



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI **INGEGNERI**



CONVEGNI IN MODALITA' ON LINE
MODULO 1- Mercoledì 21 febbraio 2024, ore 15.00 – 18.00
Materiali e Tecnologie
per Pavimentazioni Stradali Sostenibili

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle
Pavimentazioni Stradali

Lucia Tsantilis

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente,
del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI)



**Politecnico
di Torino**

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

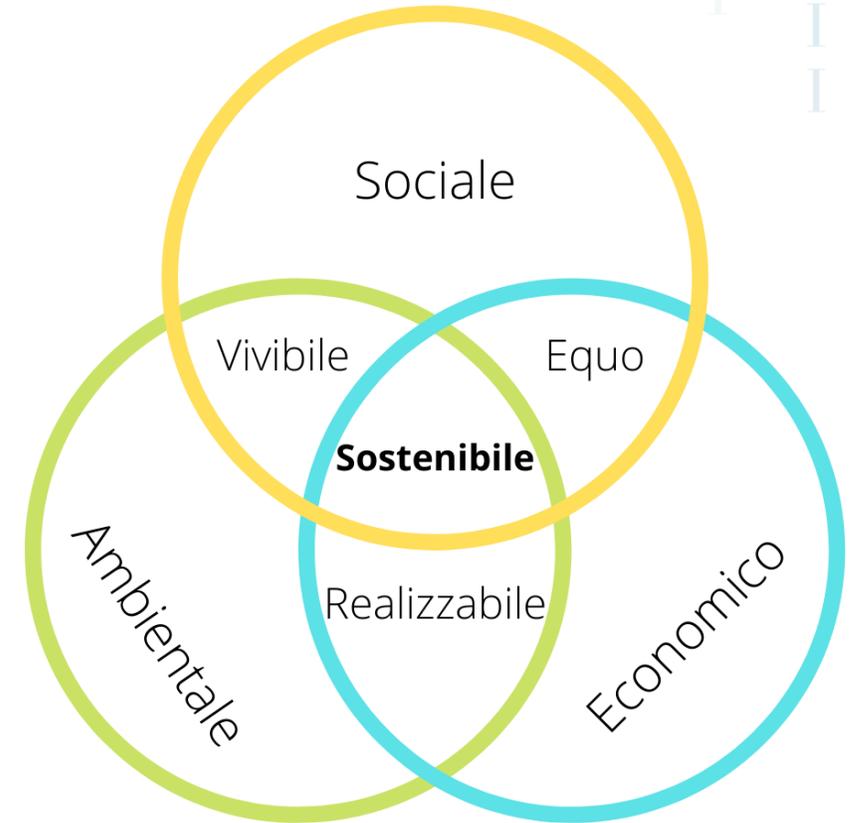
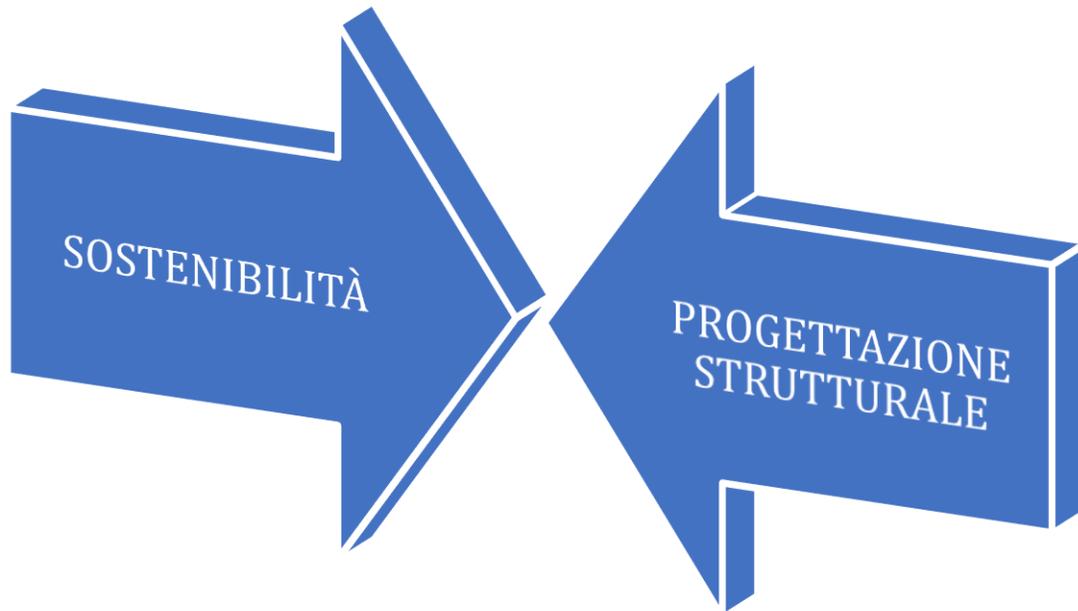
CONTENUTI DELLA PRESENTAZIONE

- Introduzione
- Riferimenti normativi
- Approcci metodologici alla progettazione strutturale
- Casi studio
- Conclusioni

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

CONSIDERAZIONI GENERALI E INTRODUTTIVE

Qual è il legame esistente tra sostenibilità e progettazione strutturale?



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

CONSIDERAZIONI GENERALI E INTRODUTTIVE

Legame tra sostenibilità e progettazione strutturale

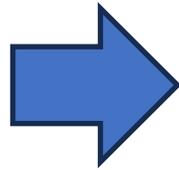
- Errori di dimensionamento
 - Impatti economici (costi di costruzione, costi di manutenzione, etc.)
 - Impatti ambientali (materiali, risorse energetiche, emissioni, etc.)
 - Impatti sociali (sicurezza stradale, comfort di guida, tempi di percorrenza, errata allocazione delle risorse, etc.)

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

CONSIDERAZIONI GENERALI E INTRODUTTIVE

Legame tra sostenibilità e progettazione strutturale

- Errori di dimensionamento
 - Impatti economici
 - Impatti ambientali
 - Impatti sociali



Nonostante i considerevoli impatti sulla sostenibilità, nella pratica corrente la progettazione strutturale è spesso relegata ad un ruolo marginale

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

RIFERIMENTI NORMATIVI

- Regolamento (UE) 2020/852
- Criteri ambientali minimi
- Codice dei contratti pubblici - Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36
- Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018)

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Approccio al dimensionamento:

- Cataloghi
- Metodi di calcolo empirici
- Metodi di calcolo empirico-razionali



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Approccio al dimensionamento:

- Cataloghi (es. CNR, '95)



N. 1RG Modulo resiliente del sottofondo	AUTOSTRAD E EXTRAURBANE					
	Numero di passaggi di veicoli commerciali					
	400.000	1.500.000	4.000.000	10.000.000	25.000.000	45.000.000
150 N/mm ²						
90 N/mm ²						
30 N/mm ²	TRAFFICO NON PREVISTO PER IL TIPO DI STRADA					
	SOTTOFONDO NON ADEGUATO AL TIPO ED ENTITA' DEL TRAFFICO (PREVEDERE BONIFICA)					

