performance Analysis* mentre il damping ratio è richiesto solo per analisi di tipo dinamica. Per quest'ultima è necessario l'inserimento del peso unitario. Inoltre, la finestra di input è diversa dal caso statico come mostrato in Figura 4.52.

Figura 4.50. Finestra di input per materiali elastici lineari per strato di asfalto (caso statico)

Figura 4.51. Modello del coefficiente di Poisson utilizzato dal programma

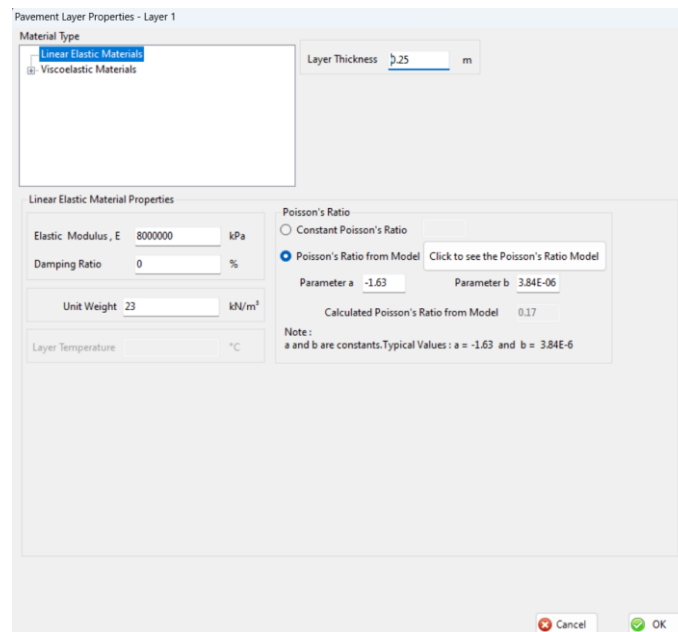


Figura 4.52. Finestra di input per materiali elastici lineari per strato di asfalto (caso dinamico)

MATERIALE VISCO-ELASTICO LINEARE

Il modulo del conglomerato bituminoso dipende da diversi fattori, tra cui temperatura, frequenza di carico, invecchiamento e caratteristiche della miscela. Per tenere conto di questi aspetti, il modulo elastico di un materiale viscoelastico viene calcolato attraverso le curve maestre. In 3D-MOVE ANALYSIS, sono disponibili varie opzioni per fornire input sui materiali viscoelastici e generare la curva maestra. In particolare, è possibile inserire dati ottenuti da prove di laboratorio o utilizzare un modello matematico. Le opzioni per l'inserimento basato su dati di laboratorio includono:

- Symmetric Sigmoidal Function (MEPDG);
- Non-Symmetric Sigmoidal Function;
- Symmetric Sigmoidal Function (AMPT);
- Dati inseriti dall'utente

Per quanto riguarda l'impiego del modello matematico, il software utilizza il:

- Modello Witczak.

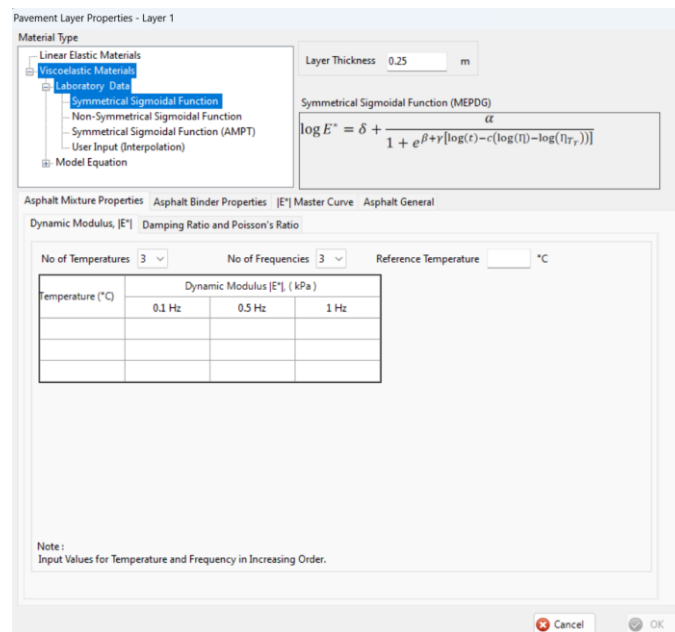


Figura 4.53 Finestra di input per i materiali viscoelastici lineari

SYMMETRICAL SIGMOIDAL FUNCTION (AMPT)

Questo metodo utilizza i dati ottenuti dalla prova di laboratorio Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) per costruire la curva maestra. In Figura 4.54 è mostrata la finestra di input per questo metodo. Per prima cosa l'utente deve definire le proprietà della materiale selezionando "ASPHALT MIXTURE PROPERTIES". In questa opzione viene costruita la curva maestra alla temperatura di riferimento, inserendo i valori di modulo dinamico (E^*) desunti dalla prova, prima però deve inserire i dati di temperatura e frequenza utilizzati. Il programma consente di inserire un massimo di sei valori di temperatura e frequenza. Un' altro input è la temperatura di riferimento, il valore percentuale di VMA E VFA.

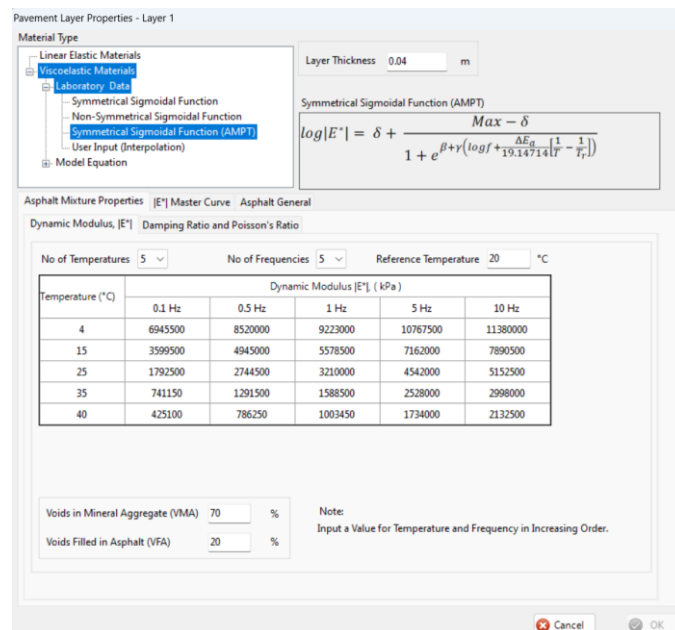


Figura 4.54. Finestra di input per i dati del modulo dinamico per Symmetrical Sigmoidal Function (AMPT)

Il passo successivo consiste nel fornire i valori di Damping Ratio e rapporto di Poisson (Figura 4.55). Ci sono due opzioni per inserire il Damping Ratio:

- inserendo un valore costante;
- derivandolo dai dati dinamici e quindi l'utente deve fornire i dati dell'angolo di fase.

Il rapporto di Poisson può essere fornito da una delle tre diverse opzioni:

1. Rapporto di Poisson costante: questo caso, l'utente deve fornire il valore dell'indice di Poisson;
2. Rapporto di Poisson dal modello: l'indice di Poisson è stimato dal modello mostrato in Figura 4.51. L'utente deve fornire il valore di a e b per stimare il rapporto di Poisson per un dato modulo dinamico;
3. Rapporto di Poisson Vs frequenza: l'utente deve inserire il rapporto di Poisson in funzione della frequenza sotto forma di valori di dati discreti.

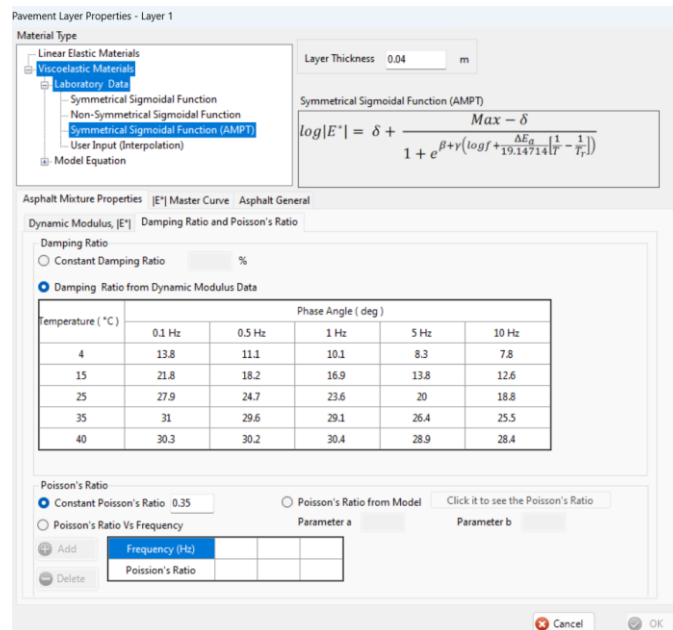


Figura 4.55. Finestra di input per i dati di Damping Ratio e Poisson's Ratio

Una volta inseriti gli input richiesti, si passa al modulo successivo, dove il programma abiliterà il tasto "UPDATE GRAPH" (Figura 4.56). Facendo clic su di esso, l'utente può sviluppare la curva maestra alla temperatura di riferimento.

Dopo che il programma ha completato questa operazione, il passo successivo consiste nello sviluppo della curva di E* alla temperatura di analisi. Nel menu "ASPHALT GENERAL", l'utente deve inserire la temperatura di analisi e il peso unitario. Il programma restituirà il grafico della curva del modulo dinamico alla temperatura di analisi, insieme a quello della curva maestra, come mostrato in Figura 4.57.

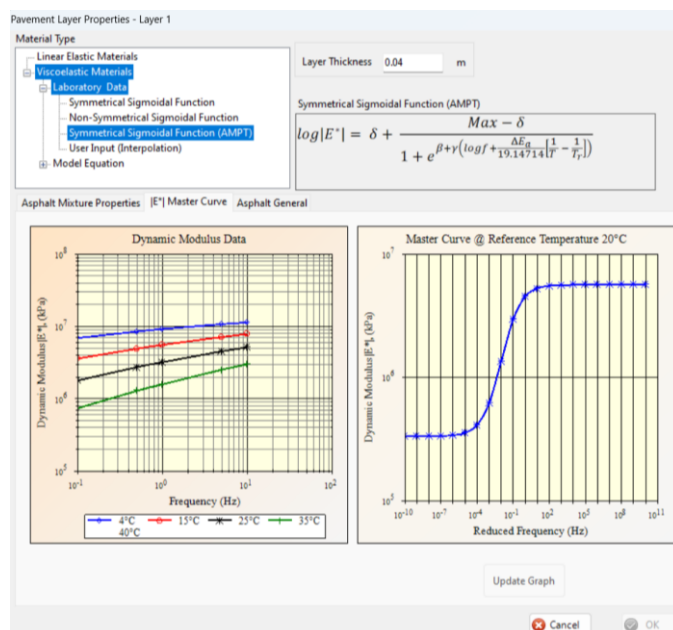


Figura 4.56. Finestra per la curva maestra calcolata alla temperatura di riferimento

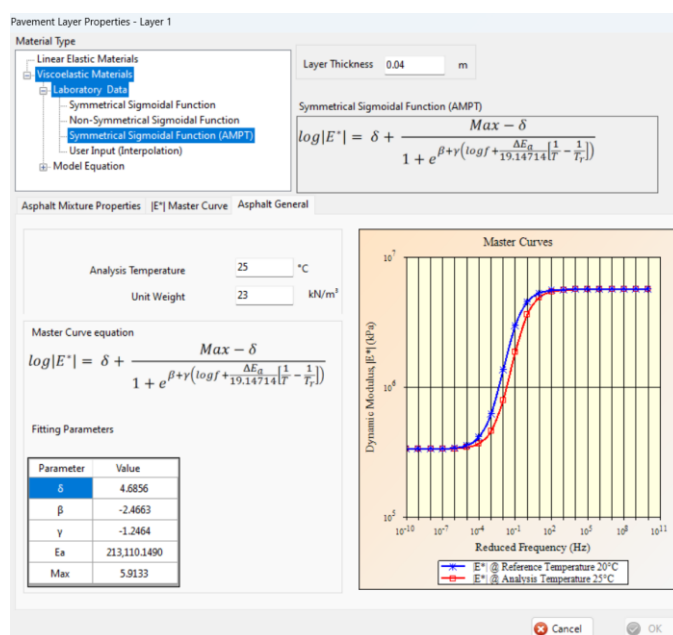


Figura 4.57. Finestra per la curva di E^* alla temperatura di analisi e di riferimento

▪ **Unbond material**

Il programma considera gli strati di materiale non legato come elastici lineari. In Figura 4.58 è mostrata la finestra di input per questi materiali. Le proprietà richieste sono:

- Il modulo elastico;
- Il coefficiente di Poisson;
- Il Damping ratio;
- Il peso unitario.

Sono disponibili diversi tipi di materiali standard per materiali non legati, che l'utente può selezionare tramite il menu a tendina. Per ciascun tipo di materiale, il programma fornisce un intervallo di valori di modulo elastico e il valore raccomandato. Tuttavia, l'utente può inserire un valore di E anche al di fuori di questo intervallo. È possibile stimare il modulo elastico anche inserendo il valore di CBR o di R (Figura 4.58). Inoltre, il peso unitario e il damping ratio, sono necessari solo se si esegue un'analisi dinamica, mentre i valori relativi alla profondità della falda freatica e la profondità del letto roccioso sono obbligatori solo per l'analisi delle prestazioni (Figura 4.59).

The image displays two instances of the 'Pavement Layer Properties - Layer 2' dialog box. Both instances show a 'Layer 2' with a 'Thickness' of 0.25 m and a 'Standard Material Type' of 'GW'. The 'Range of E value' is specified as 272342 - 289580, with a 'Typical Value of E' of 282685.

In the left instance, the 'Elastic Modulus, E' is selected (radio button checked) with a value of 500000 kPa. Below it, 'CBR' and 'R Value' are unselected. The 'E vs CBR Relationship' section is not visible.

In the right instance, 'CBR' is selected (radio button checked) with a value of 200. The 'Elastic Modulus, E' is unselected. The 'E vs CBR Relationship' section is visible below the CBR input. Both instances show 'Poisson's Ratio' as 0.35, 'Damping Ratio' as an empty field, and 'Unit Weight' as an empty field. At the bottom, there are 'Cancel' and 'OK' buttons.

Figura 4.58 Finestra di input per i materiali viscoelastici lineari, analisi statica

Pavement Layer Properties - Layer 3

Layer 3 Thickness m

Material

Standard Material Type ▾

Range of E value is between 193053 - 258553.
Typical Value of E is 220632

Elastic Modulus, E kPa

CBR

R Value

Poisson's Ratio

Damping Ratio %

Unit Weight kN/m³

Depth to Ground Water Table m
(Measured from the pavement surface)

Depth to Bed Rock m
(Measured from the last layer surface)

Figura 4.59. Finestra di input per i materiali viscoelastici lineari, analisi dinamica e analisi delle prestazioni

Performance models (Extended Pavement Analysis)

Se si vogliono valutare le prestazioni della pavimentazione, è necessario selezionare "Extended Pavement Analysis" nel pannello PROJECT della finestra principale di 3D-MOVE ANALYSIS (Figura 4.27). Come richiamato al paragrafo 4.2.4.1, 3D-Move Analysis è dotato di due modelli di previsione della pavimentazione:

- NCHRP 1-37A;
- VESYS.

In questi modelli, le principali modalità di rottura della pavimentazione avvengono per fessurazione e ormaiamento. L'affaticamento da fessurazione è previsto in termini di indice di danneggiamento, che è un parametro meccanicistico che rappresenta il danno associato al carico all'interno della struttura della pavimentazione. La Figura 4.60 mostra la finestra di input per i modelli di prestazioni NCHRP (1-37A) e VESYS. Se è selezionata la prestazione NCHRP (1-37A), l'utente deve inserire i valori limite e l'affidabilità.

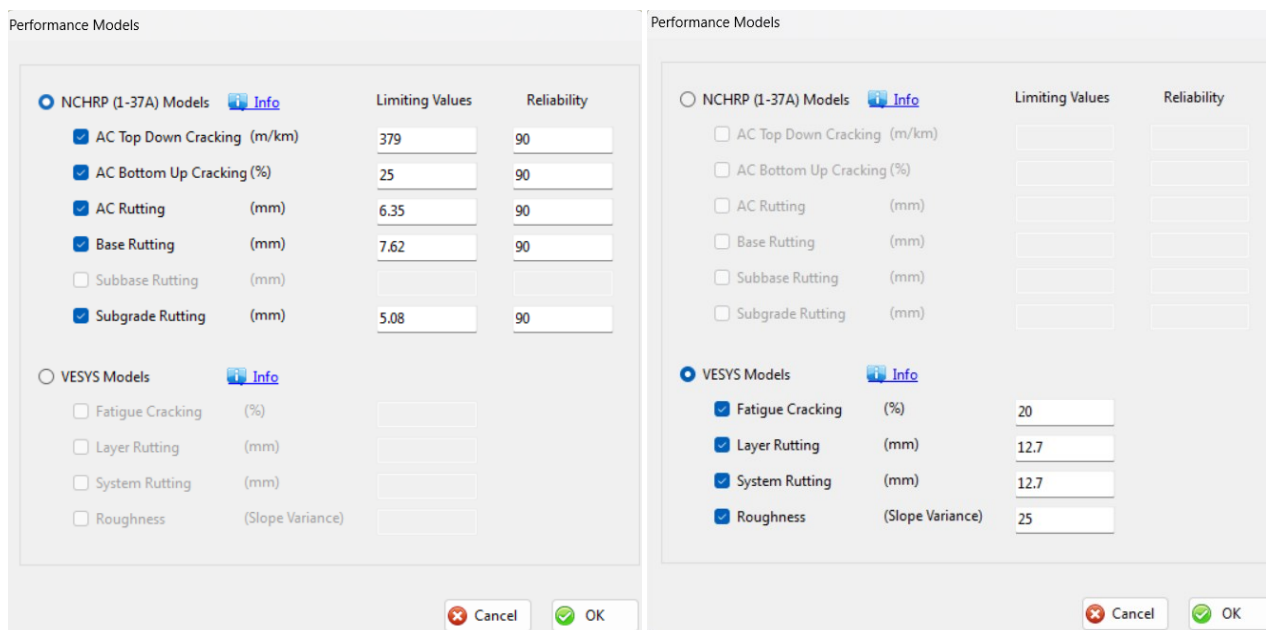


Figura 4.60. Finestra Performance models

Il modello di previsione delle prestazioni NCHRP (1-37A) è suddiviso in sei modalità di danneggiamento della pavimentazione:

1. AC Top Down Cracking;
2. AC Bottom Up Cracking;
3. AC Rutting;
4. Base Rutting;
5. Subbase Rutting;
6. Subgrade Rutting.

La Figura 4.61 mostra la finestra di input per il modello di prestazione NCHRP (1-37A). Come mostrato, gli strati di pavimentazione sono elencati nella parte sinistra della finestra, mentre le modalità di danneggiamento corrispondenti sono visualizzate in alto a destra della finestra. In ogni modalità di danno, nella parte superiore della finestra verranno visualizzate le equazioni empiriche che mettono in relazione la risposta della pavimentazione all'analisi delle prestazioni. Nel programma sono incorporati modelli calibrati a livello nazionale per ciascuna modalità di danno. Tuttavia, l'utente può inserire il proprio valore dei coefficienti di regressione (parametri modal) per ciascun modello selezionando l'opzione "USER DEFINED MODEL".

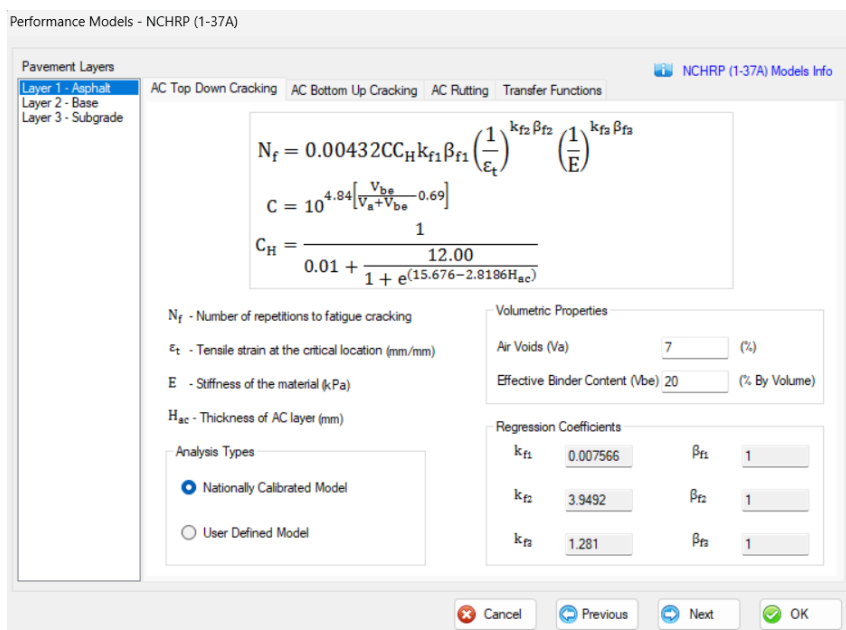


Figura 4.61. Finestra di input per il modello di prestazione NCHRP (1-37A).

Il modello VESYS è in grado di prevedere le risposte strutturali e l'integrità delle pavimentazioni flessibili. Nel 3D-Move, il modello di prestazione VESYS ha quattro modalità di danneggiamento. Sono:

1. Fatigue Cracking;
2. Layer Rutting;
3. System Rutting;
4. Roughness.

La Figura 4.62 mostra la finestra di input per i modelli di prestazione VESYS. Come mostrato, gli strati di pavimentazione sono elencati nella parte sinistra della finestra, mentre le modalità di danneggiamento corrispondenti sono visualizzate in alto a destra della finestra.

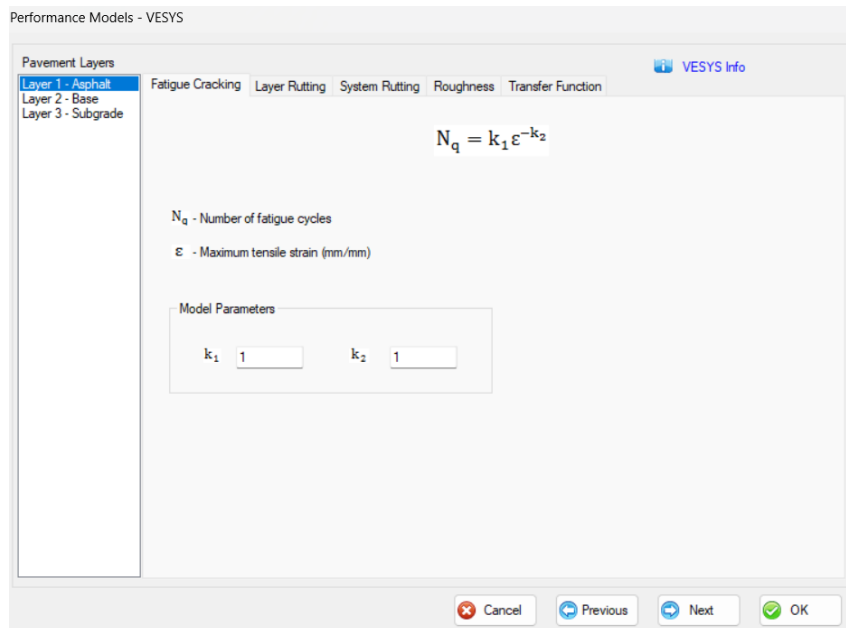


Figura 4.62. Finestra di input per il modello di prestazione VESYS

Response Point

Uno degli input importanti per l'analisi 3D-Move sono le posizioni dei punti in cui devono essere valutate le risposte della pavimentazione. Nel 3D-Move, i punti di risposta possono essere definiti in due modi sia per i casi statici che per quelli dinamici. Essi sono:

- A. Individual Response Point;
- B. Response Data Array (formato griglia).

Nella finestra di input dei punti di risposta è possibile osservare la visualizzazione grafica (GRAPHICAL DISPLAY) la quale mostra la struttura della pavimentazione con tutti i punti di risposta definiti utilizzando i singoli punti di risposta e l'array di dati di risposta.

A. INDIVIDUAL RESPONSE POINT

In questo caso, l'utente deve specificare le coordinate (x, y e z) dei punti di risposta. Una volta che l'utente inserisce un valore di coordinata z per un punto di risposta, il programma in automatico visualizzerà il numero del livello che corrisponde al punto di risposta specificato (Figura 4.63). I punti di risposta possono essere aggiunti facendo clic sul pulsante "ADD" e rimossi facendo clic sul pulsante "DELETE". Nella parte inferiore destra della finestra, viene visualizzata la configurazione dell'asse precedentemente selezionata e l'opzione di distribuzione delle sollecitazioni di contatto. La Figura 4.63 mostra la finestra di input per i singoli punti di risposta e sono codificati a colori (la legenda dei colori è mostrata in basso a sinistra della finestra).

Alcuni punti di risposta vengono generati automaticamente per l'analisi delle prestazioni dal programma e vengono visualizzati in verde e tali punti non possono essere eliminati dall'utente. Se i valori z dei punti di risposta aggiunti dall'utente vengono confrontati con il valore z dei punti di prestazione generati automaticamente dal programma, tali punti di risposta aggiunti verranno considerati per l'analisi delle prestazioni e riempiti con il colore blu scuro. Altri punti riempiti con il colore azzurro non saranno presi in considerazione per l'analisi delle prestazioni. Questo schema di visualizzazione colorato aiuterà l'utente a distinguere tra i punti generati automaticamente e i punti di risposta aggiunti. Anche se alcuni punti non saranno presi in considerazione per l'analisi delle prestazioni, l'output verrà generato per tutti i punti. La Figura 4.64 mostra la finestra di input per i singoli punti di risposta se è selezionato il caso dinamico. Come mostrato in Figura 4.64, nel caso dinamico, il piano di osservazione (piano Y-Z) dovrebbe essere il più lontano possibile dai carichi. Questo piano è selezionato dal programma, cioè l'offset dall'asse Y al piano di osservazione è determinato dal programma. Quindi l'utente deve inserire le coordinate y e z dei punti di risposta solo per il caso dinamico.