N. 6SR Modulo resiliente del sottofondo	STRADE URBANE DI SCORRIMENTO					
	Numero di passaggi di veicoli commerciali					
	400.000	1.500.000	4.000.000	10.000.000	25.000.000	45.000.000
150 N/mm ²						
90 N/mm ²						
30 N/mm ²	TRAFFICO NON PREVISTO PER IL TIPO DI STRADA					
	SOTTOFONDO NON ADEGUATO AL TIPO ED ENTITA' DEL TRAFFICO (PREVEDERE BONIFICA)					

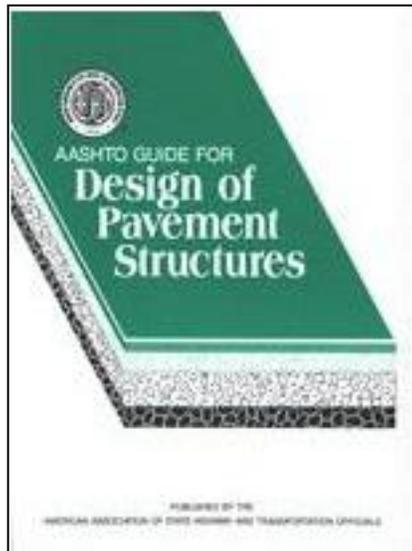
Convegno CNI – SIIV
Materiali e Tecnologie per Pavimentazioni Stradali Sostenibili

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Approccio al dimensionamento:

- **Metodi empirici (es. AASHTO, '93)**



$$\text{Log}(w_{18}) = Z_R \cdot S_o + 9.36 \cdot \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \text{Log}(M_R) - 8.07$$

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i \cdot D_i \cdot m_i$$

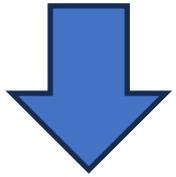
SN: Indice strutturale
 a_i : Coefficiente di struttura dello strato i-esimo
 D_i : Spessore dello strato i-esimo
 m_i : Coefficiente che tiene conto delle condizioni di drenaggio dello strato i-esimo

Materiale	Coefficiente a
Misto granulare	0.11
Misto granulare con frantumato	0.13 ÷ 0.14
Misto bitumato	0.20 ÷ 0.22
Conglomerato bituminoso per base	0.25 ÷ 0.30
Misto cementato	0.25 ÷ 0.30
Conglomerato bituminoso per collegamento	0.36 ÷ 0.40
Conglomerato bituminoso per usura	0.40 ÷ 0.44

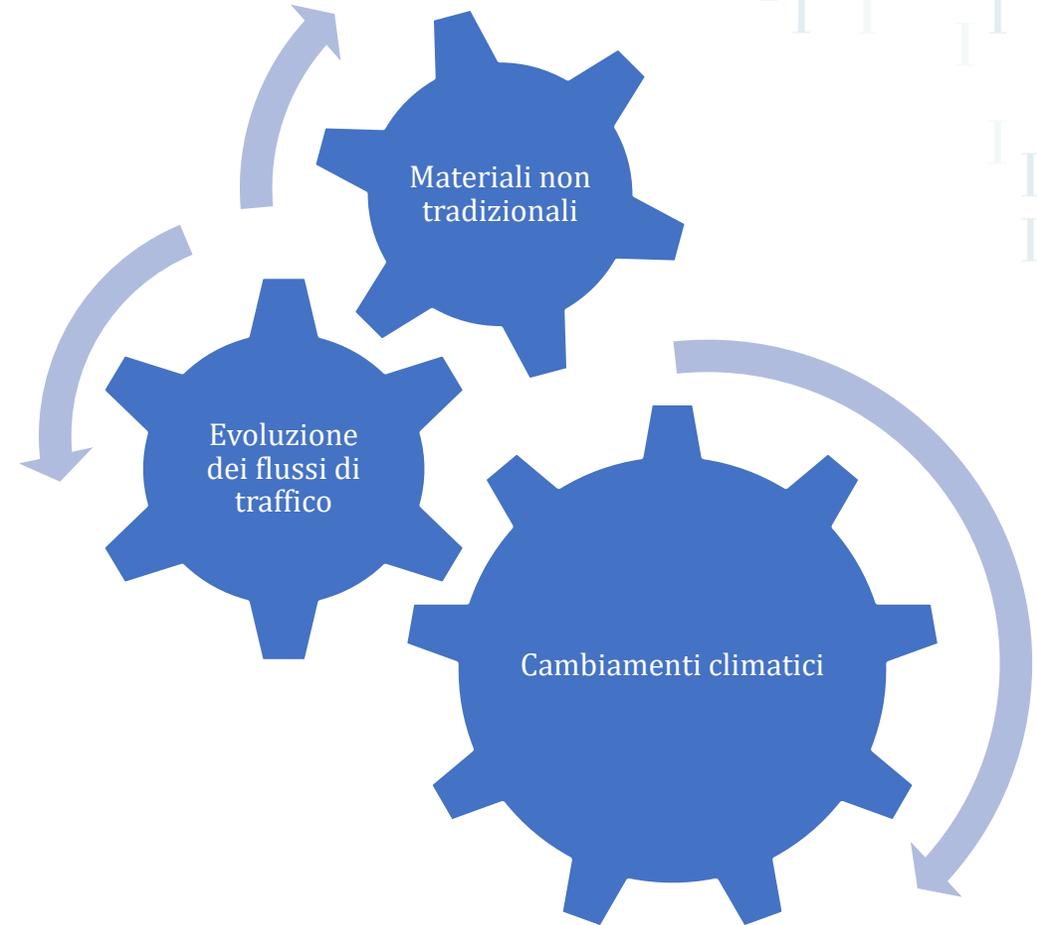
Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Come possiamo tenere in conto della specificità dell'opera e del contesto in cui essa si colloca?



Approccio empirico-razionale



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE

Il metodo empirico-razionale combina la risposta tenso-deformativa della pavimentazione sotto carico, calcolata mediante un approccio di tipo razionale, con leggi di degrado strutturale di tipo empirico, ottenute attraverso l'osservazione di pavimentazioni reali, prove sperimentali in vera grandezza o prove di laboratorio.

Componente razionale:

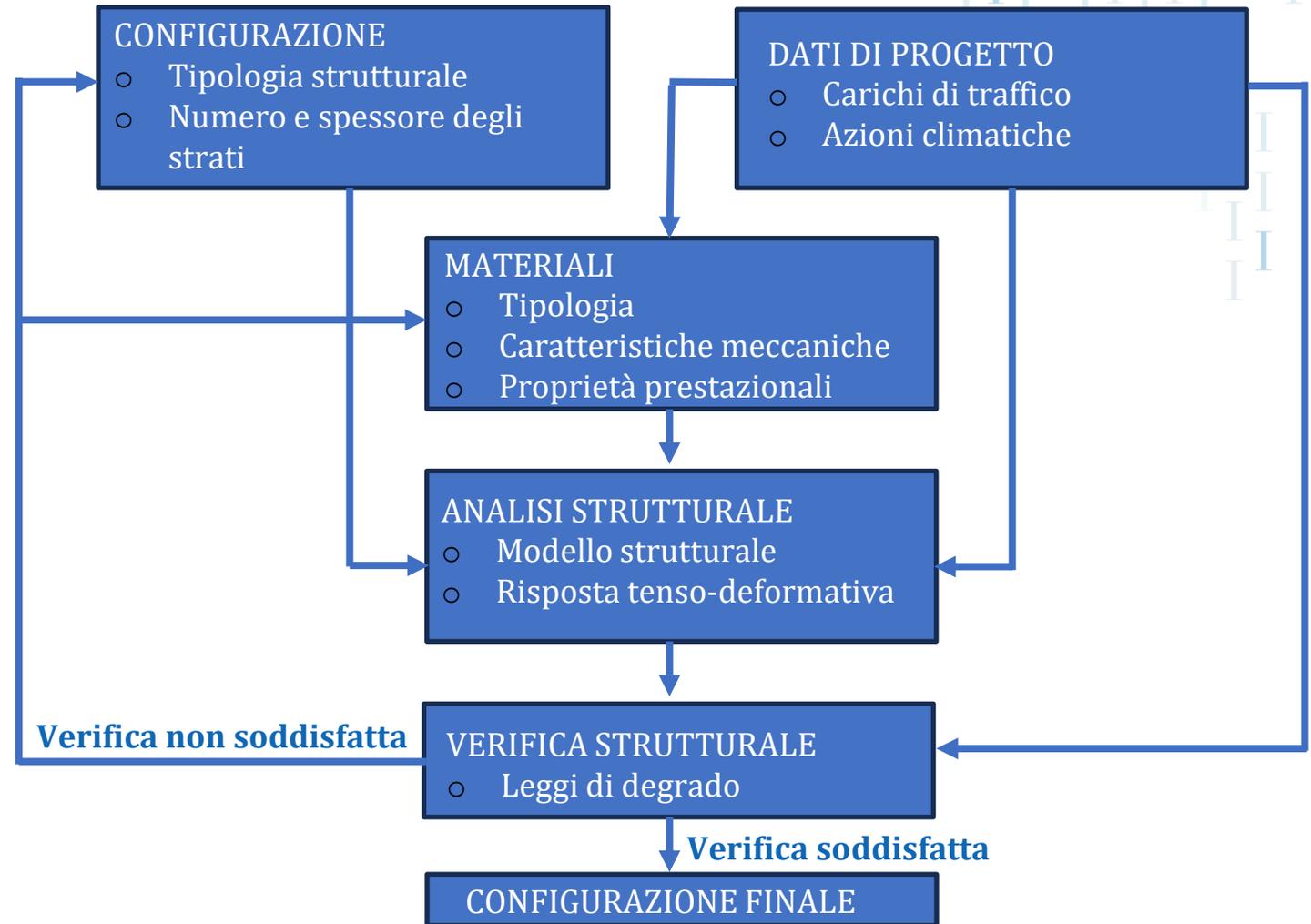
- Analisi strutturale

Componente empirica:

- Determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali
- Leggi di degrado strutturale

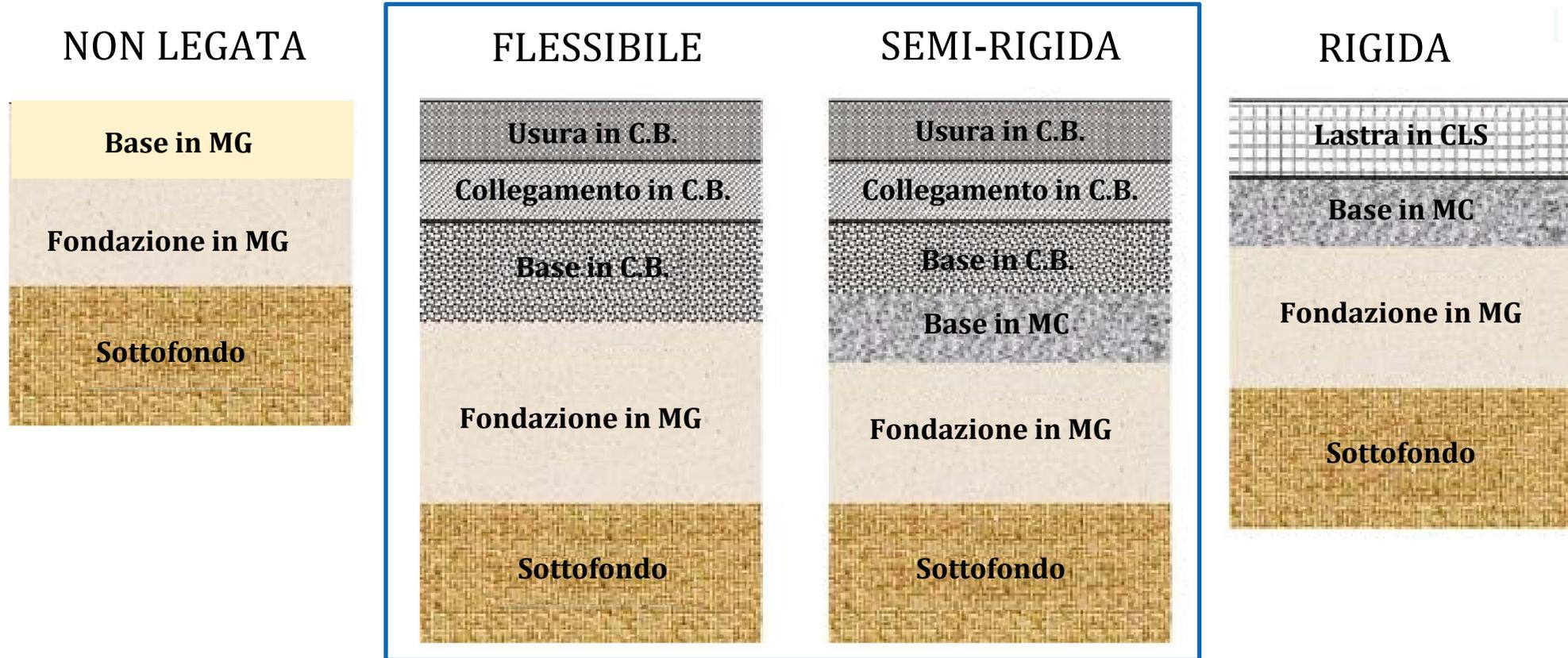
Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Configurazione strutturale



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Principali forme di degrado

Fatica



Ormaiamento

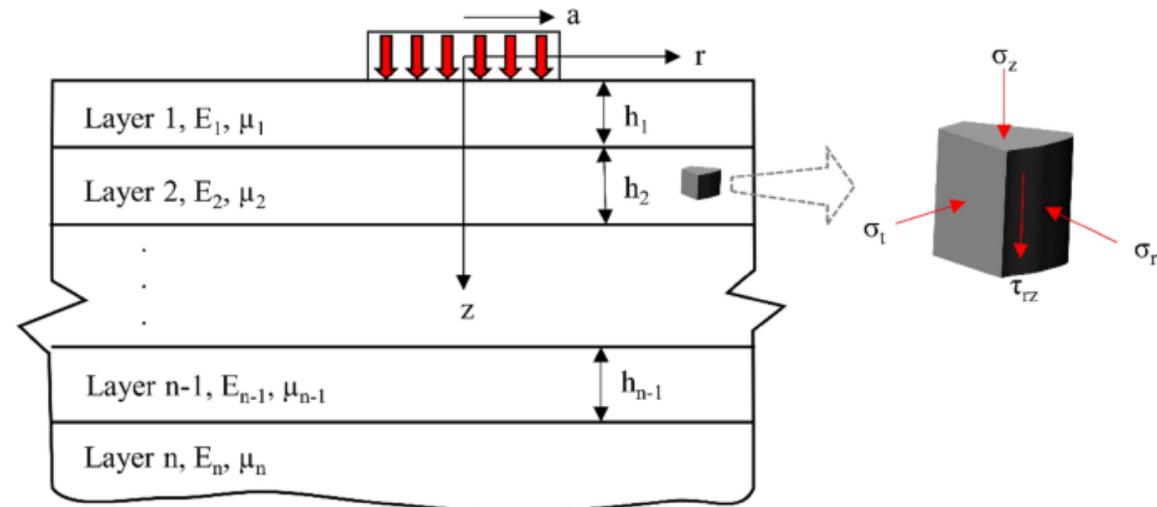


Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Analisi strutturale

Modello strutturale

- Teoria del multistrato
 - Elastico, viscoelastico
 - Lineare, non-lineare
 - Isotropo, anisotropo