Response Points - Static

Individual Response Points | Response Data Array | Graphical Display

Response Points | Unit Converter : Length

No	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Z-Coordinate (m)	Layer No
33	0.0900	0.2750	0.3125	2
34	0.0900	0.0900	0.4375	2
35	0.0900	0.1800	0.4375	2
36	0.0900	0.2750	0.4375	2
37	0.0900	0.0900	0.5000	2
38	0.0900	0.1800	0.5000	2
39	0.0900	0.2750	0.5000	2
40	0.0900	0.0900	0.6524	3
41	0.0900	0.1800	0.6524	3
42	0.0900	0.2750	0.6524	3
43	0.09	0.2750	0.25	1

In case where a response is needed at an interface :
 For the top layer : z = Depth of layer
 For the top of bottom layer : z = Depth of layer + 0.001 in

- Points generated automatically by program for Performance Analysis (Fixed Points)
- Points added by User and considered for Performance Analysis
- Points added by User but not considered for Performance Analysis

Vehicle Speed = 0 km/h (Static)

Layer	Thickness (m)
Layer1 - Asphalt	0.25
Layer2 - Base	0.25
Layer3 - Subgrade	0 (Semi-infinte)

L1 = 0.000 m Xc = 0.090 m Note: C = Center of Loaded Area
 L2 = 0.000 m Yc = 0.090 m E = Edge of Loaded Area
 S1 = 0.370 m Xe = 0.090 m Yc + Ye = Edge to Edge Contact Area Width
 Ye = 0.090 m Xc + Xe = Edge to Edge Contact Area Length

Figura 4.63. Finestra di input per Individual Response Point nel caso statico

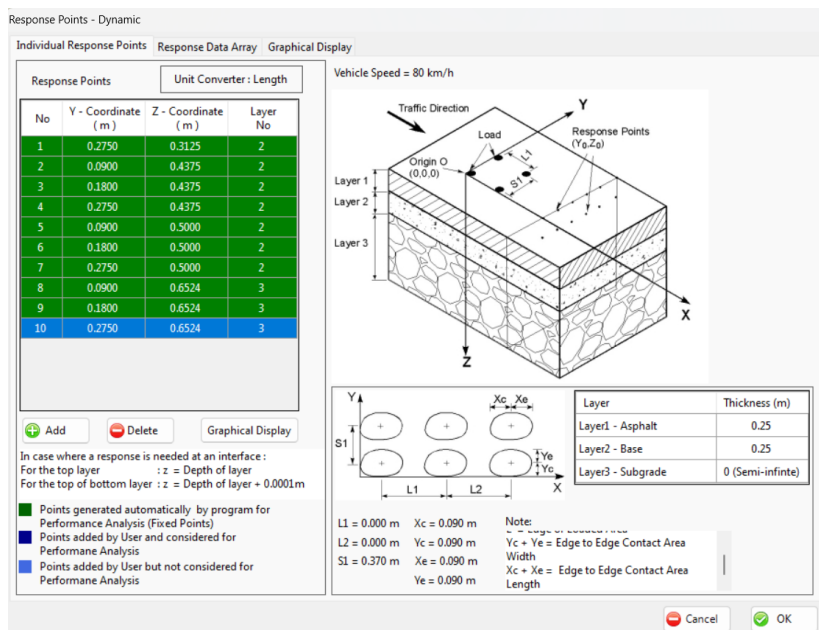


Figura 4.64. Finestra di input per Individual Response Point nel caso dinamico

B. RESPONSE DATA ARRAY (FORMATO GRIGLIA)

In questo caso, invece, i punti di risposta sono definiti all'interno di una griglia rettangolare formata appunto da un insieme di linee orizzontali e verticali. L'utente può definire un numero qualsiasi di maglie della griglia. È possibile aggiungere ulteriori array facendo clic sul pulsante ADD visualizzato sul lato sinistro della finestra e le spaziature corrispondenti per ciascun array devono essere fornite sul lato destro della finestra. Non ci sono limiti al numero di array. Le Figure 4.65 e 4.66 mostrano la finestra di input per l'array di dati di risposta rispettivamente per i casi statici e dinamici.

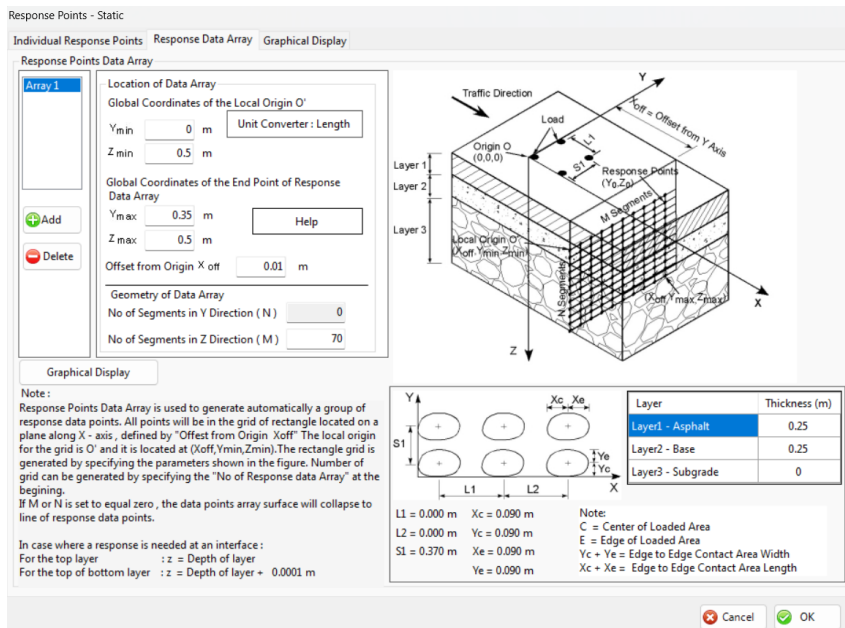


Figura 4.65. Finestra di input per Response Point Array nel caso statico

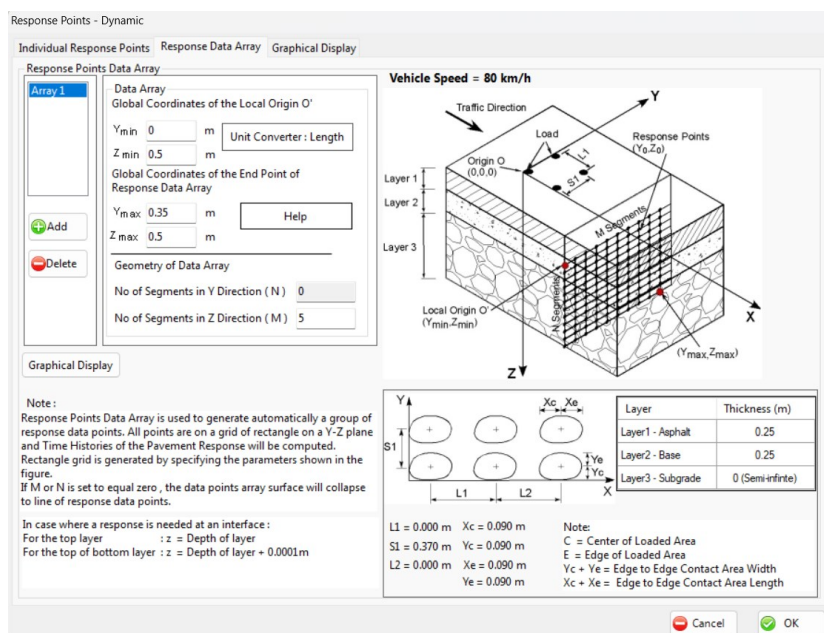


Figura 4.66. Finestra di input per Response Point Array nel caso dinamico

VISUALIZZAZIONE GRAFICA

Selezionando questo menu viene visualizzata la stratigrafia della pavimentazione, il diagramma di carico e tutti i punti di risposta inseriti, come mostrato in Figura 4.67. Il grafico è bidimensionale ed è disegnato in scala. Ogni strato della pavimentazione è rappresentato con colore diverso per essere differenziato. I vari layer sono etichettati sul lato destro del grafico con il numero e il tipo di strato. Inoltre, viene mostrata anche la profondità dello strato per ciascuno strato della pavimentazione. Il 3D-MOVE in questa finestra permette di avere una

migliore e personalizzata visualizzazione grafica in base all'esigenza dell'utente, attraverso tre opzioni di selezione sulla destra della finestra. In particolare, queste sono:

1. Selezione dei punti, permette di visualizzare i punti di risposta inseriti precedentemente sia quelli individuali che quelli inseriti a griglia;
2. Selezione del piano, permette la visualizzazione in due piani distinti (piano X-Z o Y-Z), questo nel caso statico;
3. Selezione della profondità o dei livelli, permette di avere una rappresentazione riferita ad una determinata profondità o nel caso l'utente ha la necessità di visualizzare un singolo strato.

Il diagramma di carico aiuterà l'utente a identificare la posizione dei punti di risposta rispetto all'area caricata. Inoltre, passando con il cursore su un punto qualsiasi è possibile visualizzarne le coordinate.

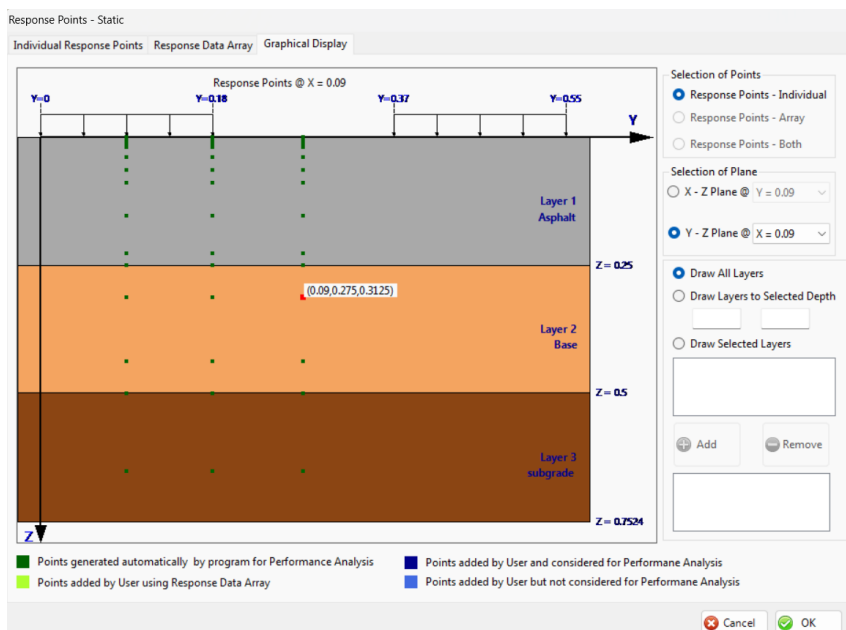


Figura 4.67. Finestra di Graphical Display per Individual Response Point nel piano Y-Z

4.2.5 ELABORAZIONE DEI DATI OUTPUT

Dopo aver inserito e analizzato tutti i dati richiesti e analizzati nei paragrafi precedenti, nel pannello di sinistra rimane da completare l'ultimo modulo prima di avviare l'analisi. Selezionando il menu "OUTPUT", si aprirà la finestra mostrata in Figura 4.68, che informa l'utente sulle risposte che verranno restituiti al termine dell'analisi. L'utente ha la possibilità di

scegliere se includere o meno nel programma l'analisi delle tensioni e delle deformazioni principali. In caso affermativo, è sufficiente selezionare le caselle corrispondenti.

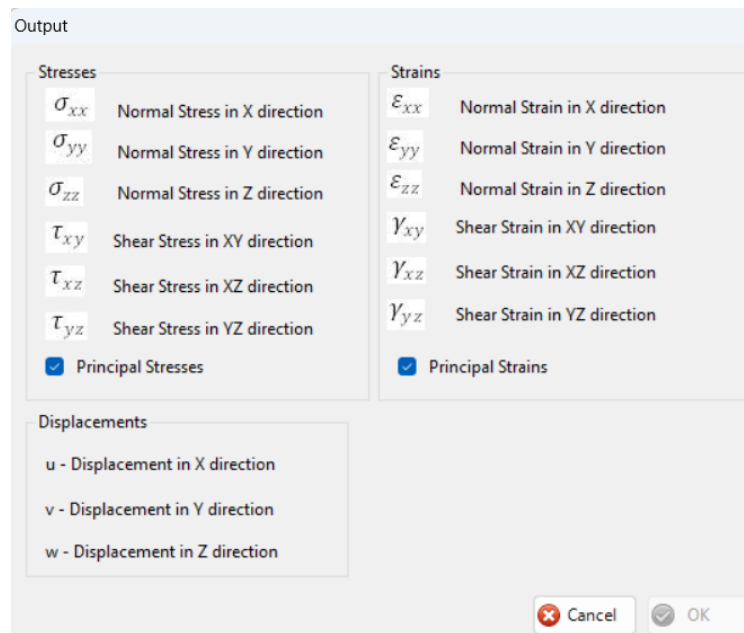


Figura 4.68. Finestra Output

A questo punto, l'utente, dopo essersi assicurato di aver inserito correttamente tutti i dati, verificando anche le informazioni inserite nel pannello "PROJECT INFORMATION" (Figura 4.49), può avviare l'analisi cliccando il tasto "RUN ANALYSIS" in basso a destra della schermata principale di 3D-MOVE come mostrato in Figura 4.69. Il programma richiederà un certo tempo per elaborare le informazioni e restituire i dati output, in funzione di quanti punti di analisi sono stati inseriti per la valutazione della risposta della pavimentazione. L'utente può monitorare lo stato delle analisi nell'apposito pannello disponibile nella finestra principale del 3D-MOVE, sotto "ANALYSIS STATUS" (Figura 4.70).

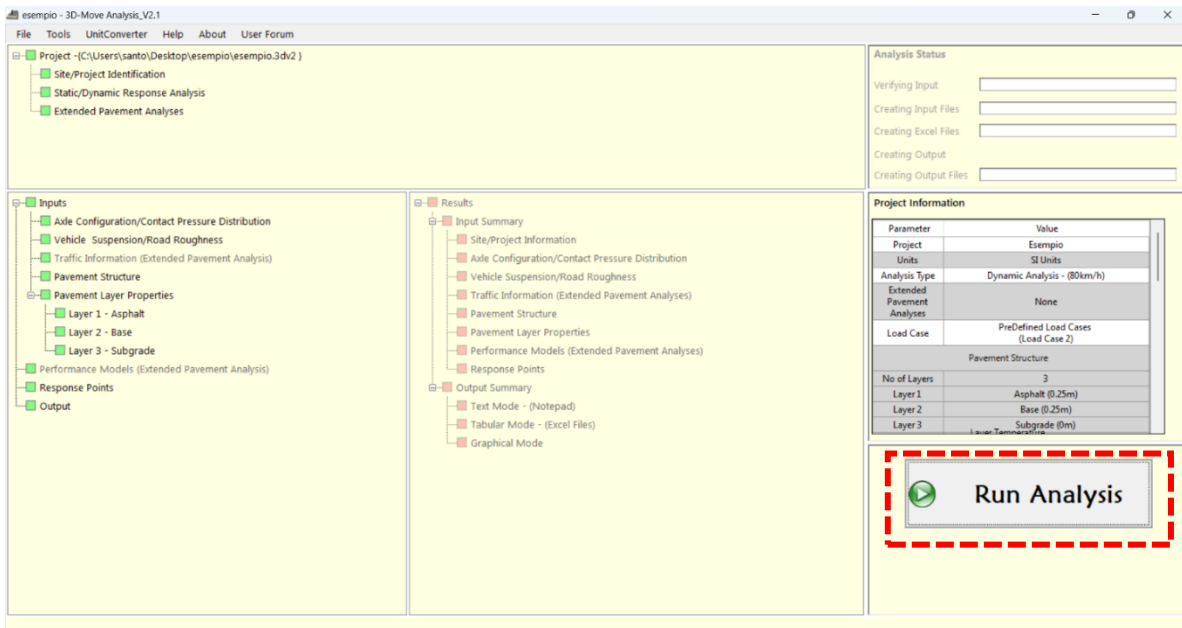


Figura 4.69. Finestra principale di 3D-MOVE ANALYSIS, tasto di avvio dell'analisi "RUN ANALYSIS"

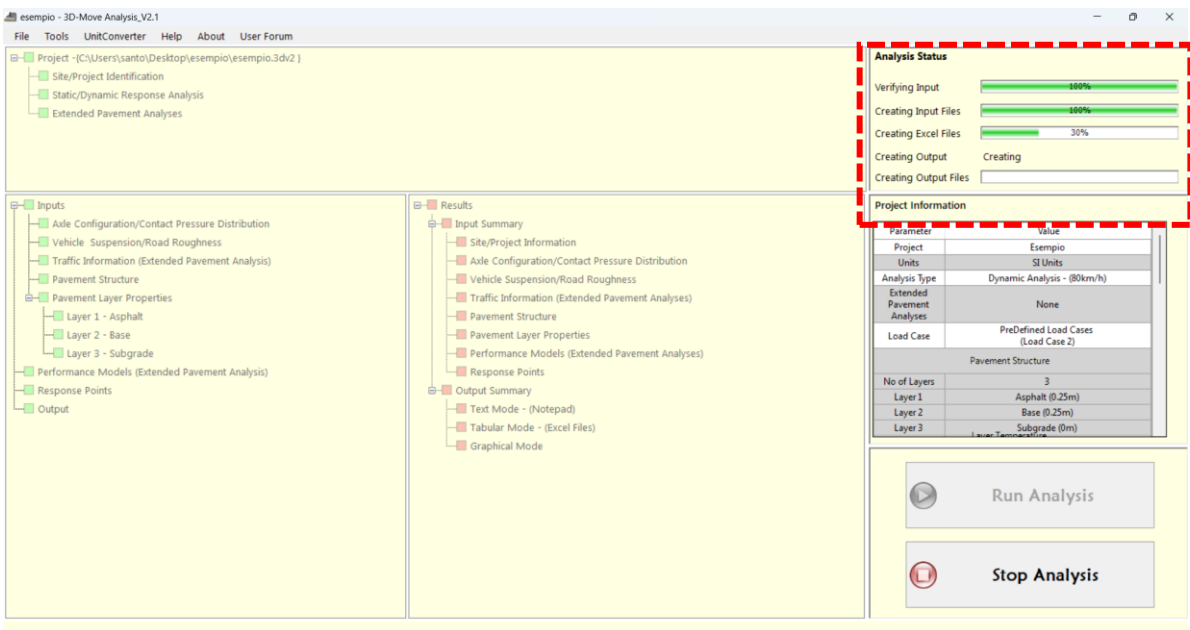


Figura 4.70. Finestra principale di 3D-MOVE ANALYSIS, pannello "ANALYSIS STATUS"

Una volta completata l'analisi, la finestra principale mostrerà gli indicatori di tutti i moduli di colore verde, come illustrato in Figura 4.71, informando l'utente che l'esecuzione del programma è avvenuta correttamente. Se l'utente ha la necessità di modificare i dati di input, deve selezionare il tasto "NEW RUN/MODIFY INPUTS".

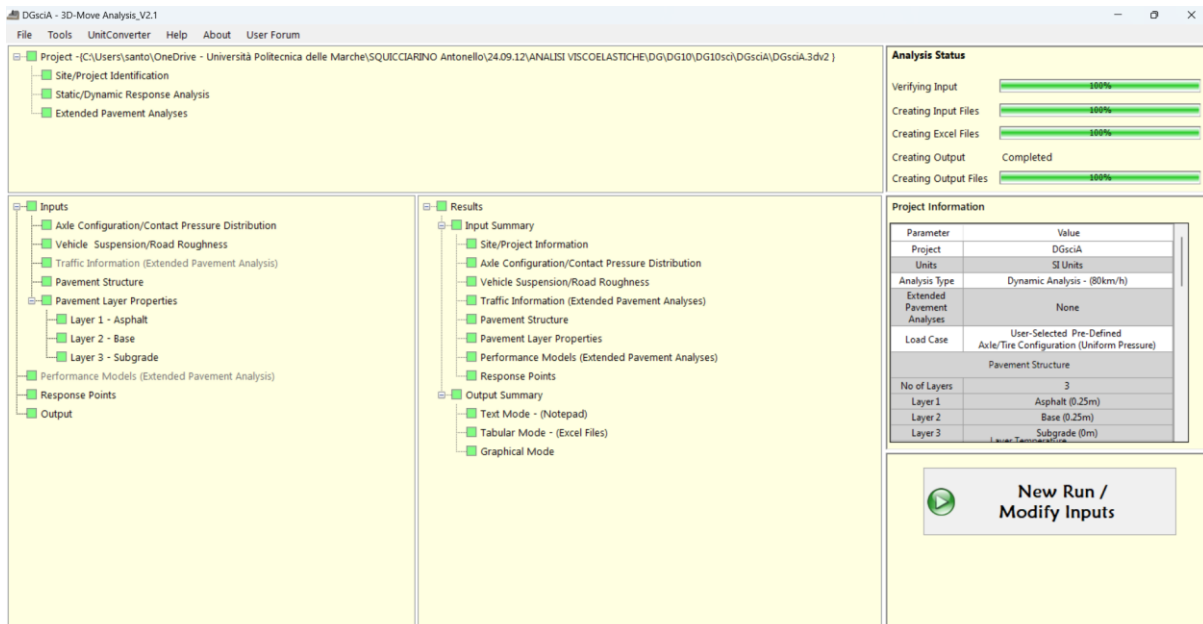


Figura 4.71. Finestra principale di 3D-MOVE ANALYSIS”, terminata l’analisi

4.2.5.1 Input Summary

Nel pannello di destra (RESULTS) della finestra principale del software, è possibile accedere a un file di riepilogo degli input in formato Microsoft Excel cliccando sul menu "INPUT SUMMARY". Questo file contiene un foglio per ciascun dato di input. La Figura 4.72 mostra il foglio riepilogativo degli input relativi alla configurazione dell'asse e alla distribuzione della pressione di contatto.

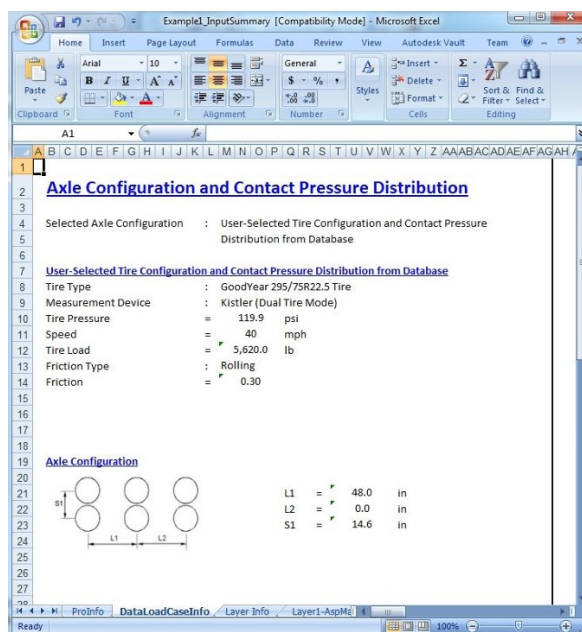


Figura 4.72 File Excel di Input Summary

4.2.5.2 Output Summary

L'output restituito dal 3D-MOVE ANALYSIS può essere visualizzato in tre modalità, accessibili al modulo "OUTPUT SUMMARY":

- A. Test Mode
- B. Tabular Mode (Microsoft Excel)
- C. Graphical Mode (solo per l'analisi dinamica)

A. Test Mode

Il programma genera file di testo contenenti i risultati dell'analisi, che possono essere aperti con il Blocco note. È possibile accedere direttamente a questi file cliccando su "TEST MODE" dalla finestra principale (Figura 4.71). Nel caso statico, il 3D-MOVE crea un unico file di output di testo, mentre nel caso dinamico vengono generati file di testo separati per ciascuna delle risposte. La Figura 4.73 mostra un esempio del file di output per il caso statico, mentre la Figura 4.74 presenta la finestra di selezione per i file di testo e la Figura 4.75 un esempio del file di output per il caso dinamico.

```
*****
**
**      3D-Move Analysis (V 2.0) Updated on February 2013 **
**      Developed by University of Nevada, Reno           **
**      Text Output - Static Analysis                    **
**
*****

NOTE :
DISPLACEMENTS : X-DISP, Y-DISP, Z-DISP
NORMAL STRAINS : EXX, EYY, EZZ           SHEAR STRAINS : GXY, GXZ, GYZ
NORMAL STRESSES : SXX, SYX, SZZ         SHEAR STRESSES : TXY, TXZ, TYZ
ms : micro-strain

| POINT | X-DISP(m) | Y-DISP(m) | Z-DISP(m) | Exx(ms) | Eyy(ms) | Ezz(ms) | Sxx(kPa) | Syy(kPa) | Szz(kPa) | Gxy(ms) | Gxz(ms) | Gyz(ms) | Txy(kPa) | Tzx(kPa) | Tyz(kPa) |
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
1 | -21728E-08 | -21168E-08 | 15108E-03 | 55614E+02 | 55742E+02 | 50279E+02 | 72352E+03 | 72390E+03 | 70771E+03 | 79364E-03 | -15800E-14 | -16449E-15 | 11758E-02 | -23407E-14 | -24368E-15 |
2 | -10095E-04 | -13872E-08 | 11984E-03 | 10525E+02 | 33669E+02 | -23799E+02 | 10169E+03 | 17026E+03 | -13367E-01 | -57196E-02 | -29583E-14 | -46831E-15 | -84734E-02 | -43826E-14 | -69380E-15 |
3 | -10782E-04 | -86576E-09 | 95774E-04 | 32907E+01 | 17977E+02 | -79885E+01 | 13680E+02 | 76697E+02 | -18746E-02 | -25073E-02 | -26418E-14 | -93626E-15 | -37145E-02 | -39138E-14 | -13870E-14 |
4 | -91892E-05 | -61139E-09 | 75970E-04 | -63802E+01 | 10219E+02 | -20673E+01 | -12780E+02 | -36404E+02 | -76723E-03 | -13509E-02 | -24796E-14 | -98920E-16 | -20014E-02 | -36735E-14 | -14655E-15 |
5 | -72644E-05 | -46793E-09 | 60666E-04 | -61911E+01 | 60683E+01 | 66092E-01 | -83949E-03 | -11651E-14 | 63327E-16
```

Figura 4.74. File output di testo di un caso statico

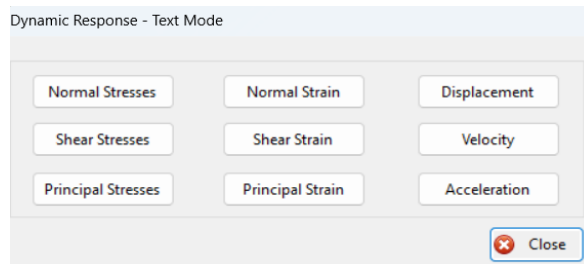


Figura 4.75. Finestra di selezione delle risposte nel caso dinamico

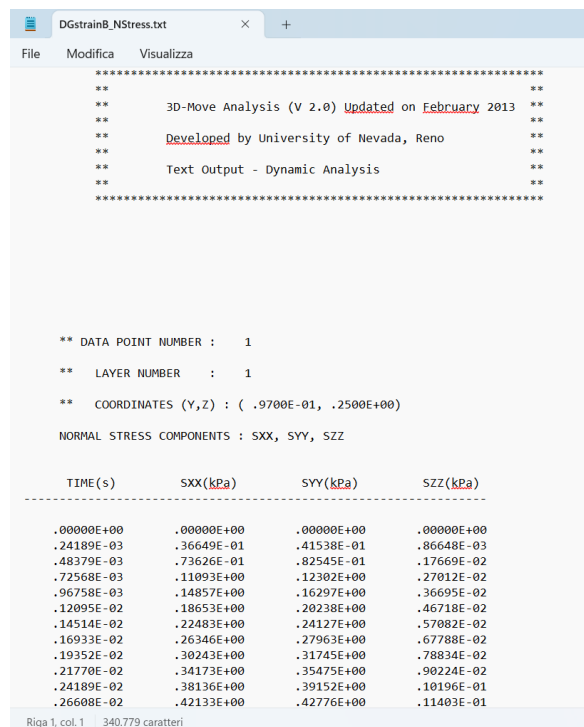


Figura 4.76. File output di testo nel caso dinamico

B. Tabular Mode

Il 3D-MOVE ANALYSIS genera file di output in formato Excel. È possibile accedere direttamente al file Excel facendo clic su “TABULAR MODE” dalla finestra principale mostrata in Figura 4.71. Anche in questo caso l’analisi restituisce un solo file output Excel per il caso statico come mostrato in Figura 4.77, dove in ogni foglio del file è presente la risposta di un parametro mentre per il caso dinamico vengono creati file Excel separati per ciascuna delle risposte. La Figura 4.78 presenta la finestra di selezione per i file Excel e la Figura 4.79 un esempio del file di output Excel per il caso dinamico.

Point No	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)	Normal Stress X-X (kPa)	Normal Stress Y-Y (kPa)	Normal Stress Z-Z (kPa)
1	0.15	0.15	0	0.72352E+03	0.72390E+03	0.70771E+03
2	0.45	0.15	0	0.10169E+03	0.17026E+03	-0.13367E-01
3	0.75	0.15	0	0.13680E+02	0.76697E+02	-0.18746E-02
4	1.05	0.15	0	-0.12780E+02	0.36404E+02	-0.76723E-03
5	1.35	0.15	0	-0.18540E+02	0.17784E+02	-0.43625E-03
6	1.65	0.15	0	-0.17541E+02	0.87636E+01	-0.29354E-03
7	1.95	0.15	0	-0.14609E+02	0.43055E+01	-0.21945E-03
8	0.15	0.15	0.29	-0.57613E+03	-0.57657E+03	0.55943E+02

Figura 4.77. File Excel di output nel caso statico

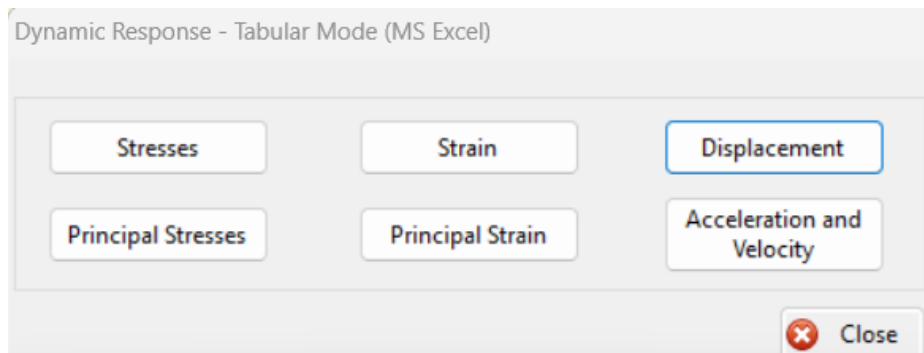


Figura 4.78. Finestra di selezione delle risposte nel caso dinamico

Point No	Layer No	Y-Coord (m)	Z-Coord (m)
1	1	0.097	0.25

Time (s)	Disp X (m)	Disp Y (m)	Disp Z (m)
0	0	0	0
0.00024189	9.3607E-09	-1.2077E-10	5.5377E-09
0.00048379	1.8724E-08	-2.4702E-10	1.1673E-08
0.00072568	2.809E-08	-3.7876E-10	1.8407E-08
0.00096758	3.7458E-08	-5.16E-10	2.5739E-08
0.0012095	4.6829E-08	-6.5873E-10	3.367E-08
0.0014514	5.6203E-08	-8.0697E-10	4.2199E-08
0.0016933	6.558E-08	-9.6071E-10	5.1327E-08
0.0019352	7.4961E-08	-1.12E-09	6.1053E-08
0.002177	8.4345E-08	-1.2847E-09	7.1379E-08
0.0024189	9.3732E-08	-1.4551E-09	8.2303E-08

Figura 4.79. File Excel di output, caso dinamico

C. Graphical Mode

Questa opzione è disponibile solo per il caso dinamico. L'analisi 3D-Move è in grado di produrre grafici per tutte le risposte. La Figura 4.80 mostra un grafico dello spostamento in direzione z nel tempo alla base dello strato legato. Inoltre, per i grafici sono disponibili i punti definiti al menu "RESPONSE POINT", selezionando le coordinate dei punti di risposta tramite il menu a discesa Y e Z. Il pulsante "FORMAT GRAPH" in basso può essere utilizzato per salvare il grafico e/o stamparlo. Il tasto "MODIFY DLC" permette di valutare la risposta del parametro considerato, modificando il coefficiente dinamico di carico senza dover riavviare l'analisi.

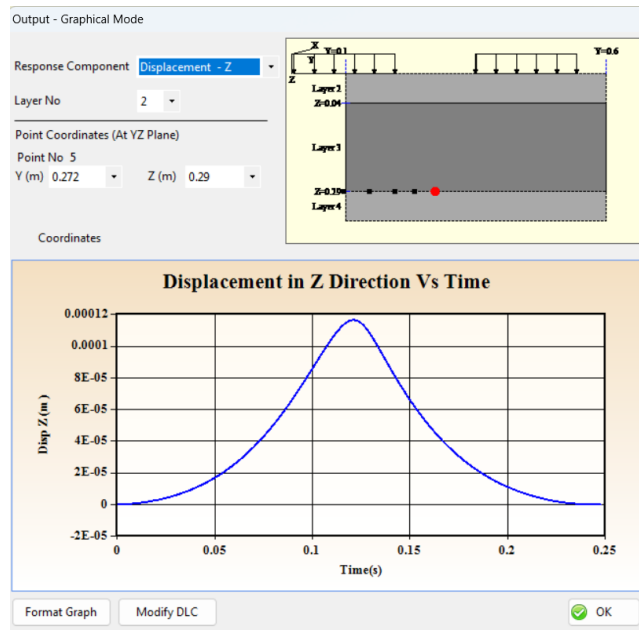


Figura 4.80. Finestra di visualizzazione Graphical Mode, spostamento in direzione z nel tempo

Capitolo 5

Analisi Elastica

In questo capitolo, si illustra la metodologia utilizzata per raggiungere gli obiettivi stabiliti al Capitolo 3 e si presentano i relativi risultati. In particolare, si intende mettere in relazione la deformazione alla base dello strato in conglomerato bituminoso (ε_{cb}) e del modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso (E_{cb}), con i parametri del bacino di deflessione ottenuti da misure FWD (Falling Weight Deflectometer).

Per conseguire questo obiettivo, è stata implementata una soluzione numerica che simula prove FWD su pavimentazioni di tipo flessibile e semi-rigido, tipiche delle sezioni autostradali. L'analisi è stata condotta utilizzando il software KENPAVE. Dopo aver effettuato l'analisi su tutte le pavimentazioni, si è proceduto all'esame dei risultati per raggiungere gli obiettivi.

5.1 Pavimentazione flessibile “classica”

5.1.1 Dati di input

Si analizza la risposta di una pavimentazione flessibile sottoposta a un carico FWD con piastra da 300 mm sulla quale agirà un carico di 50 kN. La pavimentazione ha la seguente stratigrafia:

- Strato in conglomerato bituminoso di spessore e rigidezza variabili;
- Strato di base non legato di spessore 250 mm e modulo elastico $E_{base} = 300$ MPa;
- Strato di sottofondo con rigidezza variabile E_{sub} (20 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 200 MPa).

Tali dati sono stati dedotti dallo studio di Van Gurp [31].

Si assume per tutti gli strati un valore del coefficiente di Poisson (PR) pari a 0.35.

Lo strato in conglomerato bituminoso viene analizzato cambiando di volta in volta sia lo spessore che la rigidezza. In particolare, consideriamo:

- Spessori (h_{cb}): 150 mm, 160 mm, 180 mm, 200 mm;
- Moduli elastici (E_{cb}): 2000 MPa, 5000 MPa, 10000 MPa.

In Figura 5.1 si illustra la stratigrafia della pavimentazione flessibile soggetta al carico FWD.

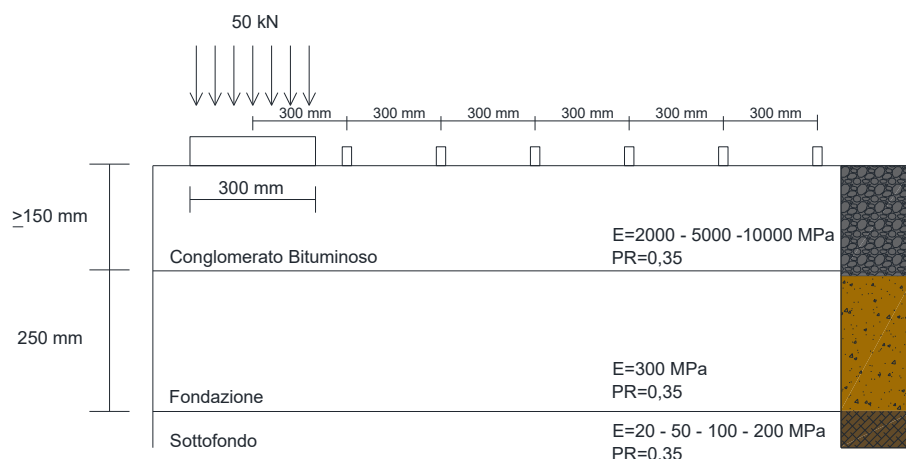


Figura 5.1 Stratigrafia pavimentazione flessibile soggetta a carico FWD

Il lavoro è stato organizzato in modo che ogni file di analisi rappresenti una pavimentazione con una specifica stratigrafia e rigidezza. Avendo variabilità in questo senso avremo dunque più pavimentazioni da analizzare.

Per semplicità esecutiva del lavoro si è pensato ad una nomenclatura semplice dei file in modo che identifichi subito la geometria della pavimentazione da analizzare. In Tabella 5.1 si riporta il metodo utilizzato: una nomenclatura a doppia cifra, dove la prima identifica lo spessore e la seconda la rigidezza dello strato legato.

Tabella 5.1. Nomenclatura pavimentazioni

PAVIMENTAZIONE	h_{CB} [MM]	E_{CB} [MPA]
15.2	150	2000
15.5	150	5000
15.10	150	10000
16.2	160	2000
16.5	160	5000
16.10	160	10000
18.2	180	2000
18.5	180	5000
18.10	180	10000
20.2	200	2000
20.5	200	5000
20.10	200	10000

Inoltre, per tenere conto della variabilità della rigidità del sottofondo E_{sub} , il software KENPAVE ci permette di inserire più valori di input attraverso il "DATA SET" come illustrato al Paragrafo 4.1.2, mantenendo costante in input lo spessore e rigidità del primo strato e del secondo (che ricordiamo essere fisso), cambiando solamente il modulo elastico dello strato di sottofondo (E_{sub}).

Per tutti i file avremo dunque quattro "Data Set" dove si considera:

- Data Set 1, $E_{sub} = 20$ MPa;
- Data Set 2, $E_{sub} = 50$ MPa;
- Data Set 3, $E_{sub} = 100$ MPa;
- Data Set 4, $E_{sub} = 200$ MPa.

Il carico FWD che agisce sulla pavimentazione è stato modellato nel software come un carico circolare di 50 kN di diametro 30 cm e si sono considerati 7 geofoni posizionati ogni 30 cm a partire dalla piastra di carico. In ultimo, sono state inserite le coordinate dei punti di risposta da analizzare. In particolare, sono state inserite le coordinate della piastra di carico e dei geofoni riferite alla quota $Z = 0$ m e alla quota della base dello strato legato che risulta essere variabile.

5.1.2 Risultati

Il KENPAVE restituisce in output file di testo con le risposte tenso-deformative dei punti inseriti in input (Figura 4.15). Per facilitare la consultazione dei dati, queste informazioni sono state trasferite in fogli Excel, come illustrato in Figura 5.2. In particolare, i fogli riportano rispettivamente le seguenti informazioni riferite ai punti di analisi:

- Coordinate;
- Spostamento verticale;
- Tensioni e deformazioni (verticali, radiali, tangenziali e di taglio).

Tra tutte le risposte, quelle di maggiore interesse in questa analisi è lo spostamento verticale, utile per calcolare il valore di SCI300 e il valore di deformazione alla base dello strato legato ε_{cb} sotto la verticale della piastra di carico.

COORDINATE		VERTICAL	STRESS				STRAIN			
RADIAL	VERTICAL	DISPLACEMENT	VERTICAL	RADIAL	TANGENTIAL	SHEAR	VERTICAL	RADIAL	TANGENTIAL	SHEAR
[cm]	[cm]	[cm]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[-]	[-]	[-]
0	0	0.12468	707.714	1026.684	1026.684	0	-1.93E-04	2.75E-04	2.75E-04	0.00E+00
30	0	0.10974	0	447.565	525.994	0	-1.23E-04	1.15E-04	1.68E-04	-1.38E-11
60	0	0.09062	0	181.5	228.018	0	-5.94E-05	4.66E-05	7.80E-05	1.05E-11
90	0	0.07643	0	89.234	142.103	0	-3.44E-05	1.76E-05	5.33E-05	-3.58E-12
120	0	0.06468	0	50.1	86.36	0	-2.04E-05	8.73E-06	3.32E-05	-4.72E-12
150	0	0.05547	0	30.715	55.875	0	-1.30E-05	4.81E-06	2.18E-05	4.74E-12
180	0	0.04824	0	20.273	38.058	0	-8.68E-06	2.94E-06	1.50E-05	1.93E-12
210	0	0.04251	0	14.225	27.1	0	-6.11E-06	1.98E-06	1.07E-05	1.25E-12
0	15	0.12721	220.18	-841.511	-841.511	0	4.05E-04	-3.12E-04	-3.12E-04	0.00E+00
30	15	0.10911	33.387	14.177	-234.173	68.869	5.52E-05	4.22E-05	-1.25E-04	9.30E-05
60	15	0.08894	4.685	43.967	-66.948	31.457	6.36E-06	3.29E-05	-4.20E-05	4.25E-05
90	15	0.07277	2.318	34.064	-25.798	15.152	-2.88E-07	2.11E-05	-1.93E-05	2.05E-05
120	15	0.0598	1.333	27.535	-9.822	7.498	-2.43E-06	1.53E-05	-9.96E-06	1.01E-05
150	15	0.04954	0.753	21.928	-2.733	3.656	-2.98E-06	1.13E-05	-5.34E-06	4.94E-06
180	15	0.04149	0.412	17.085	0.491	1.675	-2.87E-06	8.38E-06	-2.82E-06	2.26E-06
210	15	0.03522	0.214	13.085	1.891	0.663	-2.51E-06	6.17E-06	-1.38E-06	8.95E-07

Figura 5.2 Output di una pavimentazione flessibile

Per ogni file, dunque, per ogni stratigrafia analizzata sono stati presi i valori delle coppie di SCI300 e deformazione alla base dello strato legato (ϵ_{cb}) come mostrato in Tabella 5.2.

Tabella 5.2 - Coppie di valori SCI300 - ϵ_{cb}

hcb	E _{cb}	E _{sub}	SCI300	ϵ_{cb}
[mm]	[MPa]	[MPa]	[μ m]	[μ m/m]
150	2000	20	149.4	312
150	2000	50	155.4	294.1
150	2000	100	152.4	281
150	2000	200	151.4	269.8
150	5000	20	110.3	209.6
150	5000	50	97.2	192.1
150	5000	100	87.8	179.5
150	5000	200	83.6	168.4
150	10000	20	60.2	140.4
150	10000	50	58	126.9
150	10000	100	57.8	117.2
150	10000	200	52	108.7
160	2000	20	139.2	298.2
160	2000	50	145.2	280
160	2000	100	143	266.8
160	2000	200	131.4	255.5
160	5000	20	77.6	196.9
160	5000	50	77.9	180.1
160	5000	100	80.2	167.9
160	5000	200	70.6	157.2
160	10000	20	54	130.5

h_{cb} [mm]	E_{cb} [MPa]	E_{sub} [MPa]	SCI300 [μm]	ϵ_{cb} [$\mu m/m$]
160	10000	100	46.2	108.7
160	10000	200	46.8	100.6
180	2000	20	121.7	271.4
180	2000	50	127.9	253
180	2000	100	130.2	239.8
180	2000	200	117.6	228.6
180	5000	20	65	174.2
180	5000	50	65.3	158.5
180	5000	100	67.8	147.3
180	5000	200	61.7	137.5
180	10000	20	43.7	113.2
180	10000	50	37.2	101.9
180	10000	100	37.9	93.89
180	10000	200	38.7	86.81
200	2000	20	87.2	246.3
200	2000	50	114	228.2
200	2000	100	117.5	215.3
200	2000	200	106.7	204.3
200	5000	20	55	154.4
200	5000	50	55.7	140
200	5000	100	58.4	129.8
200	5000	200	53.4	120.8
200	10000	20	35.6	98.84
200	10000	50	30.8	88.83
200	10000	100	31.7	81.72
200	10000	200	32.7	75.44

5.1.3 Analisi dei risultati

È stata effettuata un'analisi di regressione tra il *Surface Curvature Index* (SCI300) e la deformazione alla base dello stato legato (ϵ_{cb}). La nuvola di punti rappresentante tutte le coppie di dati è stata confrontata con l'Equazione (5.1) proposta da Van Gurp [31], la quale dimostra che la deformazione di trazione indotta da un carico di 50 kN tramite FWD, può essere prevista in funzione del parametro SCI300 secondo la seguente equazione:

$$\epsilon = 3.027 \cdot SCI_{300}^{0.881} \quad (5.1)$$

Questa relazione può essere espressa anche nella forma logaritmica:

$$\log \epsilon = 0.481 + 0.881 \cdot \log SCI_{300} \quad (5.2)$$

In generale queste relazioni possono essere scritte come segue:

$$\varepsilon = a \cdot SCI_{300}^b \quad (5.3)$$

$$\log \varepsilon = \log a + b \cdot \log SCI_{300} \quad (5.4)$$

I valori ottenuti dall'analisi forniscono le seguenti equazioni:

$$\varepsilon = 5.2376 \cdot SCI_{300}^{0.7992} \quad (5.5)$$

$$\log \varepsilon = 0.719 + 0.7992 \cdot \log SCI_{300} \quad (5.6)$$

Il confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi KENPAVE e quelli riportati nel lavoro di Van Gurp evidenzia una sovrastima delle deformazioni ε_{cb} nelle pavimentazioni esaminate, con una differenza di circa il 22% (Figura 5.3). Questa discrepanza potrebbe derivare dall'utilizzo di software differenti e dall'assunzione relativa del coefficiente di Poisson. Tuttavia, va sottolineato che, a livello qualitativo, entrambi i set di risultati mostrano un andamento simile.

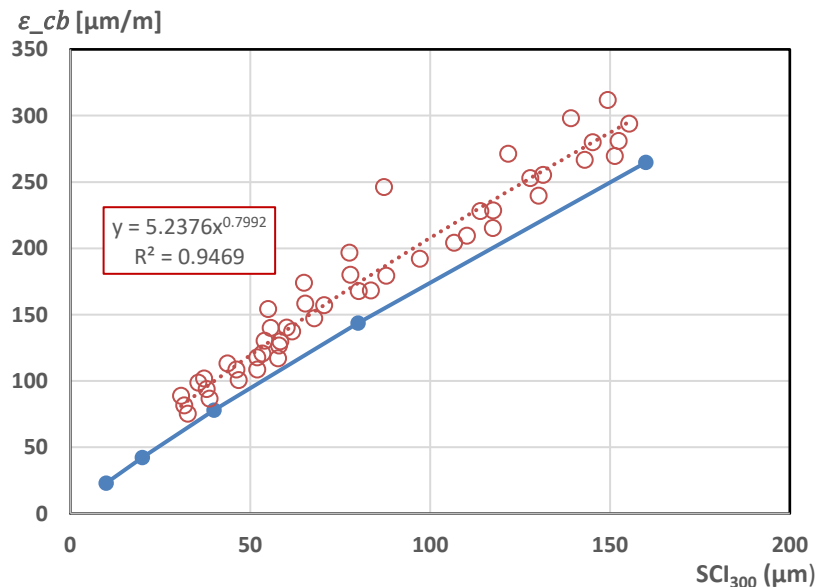


Figura 5.3 Relazione SCI_{300} - ε_{cb} tra i valori calcolati e quelli di letteratura

5.2 Pavimentazione semi-rigida “Autostradale” con usura chiusa

5.2.1 Dati input

Con lo stesso carico FWD, utilizzato per la pavimentazione “classica”, si analizza una pavimentazione semi-rigida di tipo “autostradale”, illustrata in Figura 5.4, con la seguente stratigrafia:

- Strato in conglomerato bituminoso (CB) di spessore 250 mm;
- Strato di base legato a cemento o misto cementato (MC) di spessore 250 mm;
- Strato di sottofondo.

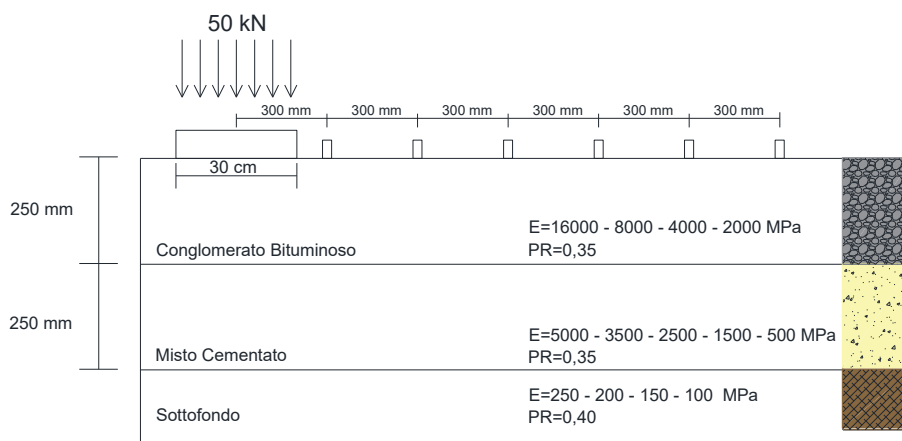


Figura 5.4. Stratigrafia pavimentazione autostradale con usura chiusa

I materiali hanno rigidità variabile, in Tabella 5.3 vengono riportate le proprietà meccaniche di ciascuno strato.

Tabella 5.3 – Proprietà caratteristiche della pavimentazione semi-rigida con usura chiusa

Strato	E [MPa]					PR [-]	h [cm]
Conglomerato bituminoso	16000	8000	4000	2000	-	0.35	25
Misto cementato	5000	3500	2500	1500	500	0.35	25
Sottofondo	250	200	150	100	-	0.40	Inf.

Nel KENPAVE si analizza la stessa pavimentazione in termini geometrici soggetta allo stesso carico, quello che cambia è appunto la rigidità degli strati. Avendo variabilità in tal senso è come se avessimo più pavimentazioni da analizzare.

Per semplicità esecutiva si è pensato ad una nomenclatura semplice dei file di analisi, in modo che caratterizzi subito la singola pavimentazione. In Tabella 5.5 si riporta la nomenclatura utilizzata. In particolare, è stato adottato un codice a doppia cifra, dove la prima identifica il modulo elastico dello strato in conglomerato bituminoso (E_{cb}) e la seconda il modulo elastico dello strato in misto cementato (E_{mc}).