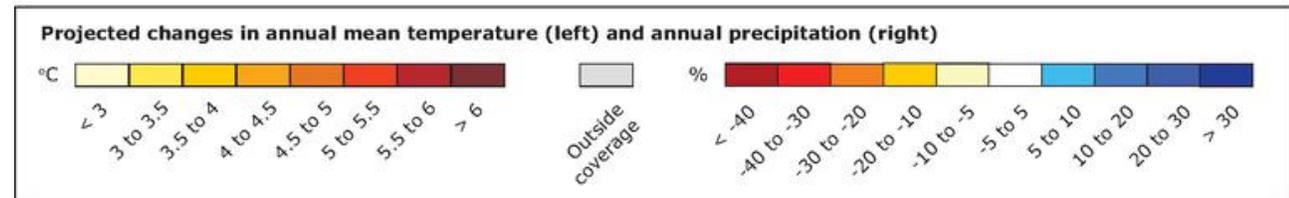
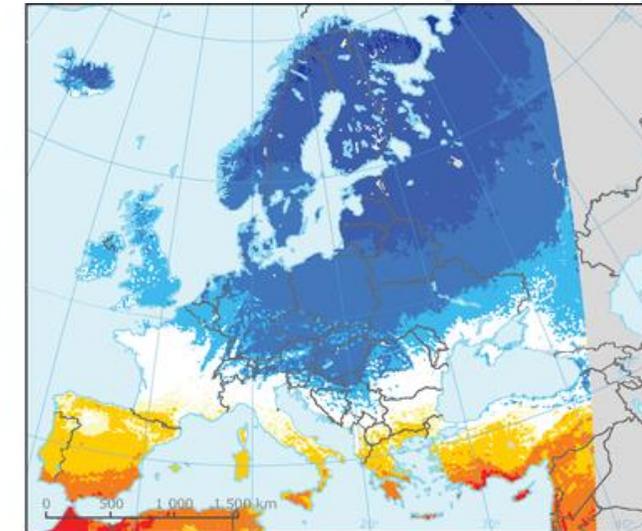
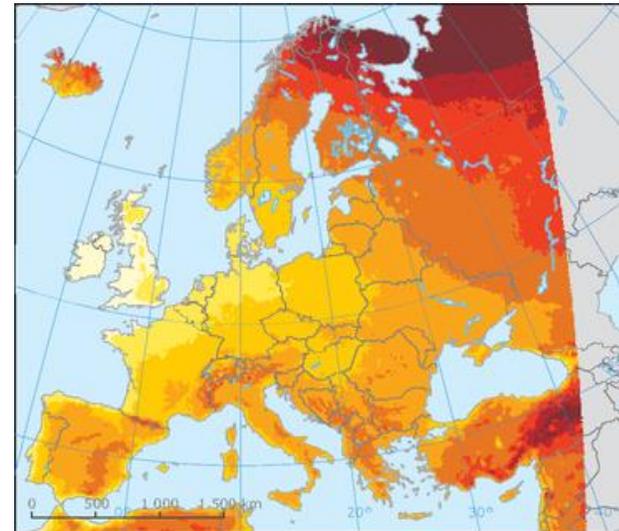
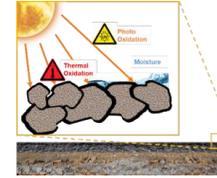


Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Azioni climatiche

Variabili di progetto

- Temperatura
- Precipitazioni
- Vento
- Irraggiamento



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

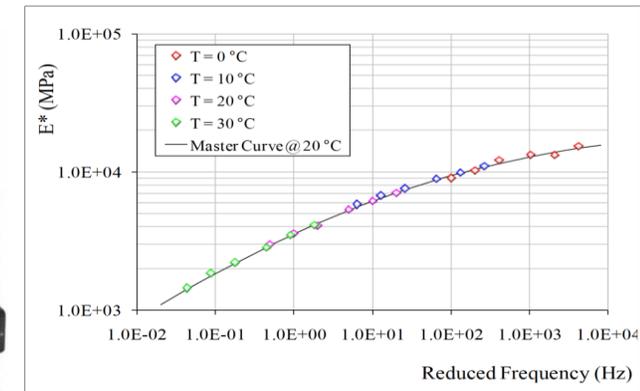
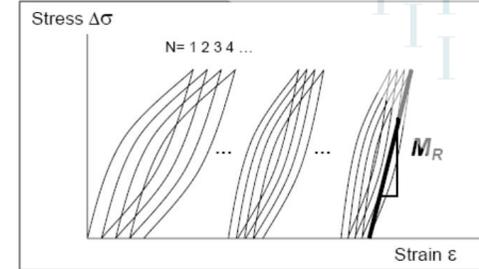
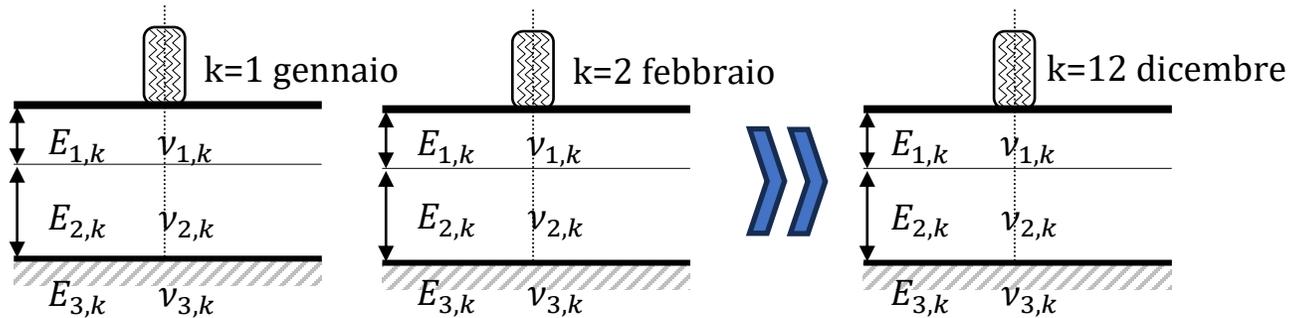
METODO EMPIRICO-RAZIONALE