Tabella 5.5 – nomenclatura delle pavimentazioni autostradali con usura chiusa

Pavimentazione	E_{cb} [MPa]	E_{mc} [MPa]
16.50	16000	5000
16.35	16000	3500
16.25	16000	2500
16.15	16000	1500
16.5	16000	500
8.50	8000	5000
8.35	8000	3500

8.25	8000	2500
8.15	8000	1500
8.5	8000	500
4.50	4000	5000
4.35	4000	3500
4.25	4000	2500
4.15	4000	1500
4.5	4000	500
2.50	2000	5000
2.35	2000	3500
2.25	2000	2500
2.15	2000	1500
2.5	2000	500

Inoltre, per tenere conto della variabilità della rigidità del sottofondo E_{sub} , il software KENPAVE ci permette di inserire più valori di input attraverso il “DATA SET” come illustrato al Paragrafo 4.1.2, mantenendo costante in input le caratteristiche geometriche e proprietà meccaniche degli strati, cambiando solamente il modulo elastico dello strato di sottofondo (E_{sub}).

Per tutti i file avremo dunque quattro “DATA SET”, nello specifico:

- Data Set 1, E_{sub} = 250 MPa;
- Data Set 2, E_{sub} = 200 MPa;
- Data Set 3, E_{sub} = 150 MPa;
- Data Set 4, E_{sub} = 100 MPa.

Il carico FWD che agisce sulla pavimentazione è stato modellato nel software come un carico circolare di 50 kN di diametro 30 cm e si sono considerati 6 geofoni posizionati ogni 30 cm a partire dalla piastra di carico. In ultimo, sono stati inserite le coordinate dei punti di risposta da analizzare. In particolare, sono state inserite le coordinate della piastra di carico e dei geofoni riferite alla quota $Z = 0$ m e alla quota del lembo inferiore dello strato legato pari a $Z = 0,25$ m.

5.2.2 Risultati

Il KENPAVE restituisce in output file di testo con le risposte tenso-deformative dei punti inseriti in input (Figura 4.15). Per facilitare la consultazione dei dati, queste informazioni sono state trasferite in fogli Excel, come illustrato in Figura 5.5. In particolare, i fogli riportano rispettivamente le seguenti informazioni riferite ai punti di analisi:

- Coordinate;
- Spostamento verticale;

- Tensioni e deformazioni (verticali, radiali, tangenziali e di taglio).

Tra tutte le risposte, quelle di maggiore interesse in questa analisi è lo spostamento verticale, utile per calcolare il valore di SCI_{300} e il valore di deformazione alla base dello strato legato ϵ_{cb} sotto la verticale della piastra di carico.

COORDINATE		VERTICAL	STRESS				STRAIN			
RADIAL	VERTICAL	DISPLACEMENT	VERTICAL	RADIAL	TANGENTIAL	SHEAR	VERTICAL	RADIAL	TANGENTIAL	SHEAR
[cm]	[cm]	[cm]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[-]	[-]	[-]
0	0	0.00755	707.714	411.849	411.849	0	-7.63E-06	1.31E-05	1.31E-05	0.00E+00
30	0	0.00695	0	243.967	263.467	0	-6.74E-06	7.96E-06	9.61E-06	2.65E-13
60	0	0.0061	0	124.224	149.882	0	-4.46E-06	3.95E-06	6.11E-06	-6.42E-13
90	0	0.0053	0	69.139	87.881	0	-2.75E-06	2.16E-06	3.74E-06	5.12E-14
120	0	0.00467	0	40.527	64.613	0	-1.87E-06	9.69E-07	3.00E-06	-8.44E-14
150	0	0.0041	0	25.643	43.882	0	-1.25E-06	5.46E-07	2.09E-06	-4.50E-14
180	0	0.00363	0	17.067	30.826	0	-8.56E-07	3.25E-07	1.49E-06	-6.85E-14
0	25	0.00774	141.448	-307.952	-307.952	0	2.23E-06	-1.56E-05	-1.56E-05	0.00E+00
30	25	0.007	28.507	-33.894	-129.138	56.26	5.35E-06	8.29E-08	-7.95E-06	9.49E-06
60	25	0.00604	4.81	3.129	-51.809	27.959	1.37E-06	1.22E-06	-3.41E-06	4.72E-06
90	25	0.0052	2.781	8.085	-26.678	15.047	5.81E-07	1.03E-06	-1.91E-06	2.54E-06
120	25	0.00446	1.847	10.472	-14.633	8.517	2.06E-07	9.34E-07	-1.18E-06	1.44E-06
150	25	0.00383	1.218	10.972	-8.056	4.885	1.23E-08	8.35E-07	-7.70E-07	8.24E-07
180	25	0.00329	0.794	10.365	-4.283	2.758	-8.34E-08	7.24E-07	-5.12E-07	4.65E-07

Figura 5.5. Esempio di risposte della pavimentazione semi-rigida con usura chiusa

Dalle misure di deflessione, oltre lo SCI_{300} (2.4), si sono ricavati altri indicatori del bacino di deflessione, tra i quali:

$$SCI_{600} = d_0 - d_{600} \quad (5.3)$$

$$SCI_{900} = d_0 - d_{900} \quad (5.4)$$

$$BDI \quad (2.7)$$

$$BCI = d_{600} - d_{900} \quad (5.6)$$

$$Rx = d_x^2 / (2d_0 \cdot (1 - d_x/d_0)) \text{ con } x = 600, 900, 1200 \quad (5.3)$$

$$d_{1500}$$

$$d_{1800}$$

Per ogni file, dunque per ogni pavimentazione indagata, avremo i valori dei suddetti parametri, i quali sono riportati in Tabella 5.6.

Tabella 5.6 – Sinottico dei parametri ricavati dall'analisi per pavimentazioni autostradali con usura chiusa

E_{cb}	E_{mc}	E_{sub}	ϵ_{cb}	SCI_{300}	SCI_{600}	SCI_{900}	BDI	BCI	R600	R900	R1200	d_{1500}	d_{1800}
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
16000	5000	250	15.6	6	14.5	22.5	8.5	8	158.8	88.9	61.2	41	36.3
16000	5000	200	15.85	6.1	15.1	23.8	9	8.7	208.2	116.1	79.8	49.9	44.4
16000	5000	150	16.17	6.3	15.8	25.4	9.5	9.6	296.4	164.5	112.5	64.1	57.5
16000	5000	100	16.61	8.8	18.3	27.4	9.5	9.1	440.1	271.3	178.6	90.3	82.1

E_{cb}	E_{mc}	E_{sub}	ε_{cb}	SCI₃₀₀	SCI₆₀₀	SCI₉₀₀	BDI	BCI	R600	R900	R1200	d₁₅₀₀	d₁₈₀₀
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[μm/m]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
16000	3500	250	19.36	6.8	16.6	25.7	9.8	9.1	155.8	86.4	59.5	41.9	36.9
16000	3500	200	19.73	7	17.3	27.2	10.3	9.9	204.4	113.1	77.5	51.1	45.2
16000	3500	150	20.2	7.3	18.4	29.3	11.1	10.9	287.1	159.4	108.7	65.8	58.7
16000	3500	100	20.86	10.4	19.5	32	9.1	12.5	475.0	260.9	172.0	93.3	84.2
16000	2500	250	22.83	7.6	18.7	28.2	11.1	9.5	153.1	87.1	58.1	42.7	37.3
16000	2500	200	23.32	7.8	19.6	30.6	11.8	11	200.1	110.4	75.6	52.2	45.9
16000	2500	150	23.96	8.2	20.8	33.1	12.6	12.3	282.5	155.3	106.2	67.3	59.7
16000	2500	100	24.85	8.5	22.3	36.4	13.8	14.1	463.8	254.0	166.7	95.8	86
16000	1500	250	27.63	12.1	25	36	12.9	11	136.3	80.0	54.2	43.7	38
16000	1500	200	28.31	9	22.8	34.8	13.8	12	197.6	111.0	73.4	53.5	46.8
16000	1500	150	29.2	9.4	24.2	38.6	14.8	14.4	279.8	151.3	102.8	69.3	61.1
16000	1500	100	30.47	10	26.4	43	16.4	16.6	453.5	245.9	166.1	99.2	88.3
16000	500	250	35.11	12.8	30.5	44	17.7	13.5	140.3	80.5	53.5	45.7	39.3
16000	500	200	36.07	11.1	28.3	43.2	17.2	14.9	199.3	109.6	71.4	55.9	48.4
16000	500	150	37.36	11.6	30.3	47.1	18.7	16.8	278.3	153.0	99.6	72.5	63.2
16000	500	100	39.28	12.4	33.1	54.2	20.7	21.1	450.8	238.3	160.2	104.3	91.8
8000	5000	250	17.16	17.2	28	37	10.8	9	109.6	71.6	51.0	42.5	37.3
8000	5000	200	17.31	13.6	25	35.4	11.4	10.4	159.6	97.6	69.9	51.8	45.8
8000	5000	150	17.49	8.9	21.1	32.7	12.2	11.6	268.4	152.4	105.6	66.8	59.5
8000	5000	100	17.76	12.7	22.4	35.7	9.7	13.3	442.2	249.1	166.2	94.8	85.4
8000	3500	250	23.38	17.3	31.3	41.5	14	10.2	110.0	70.7	50.2	43.2	37.7
8000	3500	200	23.68	15.2	28.4	39.6	13.2	11.2	158.0	97.8	68.0	52.9	46.4
8000	3500	150	24.07	10.2	24.4	37.7	14.2	13.3	261.4	147.0	102.0	68.4	60.5
8000	3500	100	24.63	10.7	26.2	41.4	15.5	15.2	427.3	240.4	165.3	97.4	87.2
8000	2500	250	29.69	18.8	34.8	46.1	16	11.3	110.0	69.9	49.3	43.9	38.1
8000	2500	200	30.18	16.9	32	44.5	15.1	12.5	156.7	96.2	66.4	53.8	47
8000	2500	150	30.81	11.7	28	43	16.3	15	254.9	142.6	98.6	69.7	61.4
8000	2500	100	31.7	12.3	30.2	47.6	17.9	17.4	416.4	232.3	159.7	99.9	88.9
8000	1500	250	39.38	21.1	40.3	53.5	19.2	13.2	110.9	69.1	48.2	44.8	38.7
8000	1500	200	40.2	17.5	37.8	52.5	20.3	14.7	155.3	93.8	64.4	55.1	47.8
8000	1500	150	41.26	20.1	39.9	56.6	19.8	16.7	219.2	131.8	90.2	71.7	62.6
8000	1500	100	42.79	14.8	36.7	57.6	21.9	20.9	404.8	223.2	153.1	103.2	91.1
8000	500	250	57	25.6	50.4	68.7	24.8	18.3	119.5	69.3	47.5	46.9	40
8000	500	200	58.44	21.9	48.3	68.6	26.4	20.3	163.4	92.6	62.5	57.6	49.4
8000	500	150	60.41	22.7	52.5	74.5	29.8	22	220.9	129.0	86.9	75.1	64.8
8000	500	100	63.33	19.7	50.1	76.5	30.4	26.4	394.7	219.6	144.6	108.9	94.8
4000	5000	250	15.3	31.4	47.3	58.1	15.9	10.8	88.6	61.1	45.0	43.9	38.3
4000	5000	200	15.17	33.9	48.5	60.4	14.6	11.9	115.2	79.4	58.4	53.8	47.1
4000	5000	150	15.02	28.7	44.4	58.6	15.7	14.2	176.1	115.3	85.3	69.7	61.5
4000	5000	100	14.83	13.2	30.4	46.8	17.2	16.4	402.6	231.3	160.2	99.6	88.9
4000	3500	250	23.86	33.4	51.5	63.5	18.1	12	89.8	61.0	44.4	44.5	38.6
4000	3500	200	23.89	33.8	53	66.2	19.2	13.2	116.4	79.2	57.7	54.6	47.6
4000	3500	150	23.96	31.3	49.3	64.2	18	14.9	176.1	116.8	83.8	70.9	62.2
4000	3500	100	24.07	15	34.9	53.5	19.9	18.6	390.7	222.9	155.1	101.7	90.3

E_{cb} [MPa]	E_{mc} [MPa]	E_{sub} [MPa]	ϵ_{cb} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	SCI_{300} [μm]	SCI_{600} [μm]	SCI_{900} [μm]	BDI [μm]	BCI [μm]	$R600$ [μm]	$R900$ [μm]	$R1200$ [μm]	d_{1500} [μm]	d_{1800} [μm]
4000	2500	250	33.48	35.7	56.2	69.4	20.5	13.2	90.7	60.8	44.1	45	38.9
4000	2500	200	33.74	36.2	58	72.7	21.8	14.7	117.5	78.7	57.1	55.3	48
4000	2500	150	34.09	31.2	54.5	71.2	23.3	16.7	176.7	115.5	82.3	72	62.9
4000	2500	100	34.61	27.2	49.9	70.9	22.7	21	320.0	194.8	139.5	103.7	91.6
4000	1500	250	50.19	39.6	63.4	79.7	23.8	16.3	94.7	60.5	43.4	45.8	39.4
4000	1500	200	50.9	40.2	66.6	83.8	26.4	17.2	119.5	78.2	56.1	56.4	48.7
4000	1500	150	51.86	35.3	63.8	83.5	28.5	19.7	177.2	113.5	80.3	73.6	63.9
4000	1500	100	53.24	32	60.1	83.6	28.1	23.5	314.2	194.0	134.2	106.6	93.4
4000	500	250	86.99	42.6	76.5	98.6	33.9	22.1	105.3	62.5	43.6	47.8	40.6
4000	500	200	88.87	43.6	79.9	104.6	36.3	24.7	134.9	80.3	55.9	58.8	50.2
4000	500	150	91.46	44.9	84.5	113	39.6	28.5	187.1	111.5	77.4	76.9	65.9
4000	500	100	95.34	38.4	84.6	117.4	46.2	32.8	311.1	185.7	126.7	112.1	96.8
2000	5000	250	9.788	68.2	89.7	102.8	21.5	13.1	71.4	51.7	39.3	45.4	39.2
2000	5000	200	9.146	68.6	91.3	105.9	22.7	14.6	91.9	66.6	50.5	55.8	48.4
2000	5000	150	8.351	66.3	90.5	107	24.2	16.5	129.9	94.0	71.1	72.6	63.4
2000	5000	100	7.284	60.5	83.4	104.2	22.9	20.8	224.4	155.7	118.8	104.5	92.3
2000	3500	250	19.44	70.8	94.7	109	23.9	14.3	73.1	52.1	39.2	45.8	39.4
2000	3500	200	18.91	71.3	96.6	112.6	25.3	16	94.1	67.1	50.6	56.4	48.7
2000	3500	150	18.26	69.1	96.3	114.5	27.2	18.2	132.7	94.5	71.0	73.5	63.9
2000	3500	100	17.4	63.8	89.8	112.7	26	22.9	227.6	155.7	117.9	106.1	93.3
2000	2500	250	31.57	73.8	99.4	115.9	25.6	16.5	76.3	52.4	39.2	46.2	39.7
2000	2500	200	31.23	74.5	102.8	120.1	28.3	17.3	95.7	67.5	50.4	56.9	49.1
2000	2500	150	30.83	72.3	102.8	122.7	30.5	19.9	135.1	94.9	70.6	74.3	64.4
2000	2500	100	30.34	67.8	97	120.8	29.2	23.8	230.4	158.8	116.7	107.6	94.2
2000	1500	250	55.59	79.3	109.6	128.4	30.3	18.8	78.9	52.9	39.1	46.8	40
2000	1500	200	55.75	77.3	109.7	130.8	32.4	21.1	102.3	68.5	50.4	57.7	49.6
2000	1500	150	56	68.1	104.7	127.6	36.6	22.9	145.7	98.5	71.8	75.5	65.2
2000	1500	100	56.45	69.8	110.4	138.2	40.6	27.8	234.0	157.8	114.9	109.9	95.6
2000	500	250	122	89.6	135.6	161	46	25.4	87.0	54.7	39.4	48.5	41.1
2000	500	200	123.9	82.6	130	158.6	47.4	28.6	114.4	71.3	51.0	59.8	50.8
2000	500	150	126.6	84.5	136.3	169.7	51.8	33.4	157.4	98.2	70.1	78.3	66.9
2000	500	100	130.7	75.8	134.3	175.3	58.5	41	262.0	160.9	113.3	114.5	98.4

5.2.3 Analisi dei risultati

Per raggiungere gli obiettivi 1 e 2 descritti nel Capitolo 3, l'analisi dei risultati ha visto due fasi di procedimento:

- Stima dei moduli di rigidezza E_{cb} , E_{mc} , E_{sub} dai parametri di deflessione;
- Stima della deformazione di trazione nel lembo inferiore del conglomerato bituminoso ϵ_{cb} dai parametri del bacino di deflessione.

5.2.3.1 Stima dei moduli di rigidezza

Stima del modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso

Tutti i parametri del bacino di deflessione riportati in Tabella 5.6, sono stati messi in relazione con il modulo elastico del conglomerato bituminoso E_{cb} , per trovare una relazione come quella descritta dall'Equazione (5.3). Tra questi, i parametri che si correlano meglio al modulo elastico E_{cb} sono SCI_{300} , SCI_{600} e SCI_{900} . Le Figure 5.6, 5.7 e 5.8 illustrano queste relazioni fornendo un quadro dettagliato.

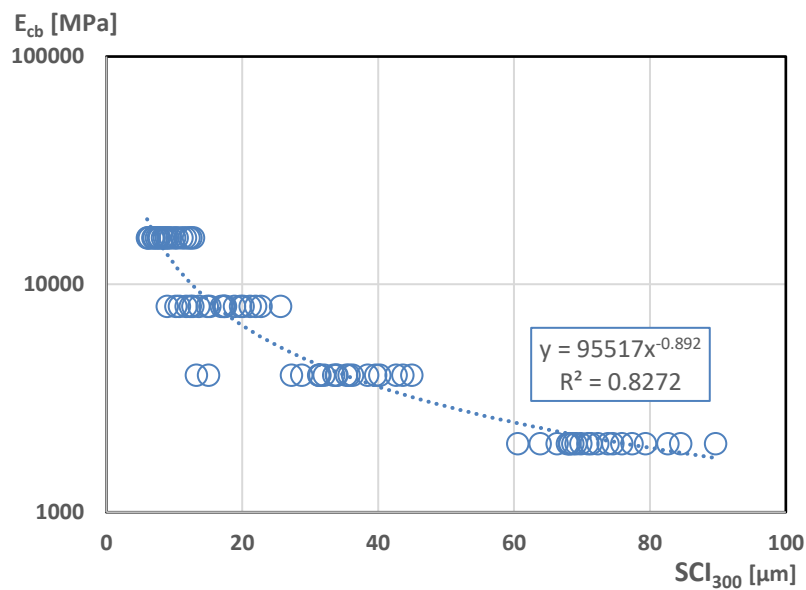


Figura 5.6 Relazione tra E_{cb} e SCI_{300} , pavimentazione semirigida

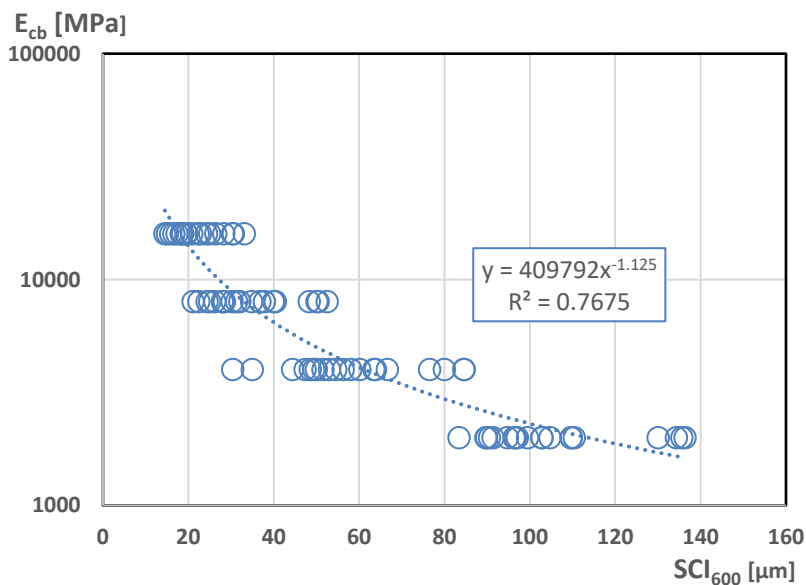


Figura 5.7 Relazione tra E_{cb} e SCI_{600} , pavimentazione semirigida

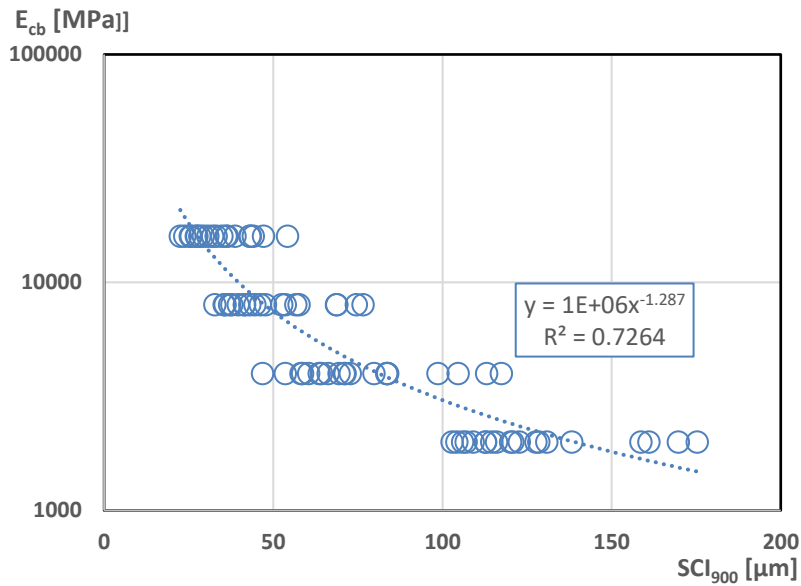


Figura 5.8 Relazione tra E_{cb} e SCI_{900} , pavimentazione semirigida

Il parametro che si relaziona meglio il modulo E_{cb} è lo SCI_{300} . La relazione tra i due parametri è descritta con la seguente equazione:

$$E_{cb} = 95517 \cdot (SCI_{300})^{-0.892} \quad (5.7)$$

Tuttavia, analizzando il grafico in Figura 5.6, la dispersione dei valori dipende anche dal fatto che abbiamo variabilità nella rigidezza dello strato in misto cementato (E_{mc}). A titolo dimostrativo in Figura 5.9 possiamo vedere come fissando la rigidezza E_{mc} , ad esempio a 2500 MPa e a 500 MPa, si ha una migliore correlazione tra i due parametri. Approssimativamente possiamo ritenere valida l'Equazione 5.7 considerando che la rigidezza E_{mc} influenzi poco la correlazione.

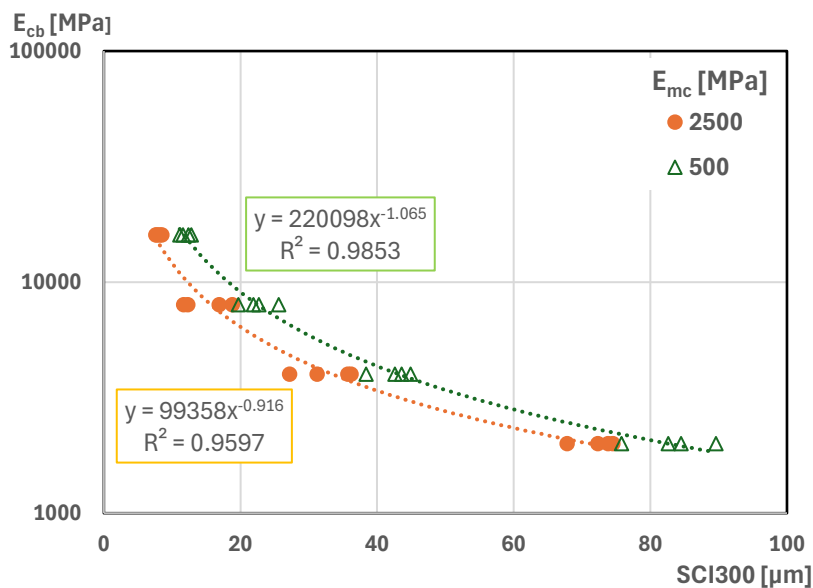


Figura 5.9 Relazione tra E_{cb} e SCI_{300} a fissati valori di E_{mc} , pavimentazione semirigida

Stima del modulo di rigidezza del misto cementato

Tra tutti i parametri del bacino di deflessione analizzati, lo SCI600 mostra la migliore correlazione con il modulo di elasticità dello strato in misto cementato E_{mc} con Equazione (5.8). Come illustrato in Figura 5.10 non è una correlazione univoca, tenendo conto che la dispersione dei valori è data dalla variabilità della rigidezza del conglomerato bituminoso (E_{cb}):

$$E_{mc} = 10083 \cdot (SCI_{600})^{-0.424} \quad (5.8)$$

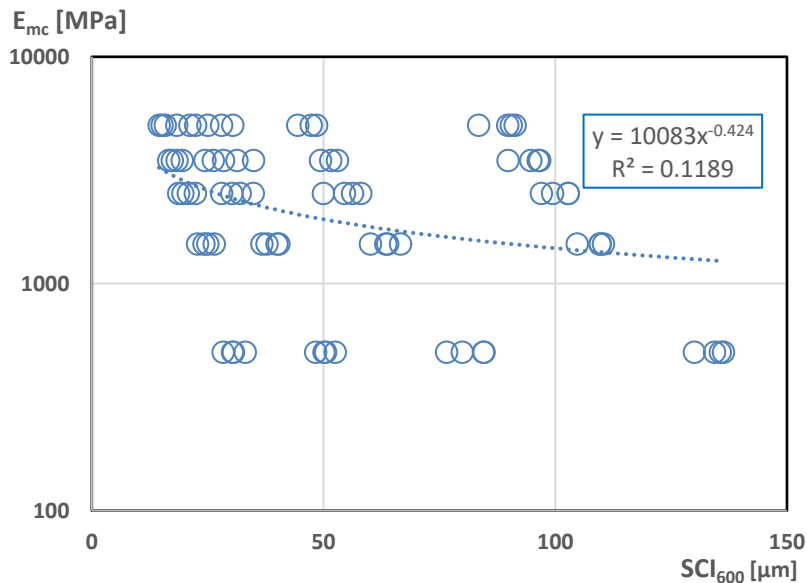


Figura 5.10 Relazione tra E_{mc} e SCI₆₀₀, pavimentazione semirigida

Mantenendo costante il modulo del conglomerato bituminoso, ad esempio, a 2000 MPa e 5000 MPa si ottengono relazioni più precise, come mostrato nelle equazioni in Figura 5.11.