Modello strutturale

- Teoria del multistrato

Modellazione

- Periodi di analisi

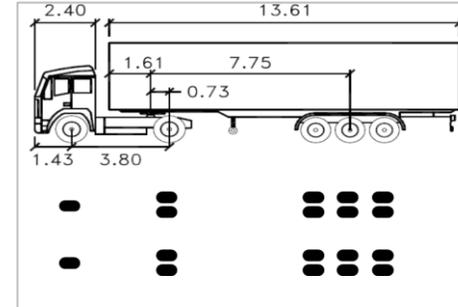


Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Carichi di traffico

Variabili di progetto

- Velocità di applicazione dei carichi
- Tipologia di asse (ad asse singolo, tandem o tridem; con ruote singole o gemellate, etc.)
- Carico per asse
- Numero di applicazioni dei carichi
- Tensione di contatto



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

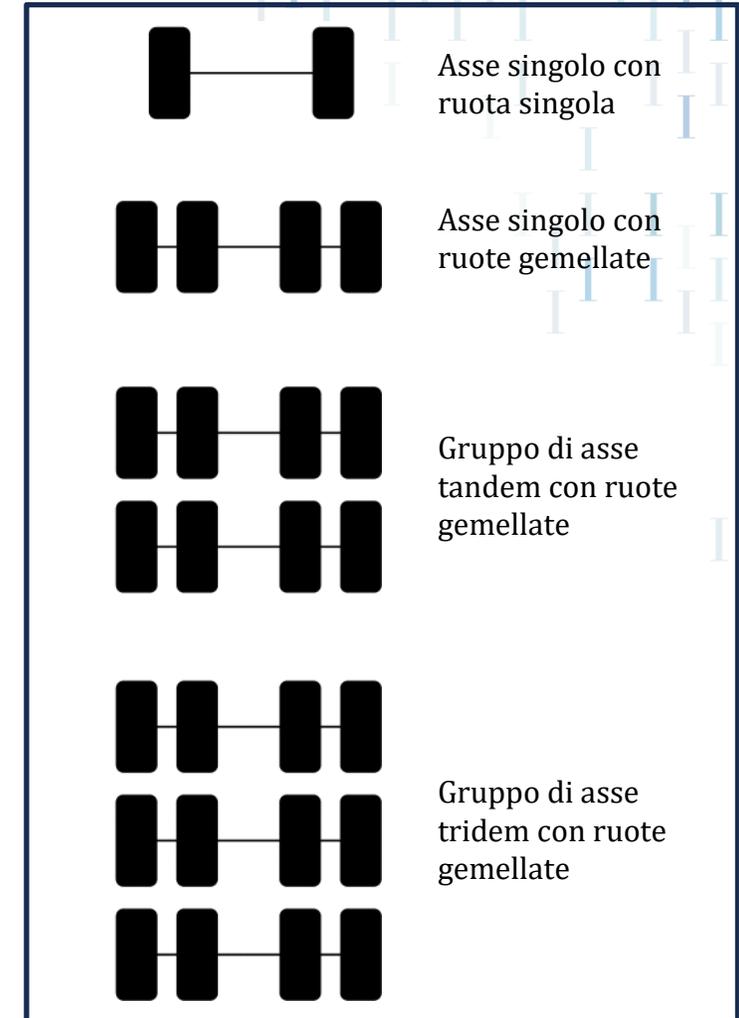
METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Modellazione dei carichi di traffico

Approcci:

- suddivisione del traffico di progetto in gruppi di carico;
- conversione del traffico di progetto in assi di riferimento equivalenti.

Tipi di veicoli commerciali, numero di assi, distribuzione dei carichi per asse.

Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in KN			
1) autocarri leggeri	2	↓10	↓20		
2) " "	"	↓15	↓30		
3) autocarri medi e pesanti	"	↓40	↓80		
4) " " "	"	↓50	↓110		
5) autocarri pesanti	3	↓40	↓80	↓80	
6) " "	"	↓60	↓100	↓100	
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90	↓80	↓80
8) " "	"	↓60	↓100	↓100	↓100
9) " "	5	↓40	↓80	↓80	↓80
10) " "	"	↓60	↓90	↓90	↓100
11) " "	"	↓40	↓100	↓80	↓80
12) " "	"	↓60	↓110	↓90	↓90
13) mezzi d'opera	"	↓50	↓120	↓130	↓130
14) autobus	2	↓40	↓80		
15) " "	2	↓60	↓100		
16) " "	2	↓50	↓80		



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Modellazione dei carichi di traffico

Conversione del traffico di progetto in assi di riferimento equivalenti

$$FEA = K \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^\alpha$$

FEA: Fattore di equivalenza tra asse elementare generico e asse di riferimento

P: Carico gravante sull'asse elementare generico

*P*₀: Carico gravante sull'asse di riferimento

K: Coefficiente che dipende dalla tipologia di gruppo di asse a cui appartiene l'asse elementare (singolo, tandem o tridem)

α: Coefficiente che dipende dalla tipologia strutturale

$$N_{AE} = \sum_i \sum_{j=1}^3 FEA_{ij} \cdot N_{ij}$$

*N*_{AE}: Numero di assi equivalenti di progetto

*FEA*_{ij}: Fattore di equivalenza del generico asse elementare di carico *i* e configurazione *j* (*j* = 1 per asse singolo; *j* = 2 per asse tandem e *j* = 3 per asse tridem)

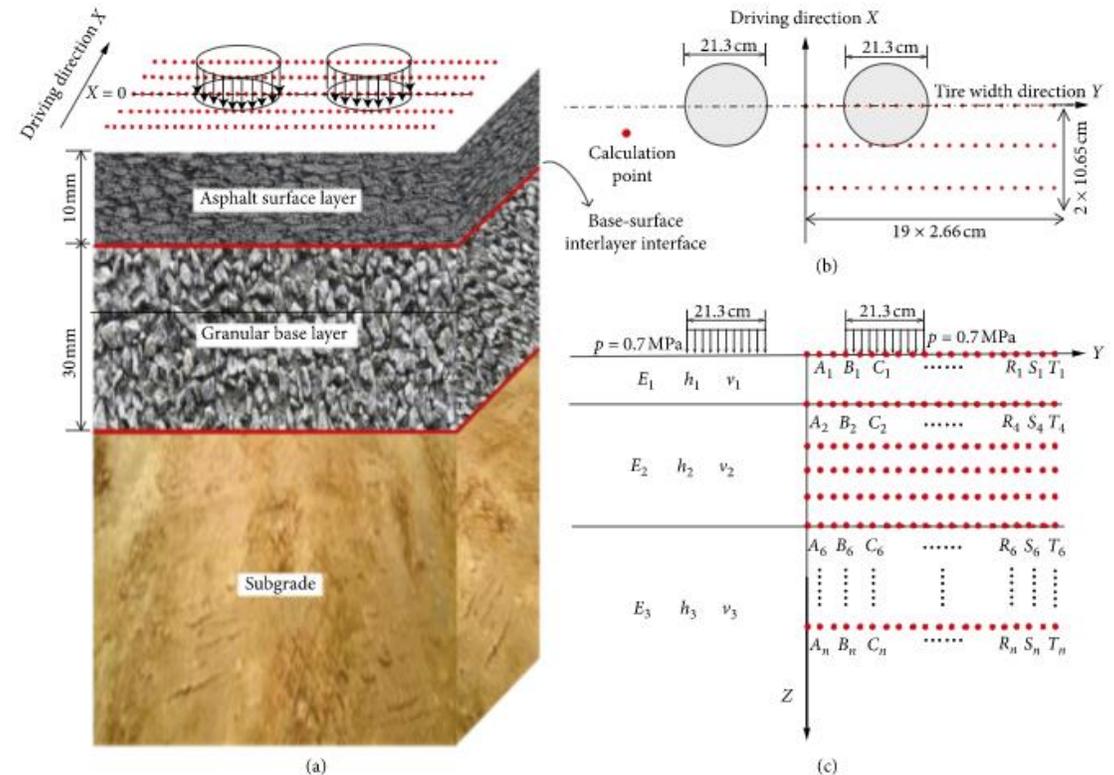
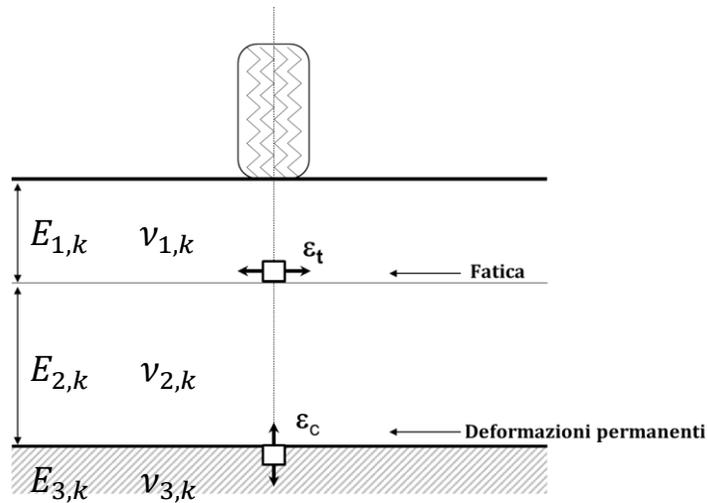
*N*_{ij}: Numero di assi elementari di carico *i* e configurazione *j*

Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Analisi strutturale

Risposta tenso-deformativa

- Funzione del criterio di rottura
- Determinata nelle condizioni rappresentative per ogni k-esimo periodo di analisi



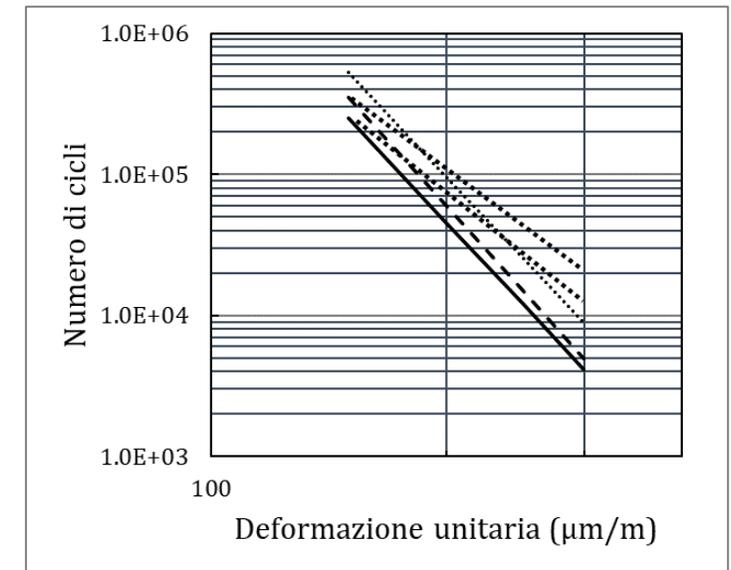
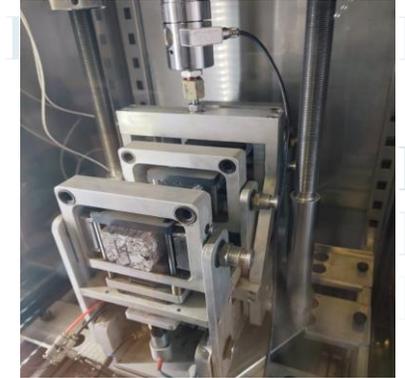
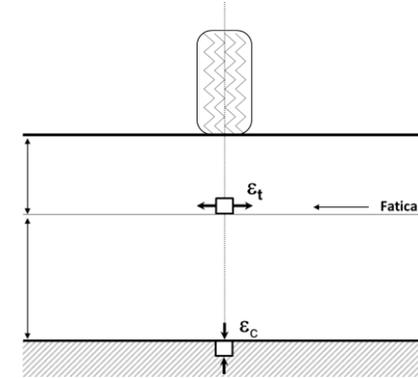
Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Legge di degrado

Fatica

$$N_f = \frac{1}{F_{aff}} \cdot F_{lab} \cdot f_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{f_2} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{f_3}$$

- N_f : Numero di ripetizioni del carico che determina il raggiungimento di condizioni limite del danneggiamento per fatica dello strato
- F_{aff} : Fattore di affidabilità
- F_{lab} : Fattore di traslazione che relaziona le prestazioni in laboratorio a quelle in situ
- f_1, f_2, f_3 : Parametri di regressione
- ε_t : Deformazione unitaria di trazione alla base dello strato in conglomerato bituminoso
- E : Modulo elastico del conglomerato bituminoso



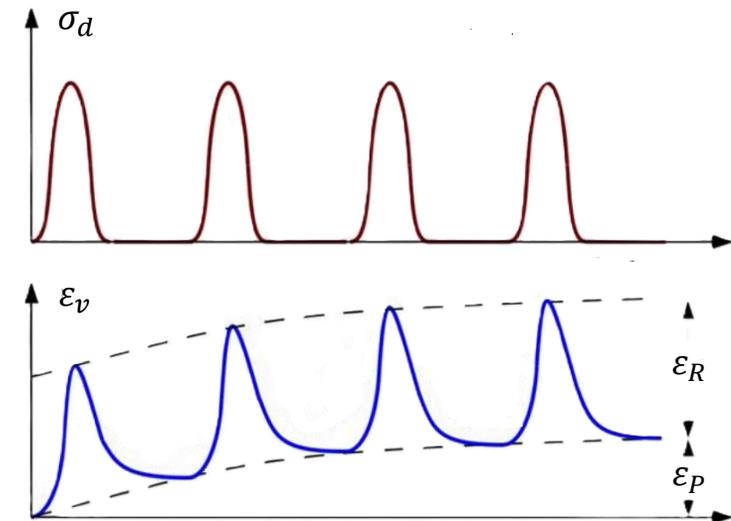
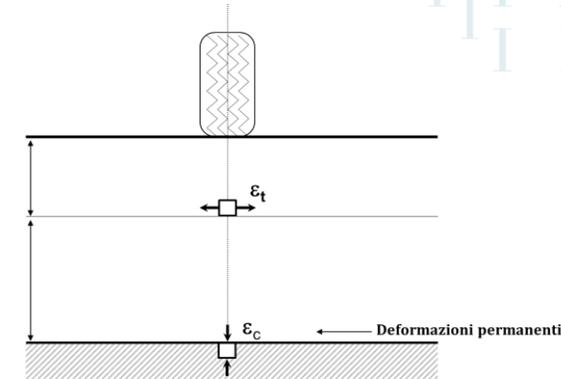
Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Legge di degrado

Deformazioni permanenti

$$N_d = \frac{1}{F_{aff}} \cdot F_{lab} \cdot f_4 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right)^{f_5}$$

- N_d : Numero di ripetizioni del carico che determina il raggiungimento di condizioni limite di ormaiamento
- F_{aff} : Fattore di affidabilità
- F_{lab} : Fattore di traslazione che relaziona le prestazioni in laboratorio a quelle in situ
- f_4, f_5 : Costanti di regressione
- ε_c : Deformazione unitaria verticale di compressione sulla superficie del sottofondo



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

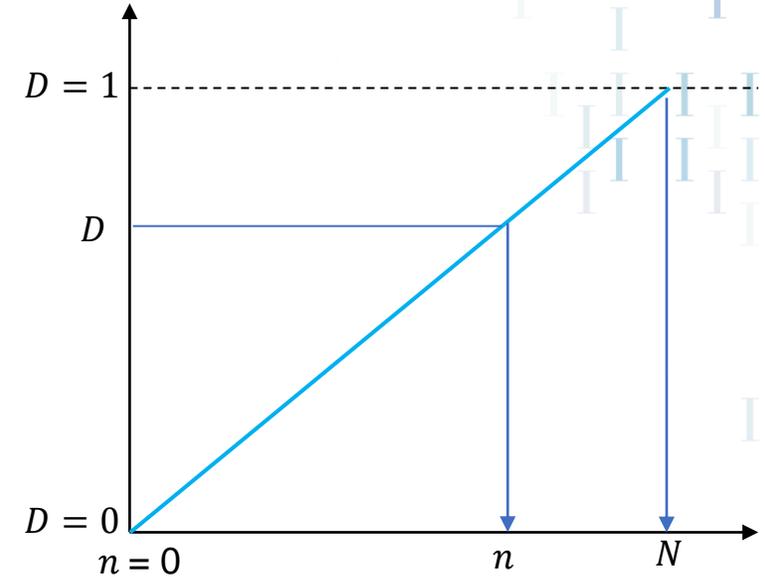
METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Verifica strutturale

Calcolo del danno

- Danno computato in maniera distinta per ogni tipologia di dissesto
- Ipotesi di legge lineare di sovrapposizione del danno

$$D_{f,d} = \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{N_k}$$

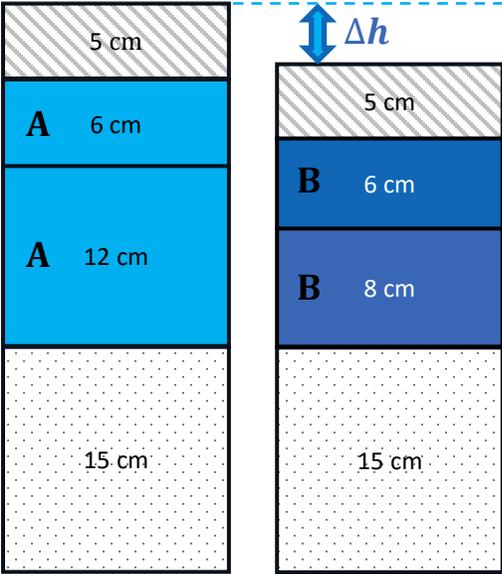
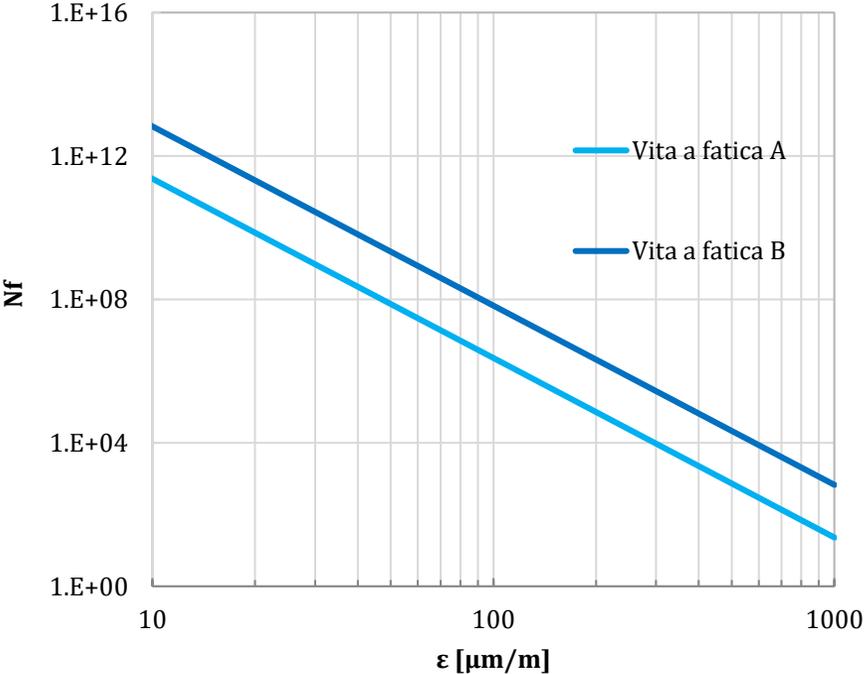
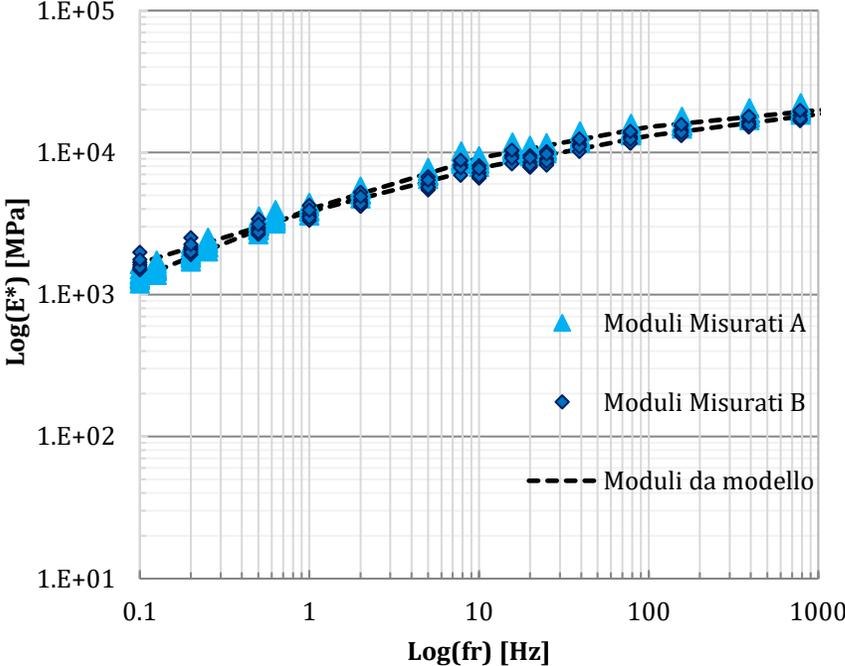
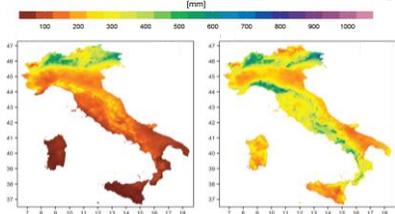
- $D_{f,d}$: Danno per fatica (f) o accumulo di deformazioni permanenti (d)
- n_k : Numero di applicazioni di assi equivalenti nel generico periodo climatico k
- N_k : Numero di applicazioni di assi equivalenti nel generico periodo climatico k che determina il raggiungimento delle condizioni limite di danneggiamento per fatica o deformazioni permanenti (valutato a mezzo di funzione di trasferimento)