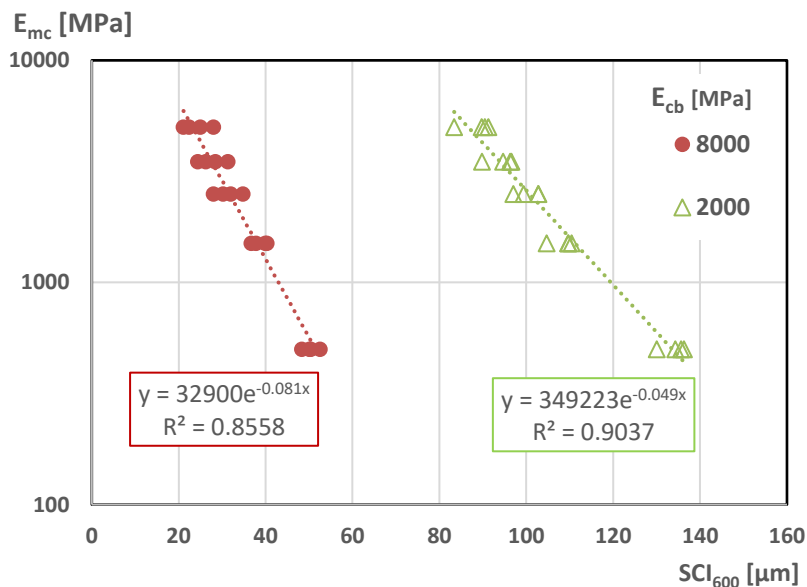


Figura 5.11 Relazione tra E_{mc} e SCI₆₀₀ a fissati valori di E_{cb} , pavimentazione semirigida

Stima del modulo di rigidità del sottofondo

Il parametro del bacino di deformazione che restituisce la migliore relazione per il modulo elastico del sottofondo E_{sub} è d_{1800} , con la seguente equazione:

$$E_{sub} = 12091 \cdot d_{1800}^{-1.062} \quad (5.9)$$

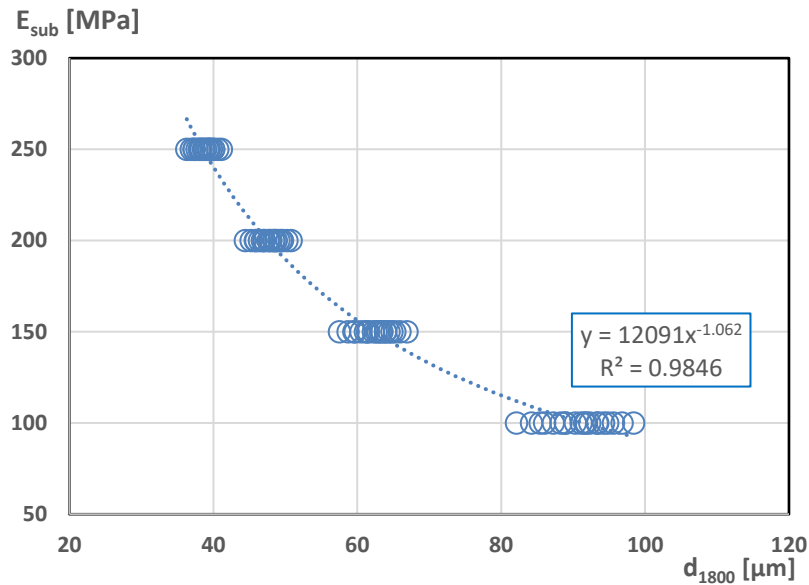


Figura 5.12 Relazione tra E_{sub} e d_{1800} , pavimentazione semirigida

Anche in questo caso, fissando i valori del modulo (E_{cb}), ad esempio a 8000 MPa e 2000 MPa la relazione risulta più precisa, come mostrato in Figura 5.13.

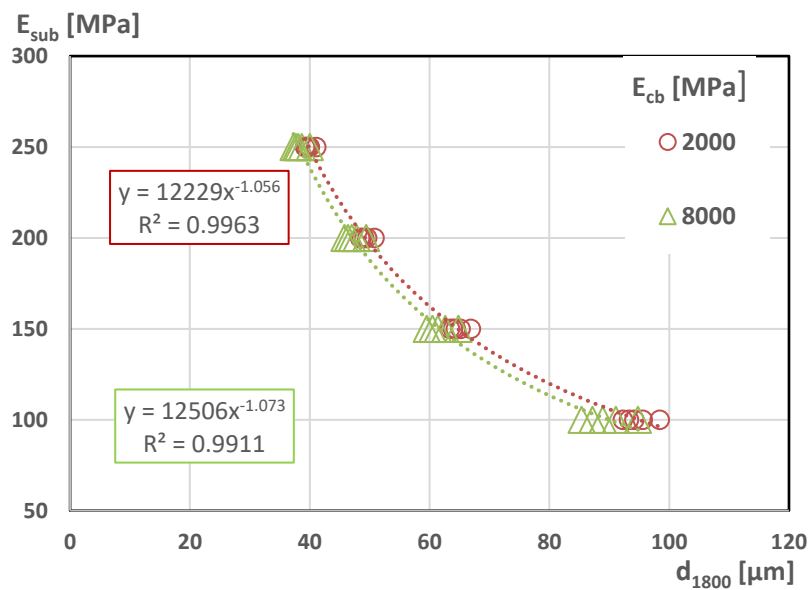


Figura 5.13 Relazione tra E_{sub} e d_{1800} a fissati valori di E_{cb} , pavimentazione semirigida

5.2.3.2 Stima della deformazione a trazione alla base dello strato legato

Dai valori dell'analisi KENPAVE, riportati in Tabella 5.6, è stata esaminata la relazione tra il *Surface Curvature Index* (SCI_{300}) e la deformazione alla base dello stato legato (ε_{cb}), con l'obiettivo di derivare una legge come quella descritta dall'Equazione (5.3). Come evidenziato in Figura 5.14 non esiste una relazione univoca che mette a confronto le coppie di valori. Per approfondire abbiamo confrontato la ε_{cb} con tutti i parametri i parametri del bacino di deflessione. Tra questi, lo SCI_{600} si distingue per fornire una buona stima, come riportato in Figura 5.15.

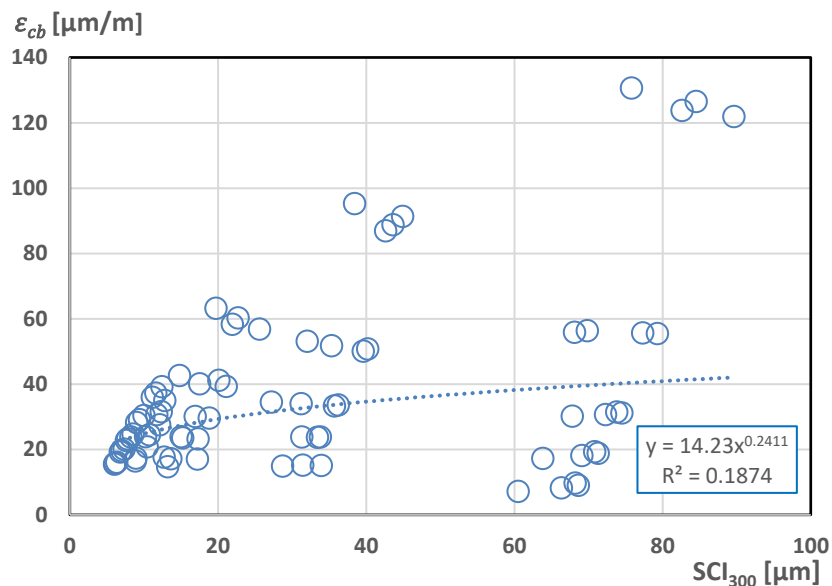


Figura 5.14 Relazione tra ε_{cb} e SCI_{300} , pavimentazione semirigida

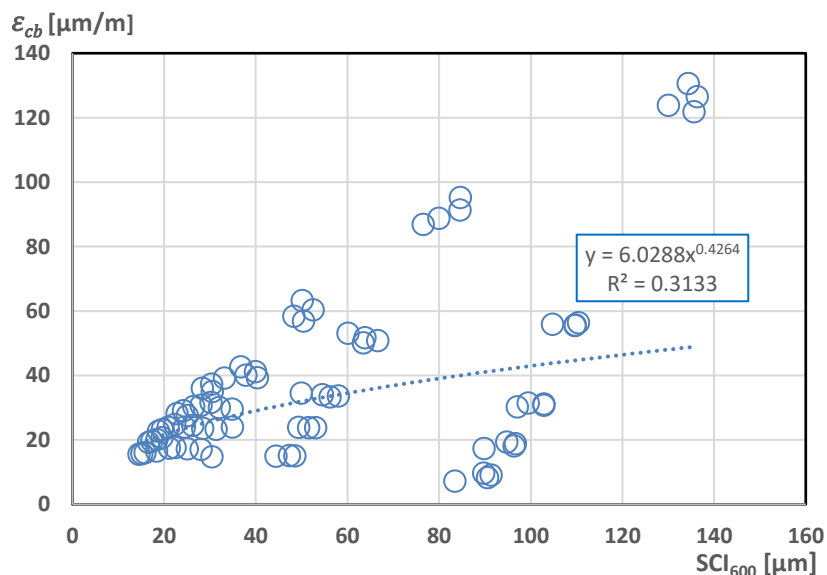


Figura 5.15 Relazione tra ε_{cb} e SCI_{600} , pavimentazione semirigida

Nel grafico di Figura 5.15, la dispersione dei punti è dovuta al fatto che abbiamo variabilità delle rigidità degli strati in misto cementato. Fissando il modulo E_{mc} come illustrato in Figura 5.16, la

relazione non è univoca mentre se confrontiamo i due parametri, mantenendo fissa la rigidezza E_{cb} allora la relazione presenta un significativo miglioramento (Figura 5.17).

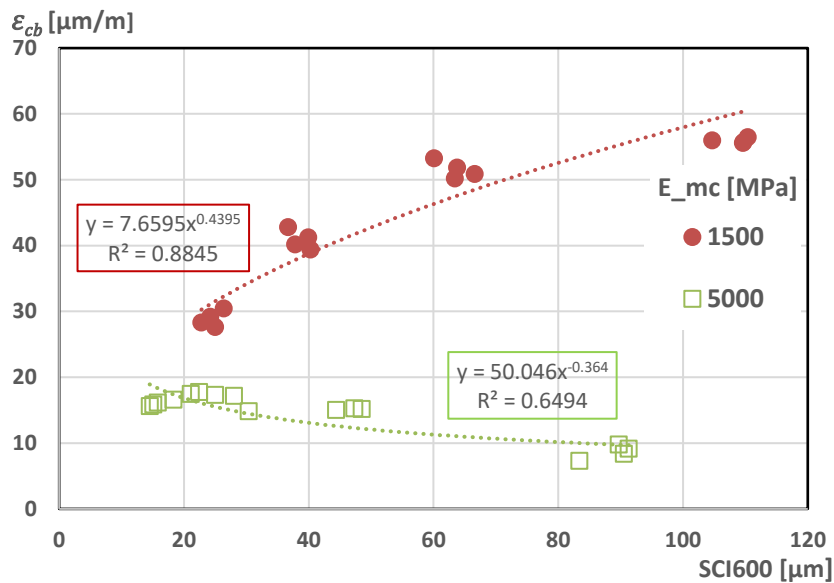


Figura 5.16 Relazione tra ε_{cb} e SCI_{600} a fissati valori di E_{mc} , pavimentazione semirigida

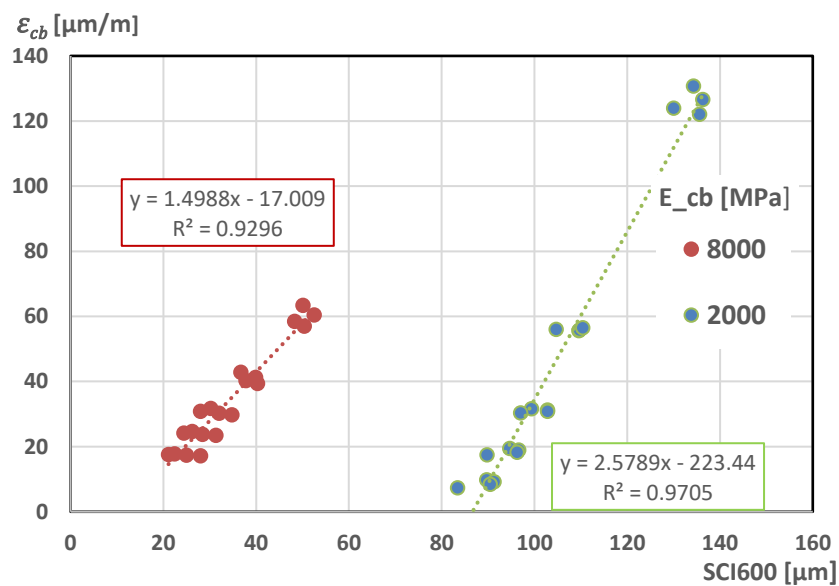


Figura 5.17 Relazione tra ε_{cb} e SCI_{600} a fissati valori di E_{cb}

5.2.4 Analisi di regressione non lineare

La deformazione ε_{cb} , dal paragrafo precedente, può essere stimata a partire dallo SCI_{600} fissando valori del modulo del conglomerato bituminoso (E_{cb}). Si vuole determinare una migliore correlazione della deformazione dai parametri sopracitati attraverso un modello di regressione con la seguente equazione:

$$\varepsilon_{cb} = \alpha(E_{cb}) + \beta(E_{cb}) \cdot SCI_{600} \quad (5.11)$$

vogliamo delle leggi di α e β in relazione ai valori di E_{cb} assunti in input. Dal grafico in Figura 5.17 prendiamo i coefficienti delle relazioni per ogni valore di modulo del conglomerato bituminoso. Questi coefficienti sono riportati in Tabella 5.7.

Tabella 5.7 – Valori numerici dei coefficienti α , β nell'equazione del grafico in Figura 5.17

E_{cb} [MPa]	α	β	R^2
16000	-4.005	1.332	0.96
8000	-17.009	1.499	0.93
4000	-56.055	1.713	0.88
2000	-223.438	2.579	0.97

In Figura 5.18 si illustra la relazione tra il parametro α e il modulo E_{cb} . In particolare, il parametro α è descritto con l'equazione seguente:

$$\alpha = -h_1 \cdot E_{cb}^{h_2} \quad (5.12)$$

Dove:

- $h_1 = 4.57E + 08$;
- $h_2 = -1.913$.

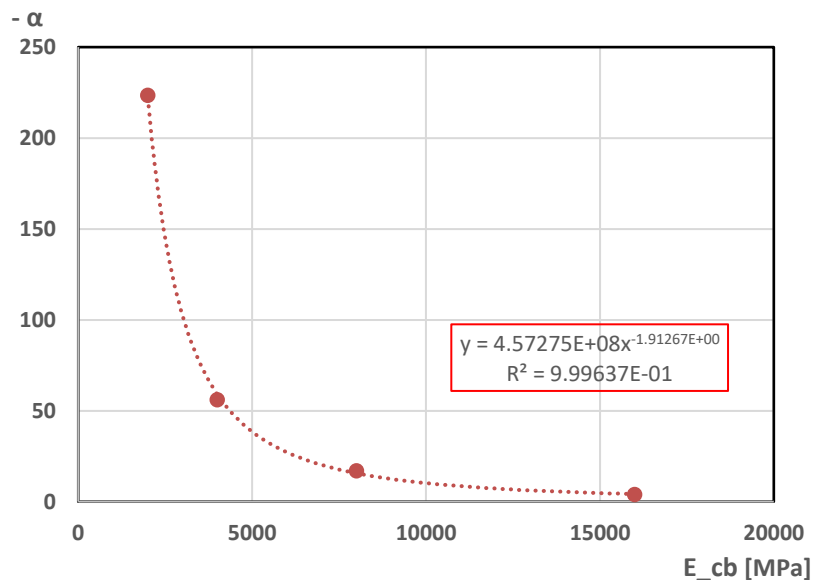


Figura 5.18 Relazione tra α e E_{cb}

In Figura 5.19 si illustra la relazione tra il parametro β e il modulo E_{cb} . In particolare, il parametro β è descritto con l'equazione seguente:

$$\beta = h_3 \cdot E_{cb}^{-1} + h_4 \quad (5.13)$$

Dove:

- $h_3 = 2839.312$;
- $h_4 = 1.116$.

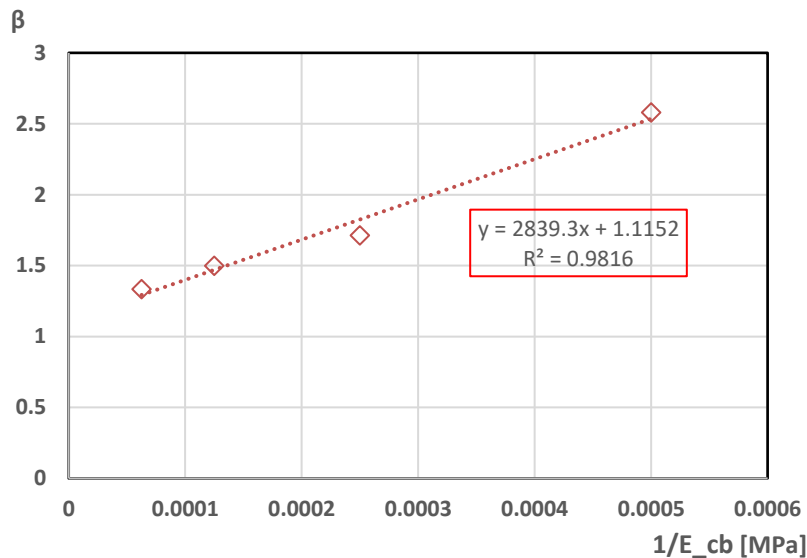


Figura 5.18 Relazione tra α e E_{cb}

L'Equazione (5.11) del modello di regressione per la determinazione ε_{cb} diventa:

$$\varepsilon_{cb} = -(h_1 \cdot E_{cb}^{h_2}) + (h_3 \cdot E_{cb}^{-1} + h_4) \cdot SCI_{600} \quad (5.14)$$

Il modulo E_{cb} , viene espresso come riportato nell'Equazione (5.7).

Con l'Equazione (5.14) si possono stimare i valori di deformazione ε_{cb} a partire dai valori misurati di SCI_{300} e SCI_{600} . Questa relazione è stata confrontata con la deformazione ε_{cb} calcolata con il Kenpave. Il risultato di questo confronto è riportato in Figura 5.19. I valori sono abbastanza dispersi il che è dovuto alle approssimazioni nel metodo di calcolo.

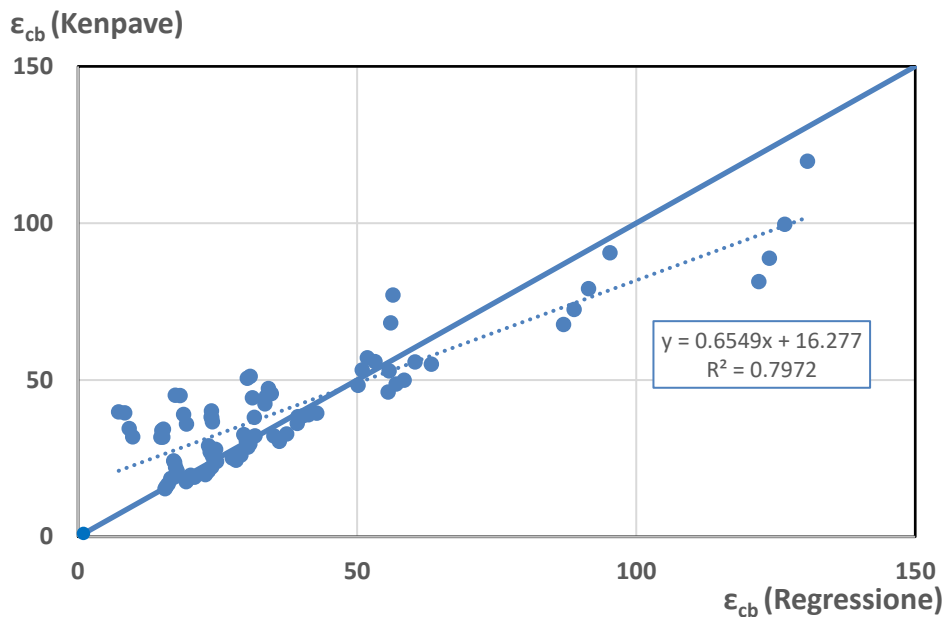


Figura 5.19 Confronto tra la deformazione calcolata con il Kenpave e quella data dalla Regressione

5.2.5 Analisi di regressione lineare multipla

Visti i limiti dell'approccio precedente, ovvero considerando come parametri del bacino di deflessione il SCI_{300} e il SCI_{600} , sviluppiamo un modello di regressione lineare multipla di secondo ordine per determinare una relazione che descrive la deformazione di trazione alla base dello strato legato con i parametri del bacino di deflessione. Le variabili indipendenti considerate in questo modello sono SCI_{300} e SCI_{600} che come illustrato in precedenza ai Paragrafi 5.2.3.1 e 5.2.3.2, approssimano i valori della rigidezza rispettivamente del conglomerato bituminoso e del misto cementato. Nel modello consideriamo anche d_{1800} come variabile indipendente, il quale ci permette di tenere conto anche della rigidezza del sottofondo (E_{sub}). In questo modello consideriamo i termini lineari, quelli quadrati e i termini di interazione. L'equazione di questo modello è:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & b + m_1 \log SCI_{300} + m_2 \log SCI_{600} + m_3 \log d_{1800} \\ & + m_4 (\log SCI_{300})^2 + m_5 (\log SCI_{600})^2 + m_6 \log d_{1800}^2 + \\ & m_7 (\log SCI_{300} \cdot \log SCI_{600}) + m_8 (\log SCI_{300} \cdot \log d_{1800}) + m_9 (\log SCI_{600} \cdot \log d_{1800}) \end{aligned} \quad (5.15)$$

I parametri, determinati ai minimi quadrati, sono riportati in Tabella 5.8.

Tabella 5.8 parametri della Regressione multipla lineare, Equazione (5.15)

b	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	m ₇	m ₈	m ₉
445.836	458.455	-1206.86	181.314	-589.8	455.514	5.126	406.753	108.966	-238.677

Con l'Equazione (5.15) si possono stimare i valori di deformazione ε_{cb} a partire dai valori misurati di SCI_{300} , SCI_{600} e d_{1800} . Tali valori relazione sono stati confrontati con la deformazione ε_{cb} calcolata

con il KENPAVE. Il risultato del confronto è riportato in Figura 5.20. I valori sono meno dispersi rispetto all'analisi di regressione vista nel Paragrafo 5.2.4.

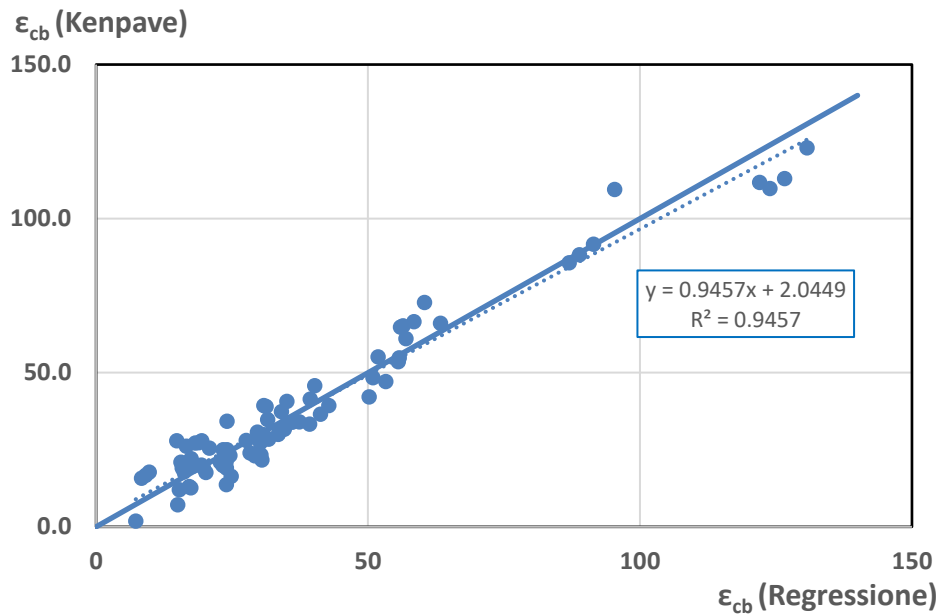


Figura 5.20. Analisi di regressione multipla a nove parametri

Possiamo affermare che questo modello è una soluzione migliore per la stima della deformazione di trazione alla base dello strato legato a partire da misure di deflessione. Tuttavia, può essere semplificata utilizzando un modello di regressione lineare di secondo ordine che considera le stesse variabili indipendenti tralasciando i termini di interazione, con equazione:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & b + m_1 \log SCI_{300} + m_2 \log SCI_{600} + m_3 \log d_{1800} \\ & + m_4 (\log SCI_{300} + m_5 (\log SCI_{600})^2 + m_6 (\log d_{1800})^2 \end{aligned} \quad (5.16)$$

I parametri sono riportati in Tabella 5.9.

Tabella 5.9 Parametri della Regressione multipla lineare semplificata

b	m₁	m₂	m₃	m₄	m₅	m₆
620.783	823.432	-1789.04	246.056	-404.095	669.446	-81.949

Con l'Equazione (5.16) si possono stimare i valori di deformazione ε_{cb} a partire dai valori misurati di SCI_{300} , SCI_{600} e d_{1800} . Questa relazione è stata confrontata con la deformazione ε_{cb} calcolata con il Kenpave. Il risultato di questo confronto è riportato in Figura 5.21.