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

CASO STUDIO 1

Effetto delle caratteristiche prestazionali dei materiali



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

CASO STUDIO 2

Effetto dei cambiamenti climatici sul dimensionamento della pavimentazione

- Clima continentale – subartico
 - Profondità di penetrazione del gelo (\downarrow)
 - Resistenza agli sforzi di taglio degli strati non legati (\uparrow)



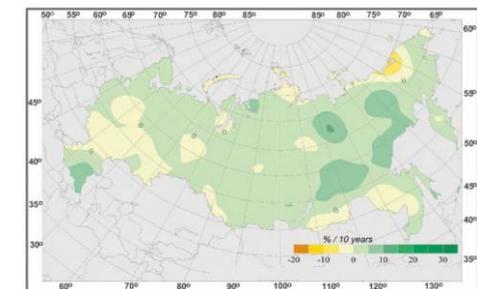
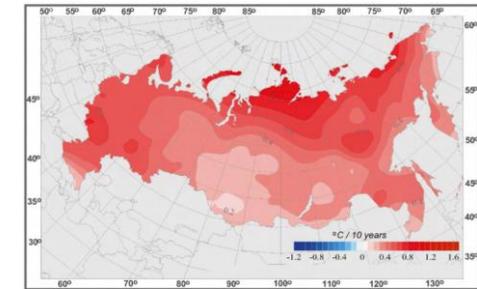
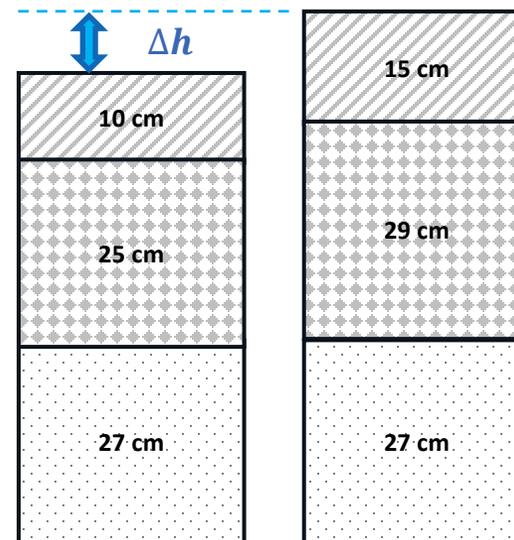
Conglomerato bituminoso



Conglomerato bituminoso poroso



Misto granulare

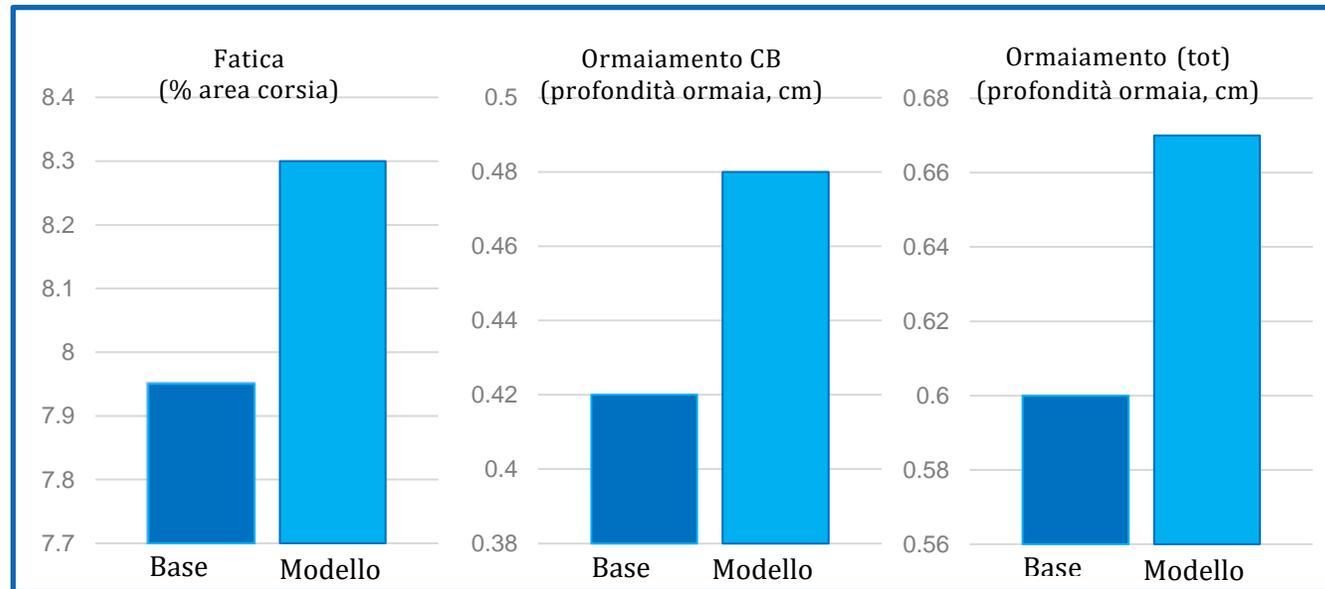


Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

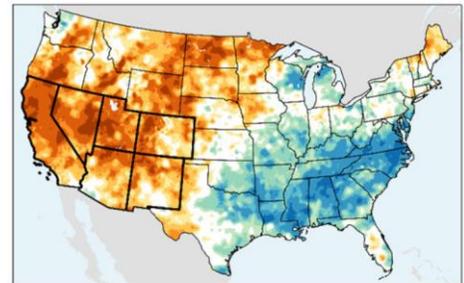
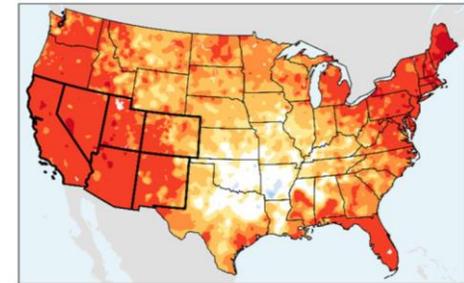
CASO STUDIO 3

Effetto dei cambiamenti climatici sulle prestazioni delle pavimentazioni

- Clima desertico



Gudipudi et al., 2017



Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

CONCLUSIONI

La progettazione strutturale ha impatti rilevanti sulla sostenibilità economica, ambientale e sociale delle sovrastrutture stradali

I metodi di progettazione basati su un approccio empirico-razionale forniscono un'ampia flessibilità nel tenere in considerazione le specificità dell'opera e del suo contesto

- Materiali
- Carichi di traffico
- Azioni climatiche

L'affidabilità dei risultati ottenuti dal calcolo dipende dal grado di accuratezza nella stima dei parametri di input e dal livello di aderenza alla realtà fisica dei modelli assunti

I modelli impiegati nella progettazione strutturale non possono prescindere da un'adeguata calibrazione derivante da un costante monitoraggio delle infrastrutture

I

CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



CONVEGNI IN MODALITA' ON LINE
MODULO 1- Mercoledì 21 febbraio 2024, ore 15.00 – 18.00
Materiali e Tecnologie
per Pavimentazioni Stradali Sostenibili

Grazie per l'attenzione!

Lucia Tsantilis

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente,
del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI)



**Politecnico
di Torino**