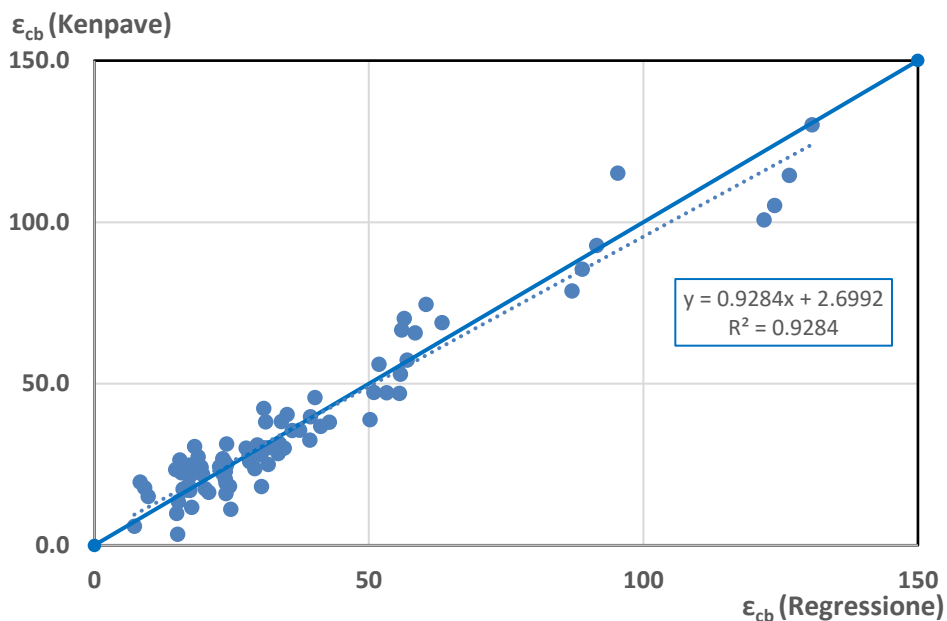


Figura 5.21. Analisi di regressione multipla sei parametri

5.3 Pavimentazione semi-rigida “Autostradale” con usura drenante

5.3.1 Dati input

Si analizza una pavimentazione semi-rigida di tipo “autostradale”, illustrata in Figura 5.22, con la seguente stratigrafia:

- Strato in conglomerato bituminoso (CBD) drenante di spessore 40 mm;
- strato in conglomerato bituminoso chiuso (CB) di spessore 250 mm;
- strato di base legato a cemento o misto cementato (MC) di spessore 250 mm;
- strato di sottofondo.

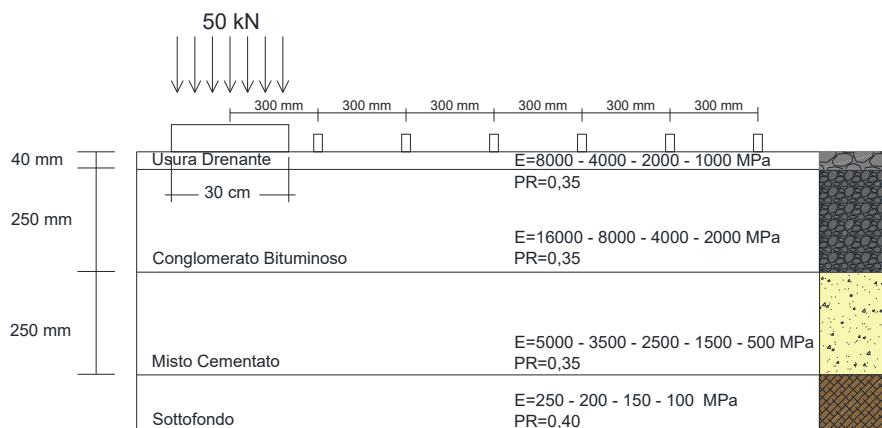


Figura 5.22 Stratigrafia pavimentazione autostradale con usura drenante

I materiali hanno rigidezza variabile, in Tabella 5.9 vengono riportate le proprietà meccaniche di ciascuno strato.

Tabella 5.9 Proprietà e caratteristiche della pavimentazione semi-rigida con usura drenante

Strato	E					PR	Spessore
	[MPa]					[-]	[cm]
Conglomerato bituminoso drenante	8000	4000	2000	1000	-	0.35	4
Conglomerato bituminoso	16000	8000	4000	2000	-	0.35	25
Fondazione in misto cementato	5000	3500	2500	1500	500	0.35	25
Sottofondo	250	200	150	100	-	0.40	Inf.

Per semplicità esecutiva del lavoro si è pensato ad una nomenclatura semplice dei file di analisi, in modo che caratterizzi subito la singola pavimentazione. In Tabella 5.10 si riporta la metodologia utilizzata. In particolare, è stato adottato un codice a doppia cifra, dove la prima identifica il modulo elastico dello strato in conglomerato bituminoso (E_{cb}) e la seconda il modulo elastico dello strato in misto cementato (E_{mc}). Dalla Tabella 5.9 possiamo notare che il modulo del drenante E_{cbd} è la metà di quello del conglomerato bituminoso E_{cb} .

Tabella 5.10 – nomenclatura delle pavimentazioni autostradali con usura chiusa

Pavimentazione	E_{cb} [MPa]	E_{mc} [MPa]
16.50	16000	5000
16.35	16000	3500
16.25	16000	2500
16.15	16000	1500
16.5	16000	500
8.50	8000	5000
8.35	8000	3500
8.25	8000	2500
8.15	8000	1500
8.5	8000	500
4.50	4000	5000
4.35	4000	3500
4.25	4000	2500
4.15	4000	1500
4.5	4000	500
2.50	2000	5000
2.35	2000	3500
2.25	2000	2500
2.15	2000	1500
2.5	2000	500

Inoltre, per tenere conto della variabilità della rigidezza del sottofondo E_{sub} , il software KENPAVE ci permette di inserire più valori di input attraverso il "DATA SET" come illustrato al Paragrafo 4.1.2,

mantenendo costante in input le caratteristiche geometriche e proprietà meccaniche degli strati, cambiando solamente il modulo elastico dello strato di sottofondo (E_{sub}).

Per tutti i file avremo dunque quattro “DATA SET”, nello specifico:

- Data Set 1, $E_{sub} = 250$ MPa;
- Data Set 2, $E_{sub} = 200$ MPa;
- Data Set 3, $E_{sub} = 150$ MPa;
- Data Set 4, $E_{sub} = 100$ MPa.

Il carico FWD che agisce sulla pavimentazione è stato modellato nel software come un carico circolare di 50 kN di diametro 30 cm e si sono considerati 6 geofoni posizionati ogni 30 cm a partire dalla piastra di carico. In ultimo, sono stati inserite le coordinate dei punti di risposta da analizzare. In particolare, sono state inserite le coordinate della piastra di carico e dei geofoni riferite alla quota $Z = 0$ m e alla quota del lembo inferiore dello strato legato pari a $Z = 0,29$ m.

5.3.2 Risultati

Il KENPAVE restituisce in output file di testo con le risposte tenso-deformative dei punti inseriti in input (Figura 4.15). Per facilitare la consultazione dei dati, queste informazioni sono state trasferite in fogli Excel, come illustrato in Figura 5.5. In particolare, i fogli riportano rispettivamente le seguenti informazioni riferite ai punti di analisi:

- Coordinate;
- Spostamento verticale;
- Tensioni e deformazioni (verticali, radiali, tangenziali e di taglio).

Tra tutte le risposte, quelle di maggiore interesse in questa analisi è lo spostamento verticale, utile per calcolare il valore di SCI_{300} e il valore di deformazione alla base dello strato legato ϵ_{cb} sotto la verticale della piastra di carico.

COORDINATE		VERTICAL DISPLACEMENT [cm]	STRESS				STRAIN			
RADIAL [cm]	VERTICAL [cm]		VERTICAL [kPa]	RADIAL [kPa]	TANGENTIAL [kPa]	SHEAR [kPa]	VERTICAL [-]	RADIAL [-]	TANGENTIAL [-]	SHEAR [-]
0	0	0.0072	707.714	253.45	253.454	0	-1.41E-06	1.33E-05	1.33E-05	0.00E+00
30	0	0.00665	0	144.39	154.172	0	-4.35E-06	8.25E-06	9.90E-06	-8.42E-13
60	0	0.00588	0	71.878	85.024	0	-3.80E-06	4.19E-06	6.41E-06	4.07E-13
90	0	0.00514	0	39.892	49.706	0	-2.55E-06	2.33E-06	3.99E-06	2.74E-13
120	0	0.00456	0	23.79	36.471	0	-1.78E-06	1.08E-06	3.22E-06	7.06E-15
150	0	0.00403	0	15.179	24.924	0	-1.20E-06	6.14E-07	2.26E-06	-1.83E-13
180	0	0.00358	0	10.175	17.618	0	-8.33E-07	3.67E-07	1.62E-06	2.19E-13
0	29	0.0073	114.135	-272.7	-272.675	0	1.91E-05	-1.36E-05	-1.36E-05	0.00E+00
30	29	0.00668	28.005	-49.98	-129.651	49.74	5.68E-06	-9.00E-07	-7.62E-06	8.39E-06
60	29	0.00583	5.101	-2.679	-55.747	26.35	1.60E-06	9.41E-07	-3.54E-06	4.45E-06
90	29	0.00506	2.879	5.238	-29.927	14.54	7.20E-07	9.19E-07	-2.05E-06	2.45E-06
120	29	0.00438	1.933	9.01	-17.108	8.432	2.98E-07	8.95E-07	-1.31E-06	1.42E-06
150	29	0.00379	1.303	10.354	-9.894	4.971	7.14E-08	8.35E-07	-8.73E-07	8.39E-07
180	29	0.00328	0.869	10.297	-5.623	2.905	-4.80E-08	7.48E-07	-5.96E-07	4.90E-07

Figura 5.23 Esempio di risposte della pavimentazione semi-rigida con usura drenante

Dalle misure di deflessione, si sono ricavati indicatori del bacino di deflessione gli stessi elencati al Paragrafo 5.3.2. Per ogni file, dunque per ogni pavimentazione indagata, avremo i valori dei suddetti parametri, i quali sono riportati in Tabella 5.11.

Tabella 5.11 Sinottico dei parametri ricavati dall'analisi per pavimentazioni autostradali con usura drenante

E_{cbd} [MPa]	E_{cb} [MPa]	E_{mc} [MPa]	E_{sub} [MPa]	ϵ_{cb} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	SCI_{300} [μm]	SCI_{600} [μm]	SCI_{900} [μm]	BDI [μm]	BCI [μm]	R600 [μm]	R900 [μm]	R1200 [μm]	d_{1500} [μm]	d_{1800} [μm]
8000	16000	5000	250	13.57	5.5	13.2	20.6	7.7	7.4	160.36	89.83	62.18	40.3	35.8
8000	16000	5000	200	13.82	5.6	13.7	21.6	8.1	7.9	210.48	118.30	78.76	48.9	43.7
8000	16000	5000	150	14.14	8.1	14.4	23	6.3	8.6	297.87	167.78	111.04	62.7	56.5
8000	16000	5000	100	14.58	7.8	16.3	24.6	8.5	8.3	452.66	278.02	183.20	87.2	80.4
8000	16000	3500	250	16.73	6.2	15	23.3	8.8	8.3	157.75	87.89	60.69	41.2	36.4
8000	16000	3500	200	17.08	6.3	15.6	24.6	9.3	9	206.78	114.94	79.29	50.1	44.6
8000	16000	3500	150	17.53	6.5	16.4	26.3	9.9	9.9	293.75	163.09	107.91	64.4	57.7
8000	16000	3500	100	18.17	9.2	19	28.5	9.8	9.5	436.91	268.15	176.66	91	82.5
8000	16000	2500	250	19.6	6.7	16.6	25.8	9.9	9.2	156.68	86.39	59.32	41.9	36.9
8000	16000	2500	200	20.06	7	17.4	27.4	10.4	10	204.46	112.78	77.43	51.2	45.3
8000	16000	2500	150	20.66	7.3	18.4	29.5	11.1	11.1	289.36	159.26	108.84	65.9	58.8
8000	16000	2500	100	21.5	10.4	19.6	32.2	9.2	12.6	477.05	261.64	171.77	93.5	84.3
8000	16000	1500	250	23.51	7.7	19	28.8	11.3	9.8	155.68	87.91	57.96	42.9	37.5
8000	16000	1500	200	24.14	7.9	19.9	31.4	12	11.5	203.53	110.58	75.38	52.5	46.1
8000	16000	1500	150	24.95	8.2	21.2	33.9	13	12.7	286.37	156.37	106.17	67.9	60.1
8000	16000	1500	100	26.12	12.1	22.8	37.5	10.7	14.7	470.39	254.97	166.04	96.7	86.6
8000	16000	500	250	29.49	9.1	23	35	13.9	12	158.66	87.51	57.21	44.9	38.8
8000	16000	500	200	30.33	9.4	24.2	37.3	14.8	13.1	205.24	113.40	73.96	54.9	47.7
8000	16000	500	150	31.47	9.9	25.8	41.5	15.9	15.7	287.59	153.18	103.32	71	62.2
8000	16000	500	100	33.15	10.5	28.1	46.3	17.6	18.2	466.06	248.17	166.26	101.6	90
4000	8000	5000	250	15.03	17.8	27.9	36.8	10.1	8.9	104.01	67.80	50.32	41.8	36.8
4000	8000	5000	200	15.03	17.8	27.9	36.8	10.1	8.9	104.01	67.80	50.32	41.8	36.8
4000	8000	5000	150	15.42	8.5	19.7	30.4	11.2	10.7	266.54	152.87	103.05	65.6	58.6

E_{cbd} [MPa]	E_{cb} [MPa]	E_{mc} [MPa]	E_{sub} [MPa]	ε_{cb} [μm/m]	SCI₃₀₀ [μm]	SCI₆₀₀ [μm]	SCI₉₀₀ [μm]	BDI [μm]	BCI [μm]	R600 [μm]	R900 [μm]	R1200 [μm]	d₁₅₀₀ [μm]	d₁₈₀₀ [μm]
4000	8000	5000	100	15.74	12	22.8	33	10.8	10.2	395.05	250.36	168.41	92.8	83.9
4000	8000	3500	250	20.33	19.2	30.7	40.7	11.5	10	105.27	67.47	49.61	42.6	37.3
4000	8000	3500	200	20.64	14.9	27.1	38	12.2	10.9	153.97	94.61	67.90	52	45.9
4000	8000	3500	150	21.05	9.7	22.6	34.8	12.9	12.2	260.99	148.37	102.90	67.1	59.6
4000	8000	3500	100	21.63	13.9	24.1	38.1	10.2	14	428.09	242.09	162.04	95.4	85.8
4000	8000	2500	250	25.64	20.5	33.5	44	13	10.5	106.84	69.06	48.96	43.3	37.8
4000	8000	2500	200	26.12	16.3	30.1	42.4	13.8	12.3	153.99	93.00	66.63	53	46.5
4000	8000	2500	150	26.75	10.8	25.6	39.3	14.8	13.7	256.45	144.72	100.37	68.6	60.6
4000	8000	2500	100	27.64	11.2	27.4	43.3	16.2	15.9	420.96	235.87	157.51	97.9	87.5
4000	8000	1500	250	33.69	20.6	37.9	50.1	17.3	12.2	109.00	68.84	48.43	44.3	38.4
4000	8000	1500	200	34.46	18.2	34.7	48.1	16.5	13.4	154.98	94.74	65.28	54.3	47.3
4000	8000	1500	150	35.48	12.6	30.3	46.5	17.7	16.2	252.61	140.25	96.86	70.5	61.9
4000	8000	1500	100	36.93	13.3	32.9	51.8	19.6	18.9	410.90	227.83	156.27	101.3	89.8
4000	8000	500	250	48	19.2	41.9	57.6	22.7	15.7	123.71	72.97	49.46	46.3	39.7
4000	8000	500	200	49.29	19.6	43.7	61.1	24.1	17.4	160.26	94.37	63.89	56.9	48.9
4000	8000	500	150	51.05	16	39.6	59.4	23.6	19.8	251.80	140.80	93.00	74	64.1
4000	8000	500	100	53.67	17.1	43.4	68.5	26.3	25.1	406.54	218.96	149.11	106.9	93.5
2000	4000	5000	250	13.49	41.8	57.3	67.5	15.5	10.2	75.87	54.87	41.68	43.4	37.9
2000	4000	5000	200	13.42	37.9	51.8	63.7	13.9	11.9	105.28	73.14	55.99	53	46.6
2000	4000	5000	150	13.35	38.2	53.1	66.3	14.9	13.2	147.76	102.95	78.71	68.6	60.7
2000	4000	5000	100	13.28	13.1	29.4	44.6	16.3	15.2	388.73	227.86	154.74	97.7	87.5
2000	4000	3500	250	20.87	43.5	60.9	72.2	17.4	11.3	78.06	55.46	41.70	44	38.2
2000	4000	3500	200	20.96	37.3	55.5	67.9	18.2	12.4	108.00	75.43	55.90	53.9	47.1
2000	4000	3500	150	21.1	40.2	57.2	72	17	14.8	151.22	103.36	78.27	69.8	61.5
2000	4000	3500	100	21.32	14.7	33.2	50.4	18.5	17.2	382.84	222.00	155.27	99.9	89
2000	4000	2500	250	29.08	38.6	58.1	70.6	19.5	12.5	85.19	58.36	43.02	44.5	38.6
2000	4000	2500	200	29.39	39.1	59.6	73.4	20.5	13.8	110.35	75.67	55.68	54.6	47.6
2000	4000	2500	150	29.8	35.4	54.6	71.2	19.2	16.6	167.32	109.05	81.02	71	62.2
2000	4000	2500	100	30.4	36.2	57.3	76.7	21.1	19.4	272.27	177.15	130.94	101.9	90.4
2000	4000	1500	250	43.17	41.6	64.7	79.1	23.1	14.4	88.07	58.94	42.71	45.4	39.1
2000	4000	1500	200	43.89	42.1	66.7	82.7	24.6	16	113.81	76.22	55.21	55.8	48.3
2000	4000	1500	150	44.85	35.8	62.2	80.5	26.4	18.3	170.93	111.59	79.73	72.7	63.3
2000	4000	1500	100	46.25	31.1	56.8	80	25.7	23.2	308.68	187.58	134.62	105	92.3
2000	4000	500	250	73.5	48.2	79	99.5	30.8	20.5	98.41	60.59	42.84	47.4	40.3
2000	4000	500	200	75.23	41.9	74.7	97.5	32.8	22.8	133.05	80.51	56.25	58.2	49.8
2000	4000	500	150	77.61	43	80	104.7	37	24.7	179.44	111.86	77.93	76	65.4
2000	4000	500	100	81.19	35.4	76.5	106.5	41.1	30	312.99	188.15	128.81	110.5	95.8
1000	2000	5000	250	8.629	81.5	103.2	115.8	21.7	12.6	65.12	48.32	37.29	44.9	38.9
1000	2000	5000	200	8.105	81.9	104.7	118.6	22.8	13.9	83.00	61.90	47.95	55.1	48
1000	2000	5000	150	7.459	82.5	106.6	123.4	24.1	16.8	114.22	83.81	66.33	71.6	62.8
1000	2000	5000	100	6.602	83.1	105.3	124.8	22.2	19.5	184.93	135.96	107.09	102.9	91.2
1000	2000	3500	250	17.06	83.6	107.5	121.2	23.9	13.7	67.05	49.00	37.51	45.4	39.2
1000	2000	3500	200	16.66	84.1	109.2	124.4	25.1	15.2	85.56	62.78	48.16	55.8	48.4
1000	2000	3500	150	16.17	84.7	111.5	128.7	26.8	17.2	117.73	86.82	66.78	72.6	63.4

E_{cbd} [MPa]	E_{cb} [MPa]	E_{mc} [MPa]	E_{sub} [MPa]	ϵ_{cb} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	SCI_{300} [μm]	SCI_{600} [μm]	SCI_{900} [μm]	BDI [μm]	BCI [μm]	R600 [μm]	R900 [μm]	R1200 [μm]	d_{1500} [μm]	d_{1800} [μm]
1000	2000	3500	100	15.54	85.9	110.8	132.3	24.9	21.5	190.50	137.75	107.60	104.5	92.2
1000	2000	2500	250	27.55	85.9	112.2	127	26.3	14.8	68.88	49.64	37.72	45.8	39.4
1000	2000	2500	200	27.34	86.5	114.3	130.8	27.8	16.5	87.91	63.58	48.34	56.3	48.7
1000	2000	2500	150	27.1	87.3	117	135.8	29.7	18.8	121.08	87.93	66.92	73.4	63.9
1000	2000	2500	100	26.85	75.6	103.5	127.3	27.9	23.8	210.68	146.34	112.19	106.1	93.2
1000	2000	1500	250	48.05	90.2	119.7	137.7	29.5	18	73.65	50.59	37.92	46.4	39.8
1000	2000	1500	200	48.31	90.9	123.5	142.4	32.6	18.9	91.80	64.72	48.57	57.2	49.2
1000	2000	1500	150	48.71	87.9	123	144.6	35.1	21.6	128.45	90.62	67.72	74.7	64.7
1000	2000	1500	100	49.36	76	114.6	140.6	38.6	26	218.09	151.12	111.50	108.5	94.7
1000	2000	500	250	103.5	101.6	143.1	167.2	41.5	24.1	82.32	53.09	38.63	48.2	40.9
1000	2000	500	200	105.3	98.7	143	170.1	44.3	27.1	105.57	68.09	49.45	59.4	50.6
1000	2000	500	150	107.9	87.1	135.2	166.6	48.1	31.4	151.52	96.48	69.50	77.7	66.4
1000	2000	500	100	111.9	89.5	145.6	181.5	56.1	35.9	233.44	153.30	109.99	113.3	97.6

5.3.3 Analisi Dei Risultati

Per raggiungere gli obiettivi 1 e 2 descritti nel Capitolo 3, l'analisi dei risultati ha visto due fasi di procedimento:

- Stima dei moduli di rigidezza E_{cb} , dai parametri di deflessione;
- Stima della deformazione di trazione nel lembo inferiore del conglomerato bituminoso ϵ_{cb} dai parametri del bacino di deflessione.

5.3.3.1 Stima dei moduli di rigidezza

Stima del modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso

Tutti i parametri del bacino di deflessione riportati in Tabella 5.11, sono stati messi in relazione con il modulo elastico del conglomerato bituminoso E_{cb} . Tra questi, i parametri che correlano meglio con il modulo di rigidezza sono il SCI_{300} (vedi Figura 5.24), SCI_{600} (vedi Figura 5.25) e SCI_{900} (vedi Figura 5.26).

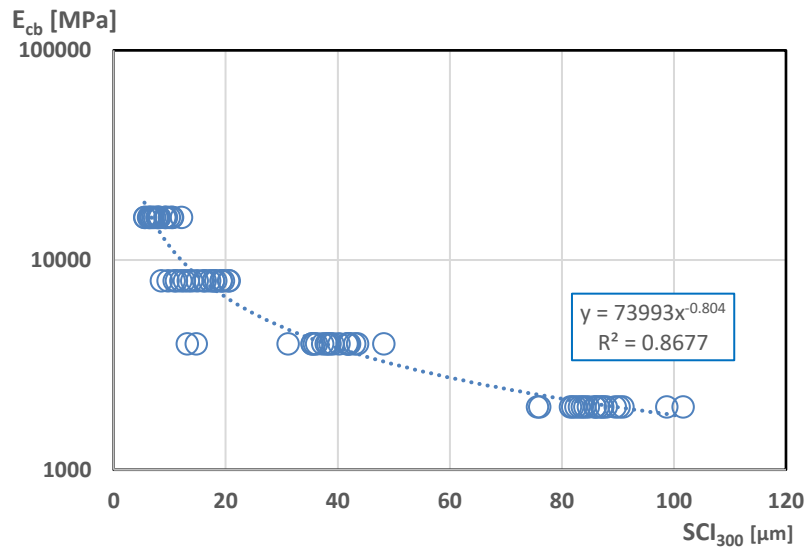


Figura 5.24 Relazione tra E_{cb} e SCI_{300} , pavimentazione semirigida con usura drenante

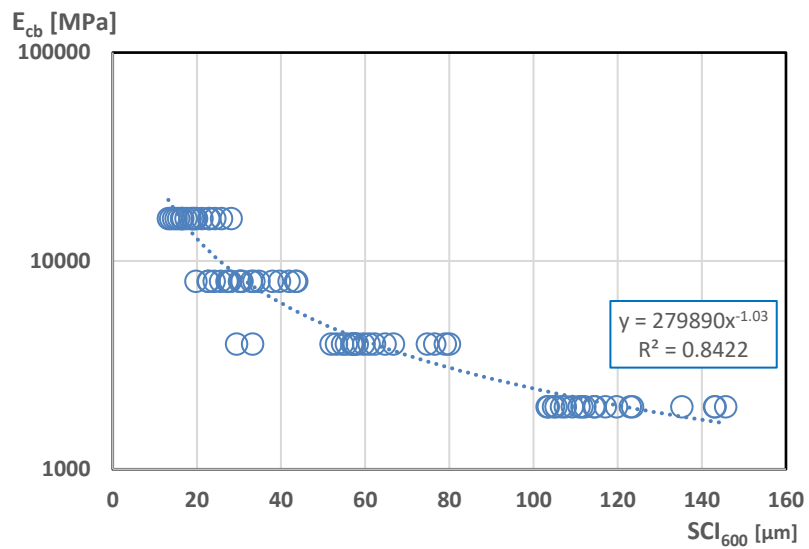


Figura 5.25 Relazione tra E_{cb} e SCI_{600} , pavimentazione semirigida con usura drenante

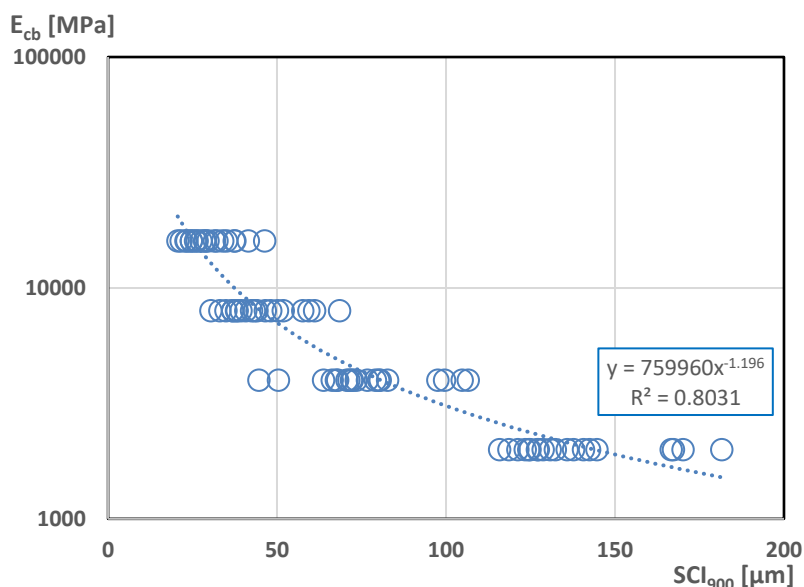


Figura 5.26 Relazione tra E_{cb} e SCI_{900} , pavimentazione semirigida con usura drenante

Il parametro che relaziona meglio il modulo E_{cb} è il SCI_{300} . La relazione tra i due parametri è descritta con la seguente equazione:

$$E_{cb} = 73993 \cdot SCI_{300}^{-0.804} \quad (5.17)$$

Tuttavia, analizzando il grafico in Figura 5.24, la dispersione dei valori dipende dal fatto che abbiamo variabilità nella rigidezza dello strato in misto cementato (E_{mc}). A titolo dimostrativo in Figura 5.27 possiamo vedere come fissando la rigidezza E_{mc} , ad esempio a 2500 MPa e a 500 MPa, si ha una migliore correlazione con il parametro. Approssimativamente possiamo ritenere valida l'Equazione (5.17) considerando che la rigidezza E_{mc} non influenzi la correlazione.

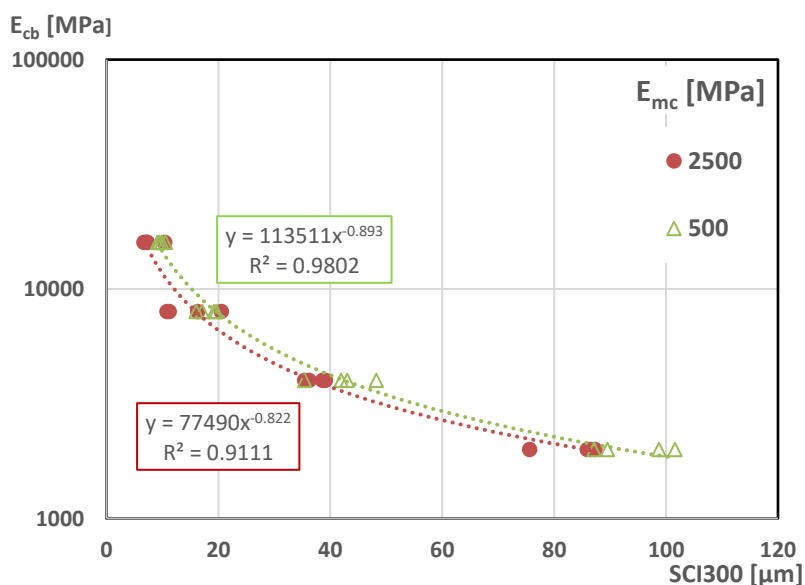


Figura 5.27 Relazione tra E_{cb} e SCI_{900} a fissati valori di E_{mc} , pavimentazione semirigida con usura drenante

5.3.3.2 Stima della deformazione a trazione alla base dello strato legato

Dai valori dell'analisi KENPAVE, riportati in Tabella 5.11, è stata esaminata la relazione il *Surface Curvature Index* (SCI_{300}) e la deformazione alla base dello stato legato (ϵ_{cb}), con l'obiettivo di derivare una legge come quella descritta dall'Equazione (5.3). Questa relazione è migliore se considerato come parametro del bacino di deflessione il SCI_{900} . In Figura 5.28 si riporta il risultato e si evidenzia una dispersione dei valori, rendendo non univoca la relazione

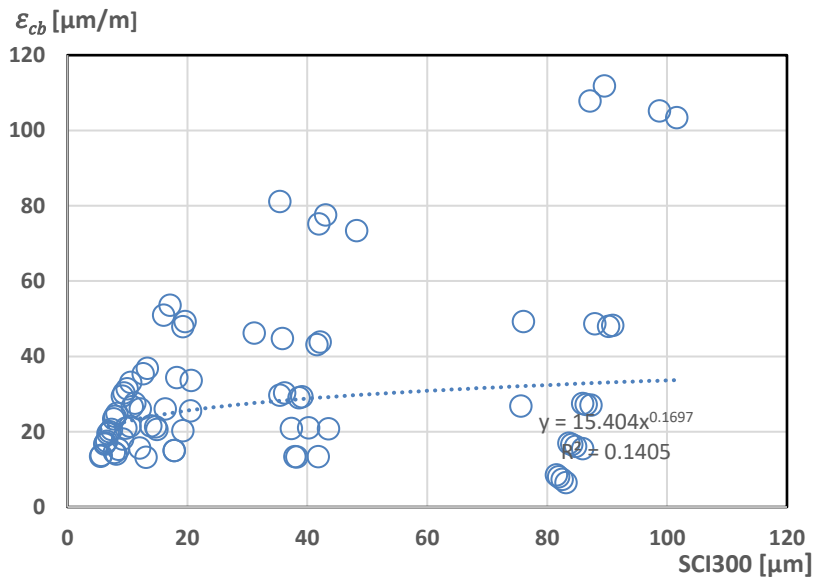


Figura 5.28 Relazione tra E_{cb} e SCI_{300} a fissati valori di E_{mc} , pavimentazione semirigida con usura drenante

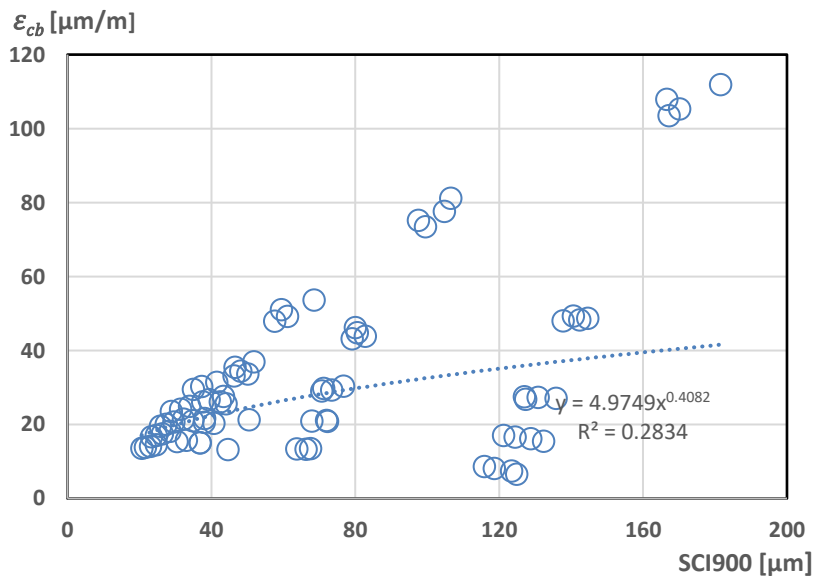


Figura 5.28 Relazione tra E_{cb} e SCI_{900} a fissati valori di E_{mc} , pavimentazione semirigida con usura drenante

Nel grafico di Figura 5.28, la dispersione dei punti è dovuta al fatto che abbiamo variabilità delle rigidezze degli strati. La relazione presenta un significativo miglioramento se fissato il modulo E_{cb} , ad esempio, a valori di 8000 MPa e 2000 MPa come illustrato in Figura 5.29.

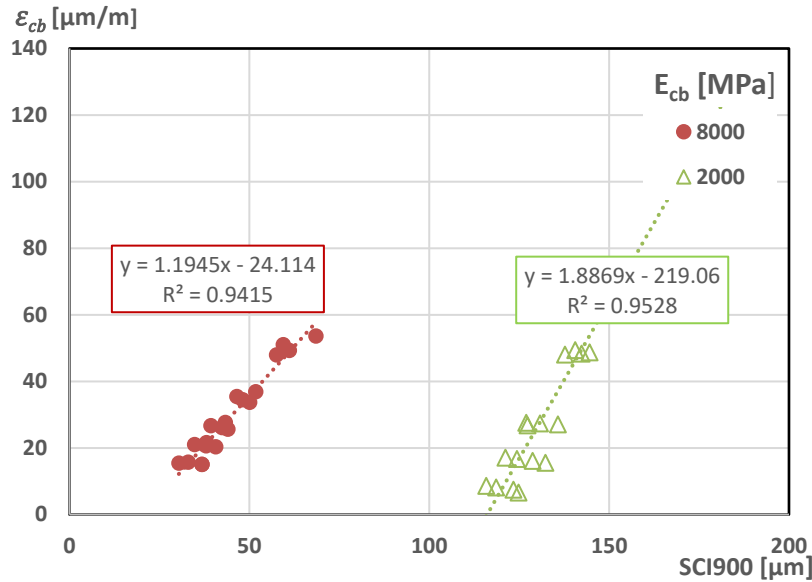


Figura 5.29 Relazione tra ε_{cb} e SCI_{900} a fissati valori di E_{cb} , pavimentazione semirigida con usura drenante

5.3.4 Analisi di regressione lineare multipla

Sviluppiamo un modello di regressione lineare multipla di secondo ordine per determinare una relazione che descrive la deformazione di trazione alla base dello strato legato con i parametri del bacino di deflessione. Le variabili indipendenti considerate in questo modello sono SCI_{300} , SCI_{900} e d_{1800} come variabile indipendente, il quale ci permette di stimare la rigidezza del sottofondo (E_{sub}). In questo modello consideriamo i termini lineari, quelli quadrati e i termini di interazione. L'equazione di questo modello è data dalla seguente relazione:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & b + m_1 \log SCI_{300} + m_2 \log SCI_{900} + m_3 \log d_{1800} \\ & + m_4 (\log SCI_{300})^2 + m_5 (\log SCI_{900})^2 + m_6 (\log d_{1800})^2 + \\ & m_7 (\log SCI_{300} \cdot \log SCI_{900}) + m_8 (\log SCI_{300} \cdot \log d_{1800}) + m_9 (\log SCI_{900} \cdot \log d_{1800}) \end{aligned} \quad (5.18)$$

I parametri sono riportati in Tabella 5.12.

Tabella 5.12 parametri della Regressione multipla lineare Equazione (5.18)

b	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	m ₇	m ₈	m ₉
473.743	304.088	-1115	271.454	-280.811	540.147	3.535	30.245	134.256	-298.51

Con l'Equazione (5.18) si possono stimare i valori di deformazione ε_{cb} a partire dai valori misurati di SCI_{300} , SCI_{900} e d_{1800} . Questa relazione è stata confrontata con la deformazione ε_{cb} calcolata con il Kenpave. Il risultato di questo confronto è riportato in Figura 5.30.

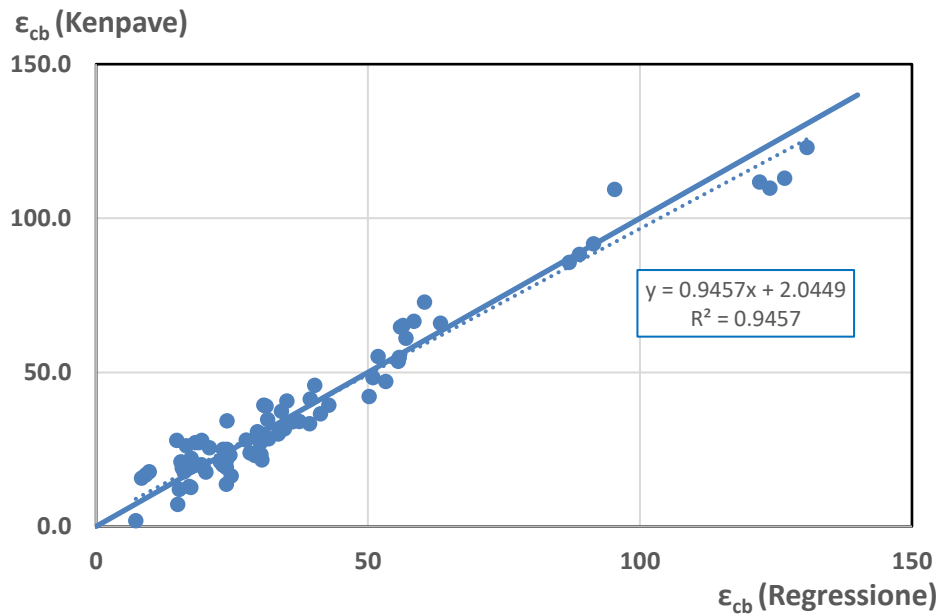


Figura 5.30. Analisi di regressione multipla a nove parametri

Possiamo affermare che questo modello è una buona soluzione per la stima della deformazione di trazione alla base dello strato legato a partire da misure di deflessione.

Capitolo 6

Analisi Viscoelastiche

In questo capitolo sono state studiate pavimentazioni semi-rigide “autostradali” soggette a un carico in movimento che simuli il TSD. Le analisi sono state eseguite con il software 3D-MOVE ANALYSIS in grado di fornire la risposta della pavimentazione alla sollecitazione dinamica prodotta dal carico, considerando il comportamento termo-visco-elastico del conglomerato bituminoso. L’analisi restituisce misure di deflessione con le quali siamo in grado di ricavare parametri del bacino. Data la natura termo-dipendente del conglomerato bituminoso nasce la necessità di correggere i parametri per l’effetto della temperatura. L’obiettivo è proprio quello di cercare una correzione dei parametri del bacino che tenga conto della temperatura del conglomerato bituminoso.

6.1 Pavimentazione Autostradale

6.1.1 Dati in input

In Figura 6.1 sono illustrate le pavimentazioni semi-rigide “Autostradale” analizzate in precedenza ai Capitoli 5.2 e 5.3. A sinistra, la pavimentazione presenta la seguente stratigrafia:

- Strato in conglomerato bituminoso “Dense Graded” (DG) di spessore 25 cm;
- Strato di base legato a cemento o misto cementato (MC) di spessore 25 cm;
- Strato di sottofondo (SUB).

A destra, invece, la pavimentazione ha stratigrafia:

- Strato in conglomerato bituminoso drenante “Open Graded” (OG) di spessore 4 cm;
- Strato in conglomerato bituminoso (DG) di spessore 25 cm;
- Strato di base legato a cemento o misto cementato (MC) di spessore 25 cm;
- Strato di sottofondo (SUB).

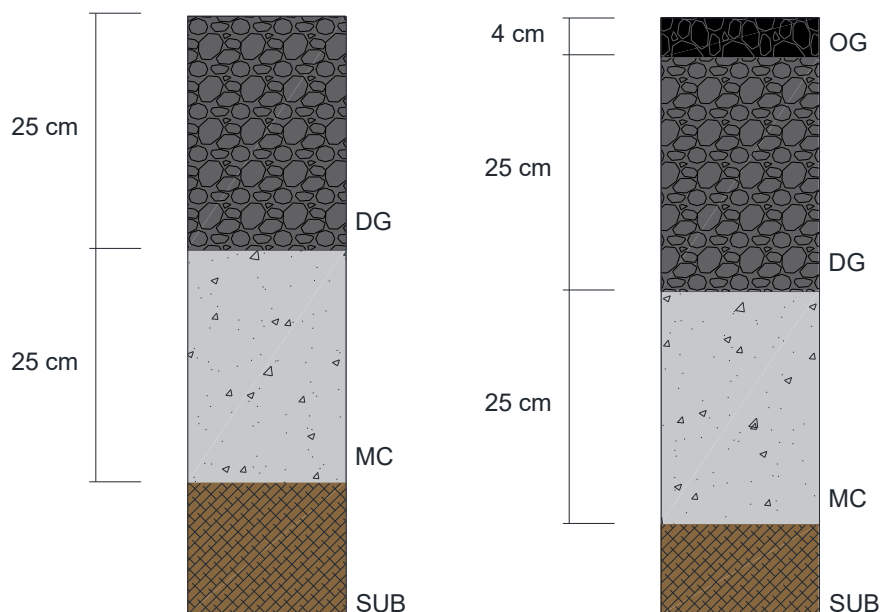


Figura 6.1 Stratigrafia delle pavimentazioni autostradali. A destra, con strato di usura drenante

PROPRIETÀ DEI MATERIALI

Allo strato in misto cementato (MC) e al sottofondo (SUB) sono attribuite proprietà elastiche, mentre al conglomerato bituminoso vengono assegnate proprietà viscoelastiche, considerato il suo comportamento viscoelastico e termo-dipendente. Le caratteristiche meccaniche dei materiali considerate sono riassunte nelle tabelle seguenti.

In particolare, la Tabella 6.1 presenta i moduli elastici (E) e i coefficienti di Poisson (PR) per gli strati MC e SUB e il riepilogo degli spessori. La Tabella 6.2 riporta i moduli elastici dinamici (E^*) presi da prove di laboratorio a diverse temperature e frequenze di applicazione del carico, dello strato in conglomerato bituminoso (DG). In questa tabella sono inclusi anche i valori dell'angolo di fase (δ), che forniscono indicazioni sulla dissipazione di energia e sul comportamento viscoelastico. Infine, la Tabella 6.3 è dedicata alle proprietà meccaniche dello in conglomerato bituminoso (OG).

Tabella 6.1 – Caratteristiche elastiche dei materiali MC e SUB

Strato	E [MPa]					PR [-]	h [cm]
	5000	3500	2500	1500	500		
Misto cementato						0.35	25
Sottofondo						0.40	Inf.

Tabella 6.2 – Caratteristiche viscoelastiche del conglomerato bituminoso DG

f [Hz]	T [°C]	E* [MPa]	δ [°]
10	4	25758	5.4
5	4	24713	5.9
1	4	22115	7.3
0.5	4	20906	8.1
0.1	4	17979	10.4
10	20	16333	12.1
5	20	14942	13.3
1	20	11806	16.4
0.5	20	10559	17.6
0.1	20	7819	21.1
10	40	5989	26.3
5	40	5122	26.5
1	40	3211	28.7
0.5	40	2599	28.7
0.1	40	1476	29.2

Tabella 6.3 – Caratteristiche viscoelastiche del conglomerato bituminoso (OG)

f [Hz]	T [°C]	E* [MPa]	δ [°]
10	4	11380	7.8
5	4	10768	8.3
1	4	9223	10.1
0.5	4	8520	11.1
0.1	4	6946	13.8
10	15	7891	12.6
5	15	7162	13.8
1	15	5579	16.9
0.5	15	4945	18.2
0.1	15	3600	21.8
10	25	5153	18.8
5	25	4542	20.0
1	25	3210	23.6
0.5	25	2745	24.7
0.1	25	1793	27.9
10	35	2998	25.5
5	35	2528	26.4
1	35	1589	29.1
0.5	35	1292	29.6
0.1	35	741	31.0
10	40	2133	28.4
5	40	1734	28.9
1	40	1003	30.4
0.5	40	786	30.2
0.1	40	425	30.3

Vista la variabilità delle rigidezze degli strati in misto cementato, per semplicità esecutiva del lavoro si è pensato ad una nomenclatura semplice dei file di analisi, in modo che caratterizzi subito la singola stratigrafia. In Tabella 6.4 si riporta la metodologia utilizzata. In particolare, è stato adottato un codice alfabetico, dove la prima parte identifica la presenza o meno dello strato drenante OG o DG. La seconda indica il modulo elastico del misto cementato (E_{mc}). È stato utilizzato un codice alfabetico poiché, come spiegato al Paragrafo 4.2.3, nominando numericamente i file nel 3D-MOVE ci producono dei bug.

Tabella 6.4 – Nomenclatura Pavimentazioni

Pavimentazione	E_{mc} [MPa]
DG_A	500
DG_B	1500
DG_C	2500
DG_D	3500
DG_E	5000
OG_A	500
OG_B	1500
OG_C	2500
OG_D	3500
OG_E	5000

Per tener conto della viscoelasticità dei materiali in conglomerato bituminoso, per ogni pavimentazione designata sono state condotte simulazioni a diverse temperature (da 10° a 40°), permettendo di analizzare l'effetto delle variazioni termiche sulla risposta della pavimentazione alle sollecitazioni dinamiche. Ad esempio, la pavimentazione "DG_A" è stata valutata a 10°, 15°, 20° e così via fino a 40°. Con questa metodologia siamo così in grado di avere un database di pavimentazioni più ampio per svolgere una migliore analisi dei risultati.

CARICHI

Le pavimentazioni sono analizzate sotto l'effetto di un carico TSD come mostrato in Figura 6.2, In particolare, il carico è stato simulato con due pneumatici, ciascuno con carico di 25 kN e

impronta di carico circolare sulla pavimentazione, con velocità di marcia pari a 80 km/h, come mostrato in Figura 6.3. La pressione di gonfiaggio del singolo pneumatico è di 850 kPa e la distanza tra i centri delle aree circolari (S_1) è di 35 cm. Questi ultimi valori forniti da ASPI e sono relative allo pneumatico del modello a loro in dotazione.

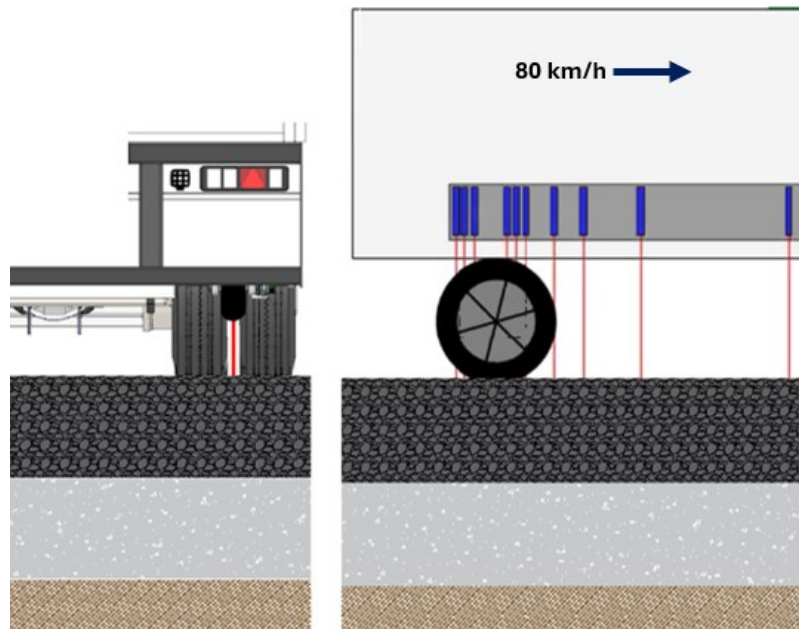


Figura 6.2 Schematizzazione carico TSD

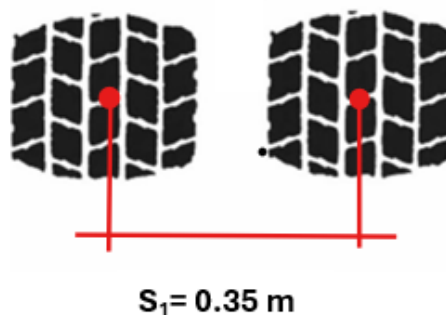


Figura 6.3 – Modellazione carico TSD nelle analisi 3D-MOVE

Questi dati sono stati inseriti, nel 3D-MOVE, nella finestra di input per l'assegnazione del carico. Come mostrato in Figura 6.4 il carico è stato inserito con l'opzione B (descritta nel dettaglio al Paragrafo 4.2.4.2).


Option B : User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)

Reference Title for Axle

Tire Pressure kPa Tire Load kN

Geometry of Loaded Area

Circle Ellipse Rectangle

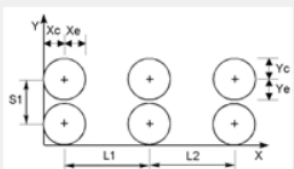


Note:

$$R = \sqrt{\frac{\text{Tire Load}}{\pi \times \text{Tire Pressure}}}$$

Calculated R m

Axle Spacing

L1 m 

L2 m

S1 m

Xc = 0.097 m Yc = 0.097 m
Xe = 0.097 m Ye = 0.097 m

Friction Coefficient

Rolling Friction Coefficient

Bracking Friction Coefficient

Note:
Default for Friction Coefficient is zero.

Note:

1. As many as, six Single Loaded Areas can be specified
2. A Single Tire can be represented by using S1 = L1 = L2 = 0
3. A Single Axle Dual Tire can be represented by L1 = L2 = 0 and S1 ≠ 0
4. A Tandem Axle Dual Tire can be represented by L2 = 0 and S1 ≠ 0, L1 ≠ 0
5. L1 > Xc+Xe, L2 > Xc+Xe, and S1 > Yc+Ye.

Figura 6.4 – Finestra di input per la configurazione del carico TSD nel 3D-MOVE ANALYSIS

6.1.2 Risultati

6.1.2.1 deflessioni superficiali

Con l'analisi 3D-MOVE sono state valutate le deflessioni superficiali indotte dal carico TSD, specificamente in corrispondenza della mezzeria del carico, come mostrato in Figura 6.5. L'output restituito dal programma è espresso in funzione del tempo, il che richiede una trasformazione per ottenere una rappresentazione spaziale necessaria per il calcolo dei parametri del bacino di deflessione.

In Figura 6.6 è illustrata la deflessione superficiale prodotta dal carico TSD nello spazio. Per conoscere il parametro di deflessione $SC/_{300}$, definito dall'Equazione (2.1), è necessario conoscere il valore di deflessione d_0 che non è la deflessione sotto il carico come nel FWD ma è la deflessione a metà del grafico. La deflessione massima d_{MAX} non si verifica esattamente nel punto di applicazione del carico, ma a causa delle proprietà termo e tempo dipendenti del conglomerato bituminoso, presenta con un certo ritardo rispetto al carico. Per trovare d_{300} bisogna spostarsi lungo l'ascissa del grafico a partire da quella di d_0 , di 300 mm. Nel grafico di Figura 6.6 sono rappresentate le coordinate di questi punti.

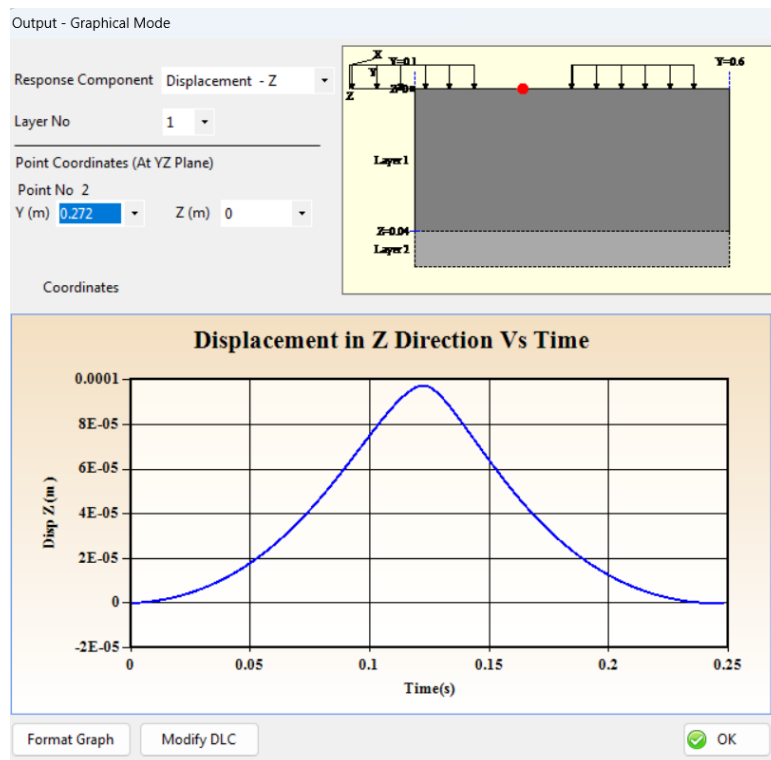


Figura 6.5 – Finestra di output (Graphical Mode) di 3D-MOVE ANALYSIS. Spostamento verticale in funzione del tempo

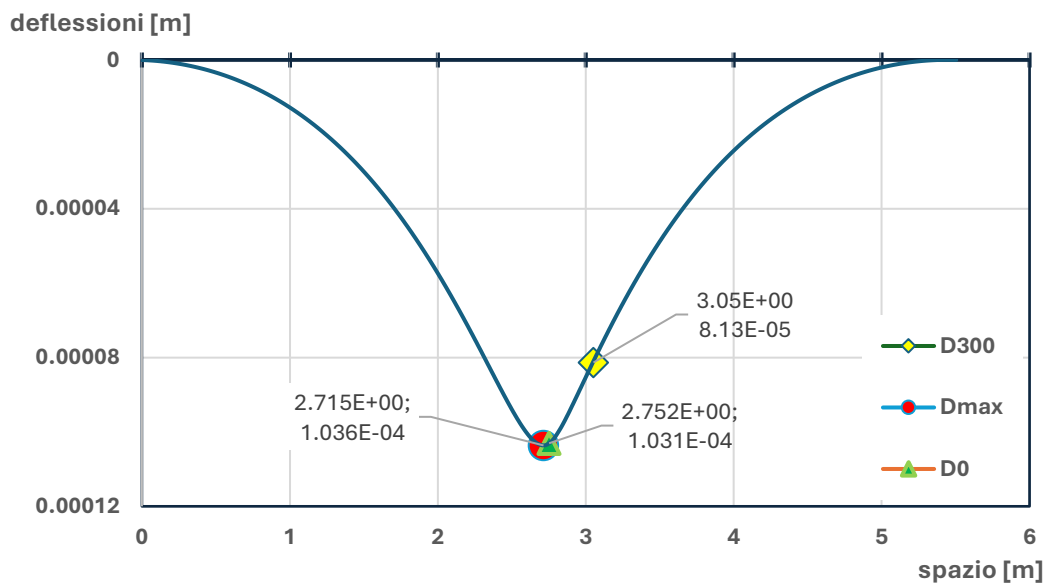


Figura 6.6 – bacino di deflessione TSD

6.1.2.2 deformazione di trazione alla base dello strato legato

I valori di deformazione massima trazione nel lembo inferiore dello strato in conglomerato bituminoso (ε_{cb}), sono stati valutati in diverse ascisse, come mostrato in Figura 6.7, tra il centro di uno dei due pneumatici fino alla mezzeria del carico. Si sono valutate sia le deformazioni in direzione del carico sia in direzione trasversale per valutare la bontà delle analisi 3D-MOVE. Le prime sono sempre risultate maggiori rispetto alle seconde. Tra i punti di risposta indagati quello nella mezzeria del carico forniva sempre il risultato maggiore. Si è scelta la deformazione corrispondente a quel punto specifico.

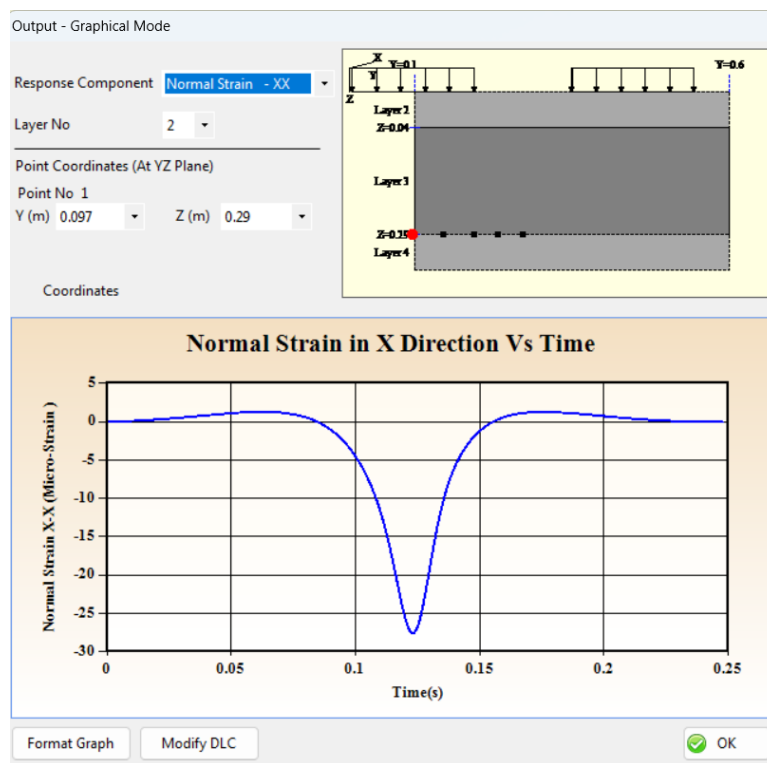


Figura 6.7. Finestra di output (Graphical Mode) di 3D-MOVE ANALYSIS. Deformazione orizzontale in direzione x in funzione del tempo

Per tutte le pavimentazioni si sono ricavati i valori del parametro SCI_{300} . Quest'ultimi sono stati prima normalizzati rispetto allo SCI_{300} della relativa pavimentazione misurata alla temperatura di riferimento di 20° e poi graficati in funzione della temperatura. Nei grafici di Figura 6.8 e 6.9 viene riportato l'andamento dello SCI_{300} in funzione della temperatura rispettivamente per le pavimentazioni DG e OG. Quello che emerge in entrambe le pavimentazioni è l'andamento qualitativo simile dove a basse temperature lo SCI_{300} non risente dell'effetto del misto cementato mentre alle alte temperature si registra una discrepanza dei valori attorno al 15%.

Possiamo comunque trascurare la rigidità del misto cementato considerando la media dei valori di SCI_{300} di ogni temperatura. In Figura 6.10 e 6.11 sono riportati gli andamenti sigmoidali dello SCI_{300} in funzione della temperatura.

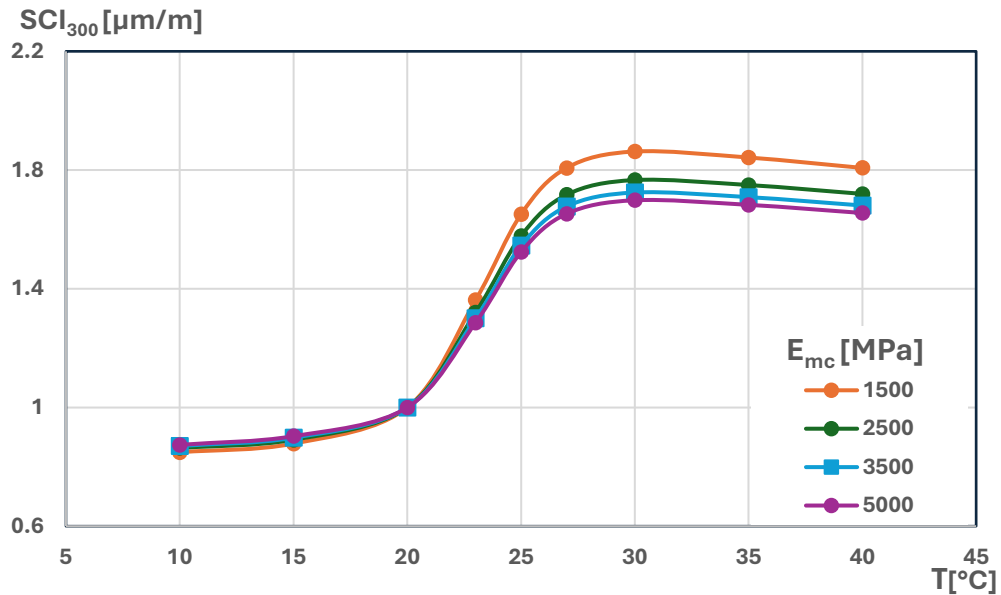


Figura 6.8. SCI_{300} in funzione della temperatura per le pavimentazioni DG

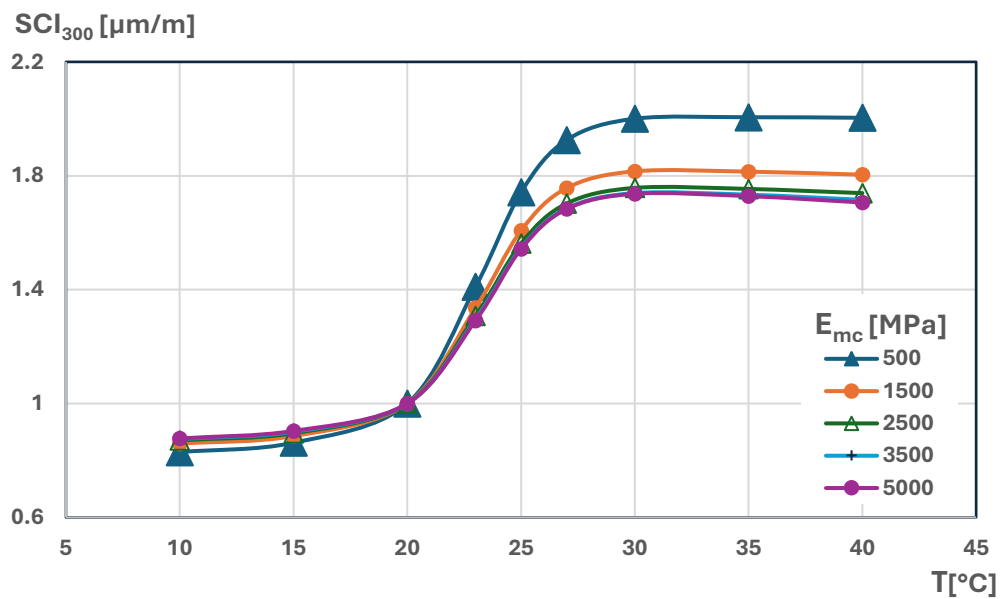


Figura 6.9. SCI_{300} in funzione della temperatura per le pavimentazioni OG

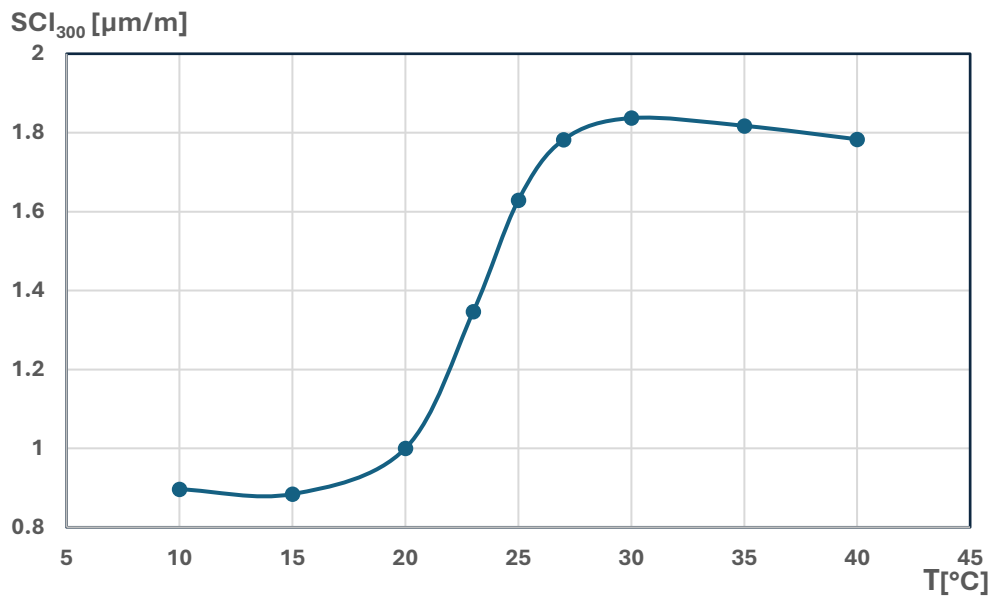


Figura 6.9. SCI₃₀₀ in funzione della temperatura per le pavimentazioni DG

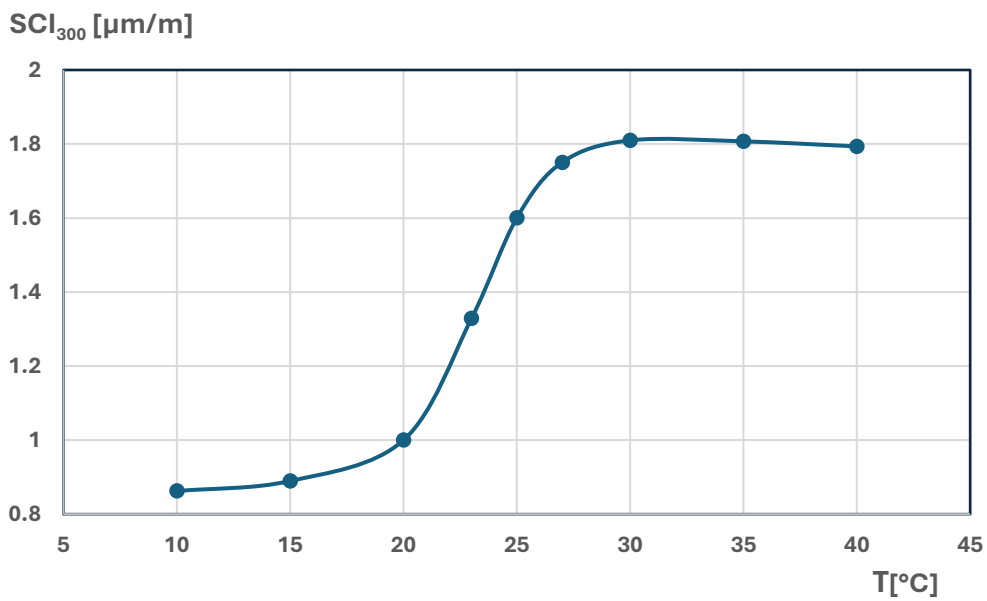


Figura 6.10. SCI₃₀₀ in funzione della temperatura per le pavimentazioni OG

Conclusioni

Data l'estensione di una rete stradale, l'utilizzo del TSD è fondamentale per il monitoraggio della capacità portante al Network Level in quanto permette di misurare deflessioni in continuo, senza fermare il flusso di traffico.

Per poter sfruttare al meglio i rilievi del TSD, una recente ricerca ha sviluppato una metodologia basata sulla stima della vita utile delle pavimentazioni. Nell'ambito di tale metodologia la presente tesi si è posta gli obiettivi di determinare una relazione tra il modulo elastico del conglomerato bituminoso e la deformazione di trazione massima alla base degli strati legati con i parametri del bacino di deflessione. Per quest'ultimi, si è inoltre cercato un coefficiente per la correzione della temperatura.

Sulla base del lavoro svolto si possono formulare le seguenti considerazioni conclusive:

- Il modulo del conglomerato bituminoso E_{cb} può essere stimato conoscendo solo il valore di SCI_{300} mentre la rigidità del sottofondo E_{sub} può essere stimata, con una buona precisione, con il parametro d_{1800} . Entrambe le relazioni si sono mostrate simili a quelle delle pavimentazioni flessibili;
- Si può stimare il modulo elastico dello strato in misto cementato (E_{mc}) dal valore di SCI_{600} ma la relazione è limitata alla conoscenza del modulo elastico del conglomerato bituminoso (E_{cb});
- La stima della deformazione di trazione alla base dello strato in conglomerato bituminoso (ϵ_{cb}), ha sottolineato la maggior differenza del comportamento delle pavimentazioni semirigide da quelle flessibili. In particolare, ϵ_{cb} non può essere stimata solamente con il parametro SCI_{300} , come per le pavimentazioni flessibili ma servono ulteriori parametri del bacino di deflessione. In particolare, sono state sviluppate:
 - un'analisi di regressione non lineare che tiene conto dei parametri SCI_{300} e SCI_{600} ;

- un'analisi di regressione lineare multipla che tiene conto dei parametri SCI_{300}, SCI_{600} e d_{1800} . Ottenendo in questo caso risultati molto soddisfacenti.
- L'effetto della presenza di uno strato drenante su tali correlazioni è di portata limitata. I risultati ottenuti sono simili a quelle delle pavimentazioni semirigide senza strato drenante.
- Con le simulazioni viscoelastiche si è ottenuto il coefficiente di correzione della temperatura per parametri del bacino di deflessione. Si è visto che sotto i 20° i coefficienti non dipendono dalla rigidità del misto cementato. Sopra i 20° la correzione è più evidente, ma la sua influenza non è comunque rilevante nell'ambito della gestione al Network Level.

Bibliografia

1. Asphalt Institute. (1981). Thickness Design-asphalt Pavements for Highways and Streets (Vol. 1).
2. Baltzer S. Three years of High Speed Deflectograph measurements of the Danish state road network. *Bear Capacit Roads, Railw Airfields - Proc 8th Int Conf Bear Capacit Roads, Railw Airfields*. 2009;1:443-450. doi:10.1201/9780203865286.ch48
3. Baltzer S, Pratt D, Weligamage J, Adamsen J, Hildebrand G. Continuous bearing capacity profile of 18,000 km Australian road network in 5 months. In *24th ARRB Conference, Melbourne, Australia*. 2010.
4. Chai G, Manoharan S, Golding A, Kelly G, Chowdhury S. Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer Data Using Simplified Deflection Model. *Transp Res Procedia*. 2016;14:3031-3039. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.444
5. Christensen BML. A comparison of Traffic Speed Deflectometer and Falling Weight Deflectometer data. Civil Engineering Bachelor thesis. Technical University of Denmark (DTU), Kongens Lyngby, Denmark, 2016.
6. Dias K, Gravesen J, Hjorth P, Larsen P, Please C, Radulovic N, Wang L, Aagaard Pedersen L. *Beneath the Wheel : Greenwood Engineering*. University of Southern Denmark. 2005.
7. Ferne BW, Langdale P, Round N, Fairclough R. Development of a calibration procedure for the U.K. Highways Agency traffic-speed deflectometer. *Transp Res Rec*. 2009;(2093):111-117. doi:10.3141/2093-13
8. Ferne B, Langdale P, Round N, Fairclough R. Development of the UK highways agency traffic speed deflectometer. *Bear Capacit Roads, Railw Airfields - Proc 8th Int Conf Bear Capacit Roads, Railw Airfields*. 2009;1:409-418. doi:10.1201/9780203865286.ch44
9. Finn, F., Saraf, C. L., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., & Abdullah, A. (1986). Development of pavement structural subsystems. NCHRP Report 291.
10. Flintsch GW, Ferne B, Diefenderfer B, Katicha S, Bryce J, Nell S. Evaluation of traffic-speed deflectometers. *Transp Res Rec*. 2012;2304(January 2016):37-46. doi:10.3141/2304-05
11. Francesco Canestrari, Lorenzo Paolo Ingrassia, Paolo Spinelli & Andrea Graziani (2023) A new methodology to assess the remaining service life of motorway pavements at the network level from traffic speed deflectometer measurements, *International Journal of Pavement Engineering*, 24:2, 2128349, DOI: 10.1080/10298436.2022.2128349
12. Hildebrand G. Development of a High Speed Deflectograph. Danish Road Institute, Report 117, 2002.
13. Jansen D. TSD Evaluation in Germany. *Int Symp Non-Destructive Test Civ Eng*. 2015:9.
14. Katicha SW, Flintsch GW, Ferne B. Optimal averaging and localized weak spot identification of traffic speed deflectometer measurements. *Transp Res Rec*. 2013;(2367):43-52. doi:10.3141/2367-05

15. Levenberg E, Pettinari M, Baltzer S, Christensen BML. Comparing Traffic Speed Deflectometer and Falling Weight Deflectometer Data. *Transp Res Rec.* 2018;2672(40):22-31. doi:10.1177/0361198118768524
16. Lukanen, E. O., Stubstad, R., Briggs, R. C., & Intertec, B. (2000). Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement (No. FHWA-RD-98-085; DBNX94822-D; NTIS-PB2000107444). Turner-Fairbank Highway Research Center.
17. Molenaar A.A.A. Prediction of fatigue cracking in asphalt pavements: do we follow the right approach? *Transportation research record*, 2001(1), 155-162.
18. Molenaar A.A.A. The Netherlands, Bottom-up fatigue cracking: myth or reality? Delft University of Technology.
19. Manoharan S, Chai G, Chowdhury S. Structural capacity assessment of Queensland roads using traffic speed deflectometer data. *Aust J Civ Eng.* 2020;00(00):1-12. doi:10.1080/14488353.2020.1766301
20. Moffatt M, Martin T, Muller W, Ai U. Traffic speed deflectometer: data analysis approaches in Europe and USA compared with ARRB analysis approach Austroads report No. AP-T280/14. 2014.
21. Muller WB, Roberts J. Revised approach to assessing traffic speed deflectometer data and field validation of deflection bowl predictions. *Int J Pavement Eng.* 2013;14(4):388-402. doi:10.1080/10298436.2012.715646
22. Nasimifar M, Thyagarajan S, Chaudhari S, Sivaneswaran N. Pavement Structural Capacity from Traffic Speed Deflectometer for Network Level Pavement Management System Application. *Transp Res Rec.* 2019;2673(2):456-465. doi:10.1177/0361198118825122
23. Nasimifar, M., Chaudhari, S., Thyagarajan, S., & Sivaneswaran, N. (2020). Temperature adjustment of Surface Curvature Index from Traffic Speed Deflectometer measurements. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(11), 1408-1418.
24. Pinkofsky L, Jansen D. Structural pavement assessment in Germany. *Front Struct Civ Eng.* 2018;12(2):183-191. doi:10.1007/s11709-017-0412-z
25. Rada, G. R., S. Nazarian, B. A. Visintine, R. Siddharthan, and S. Thyagarajan. Pavement Structural Evaluation at the Network Level. Federal Highway Administration Report FHWA-HRT-15-074. FHWA, Washington, D.C., 2016.
26. Rasmussen S, Aagaard L, Baltzer S, Krarup J. A comparison of two years of network level measurements with the Traffic Speed Deflectometer. *TRA 2008 Transp Res Arena Conf - Ljubljana, Slov.* 2008:8.
27. Rasanayagam N. Development of Windows-Based Version of the 3D-Move Analysis Software for Pavement Response Analysis, thesis of Master of Science in Civil Engineering, 2011.
28. Roberts J, Ai U, Toole T, Martin, T. Traffic speed deflectometer: Data review and lessons learnt. Austroads report No. AP-T279/14. 2014.
29. Santagata F.A. *Strade Teoria e tecnica delle costruzioni stradali Vol.2.*
30. Shahin MY. Pavement management for airports, roads, and parking lots. 1994. Chapman & Hall.

31. Van Gurp C. Characterization of Seasonal Influences on Asphalt Pavements with the use of Falling Weight Deflectometers, Technical University of Delft, 1995.
32. Wix R, Murnane C, Moffatt M. Experience Gained Investigating, Acquiring and Operating the First Traffic Speed Deflectometer in Australia. Transp Res Procedia. 2016;14:3060-3069. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.450
33. Zofka A, Sudyka J, Maliszewski M, Harasim P, Sybilski D. Alternative approach for interpreting traffic speed deflectometer results. Transp Res Rec. 2014;2457(2457):12-18. doi:10.3141/2457-02

Sitografia

34. <https://www.centronazionalemost.it/>
35. <https://greenwood.dk/road/tsd/> .

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia sincera gratitudine al relatore, Prof. Ing. Andrea Graziani, per il costante supporto e la guida durante tutto il periodo di lavoro di questa sperimentazione. I suoi suggerimenti, spunti e preziosi consigli hanno arricchito il mio lavoro e il suo tempo dedicato è stato fondamentale. Un ringraziamento speciale va anche al correlatore, Prof. Ing. Francesco Canestrari, che mi ha permesso di approfondire il tema della mia tesi. La passione e l'entusiasmo che entrambi trasmettono nel loro lavoro sono fonte di ispirazione e hanno reso questa esperienza ancora più significativa.