



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

---

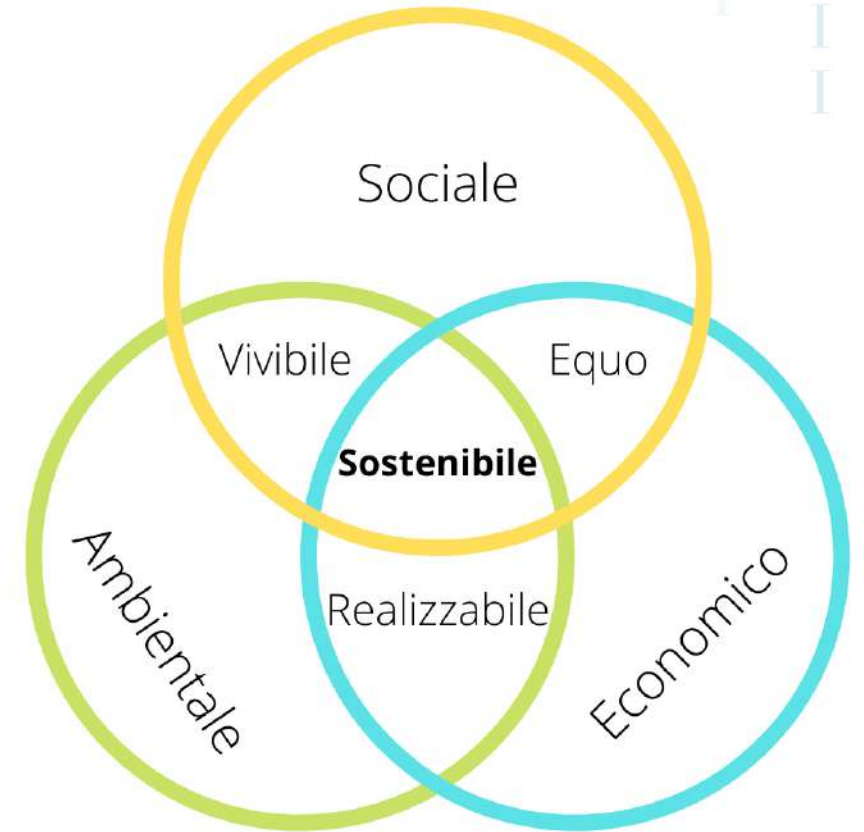
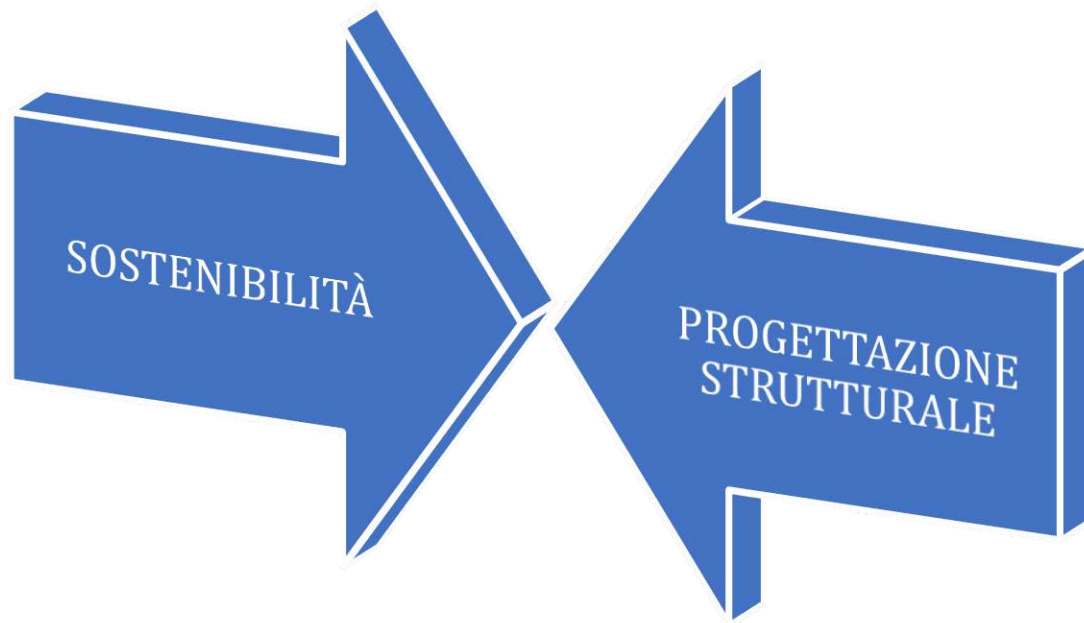
## CONTENUTI DELLA PRESENTAZIONE

- 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

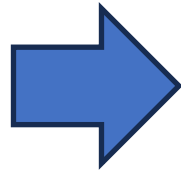
- Errori di dimensionamento
  - Impatti economici (costi di costruzione, costi di manutenzione, etc.)
  - Impatti ambientali (materiali, risorse energetiche, emissioni, etc.)
  - Impatti sociali (sicurezza stradale, comfort di guida, tempi di percorrenza, errata allocazione delle risorse, etc.)

# 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

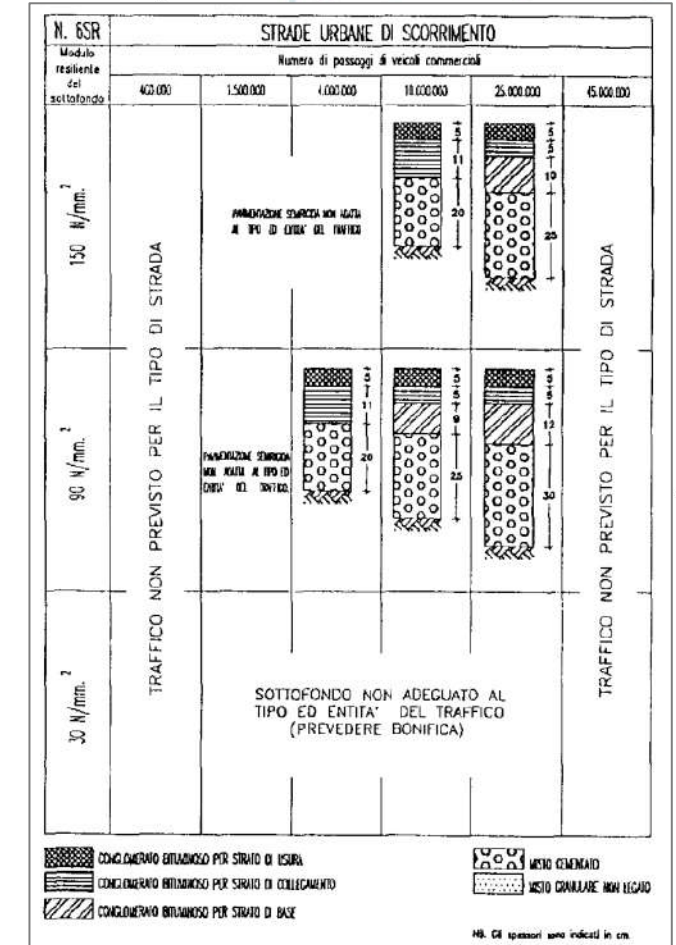
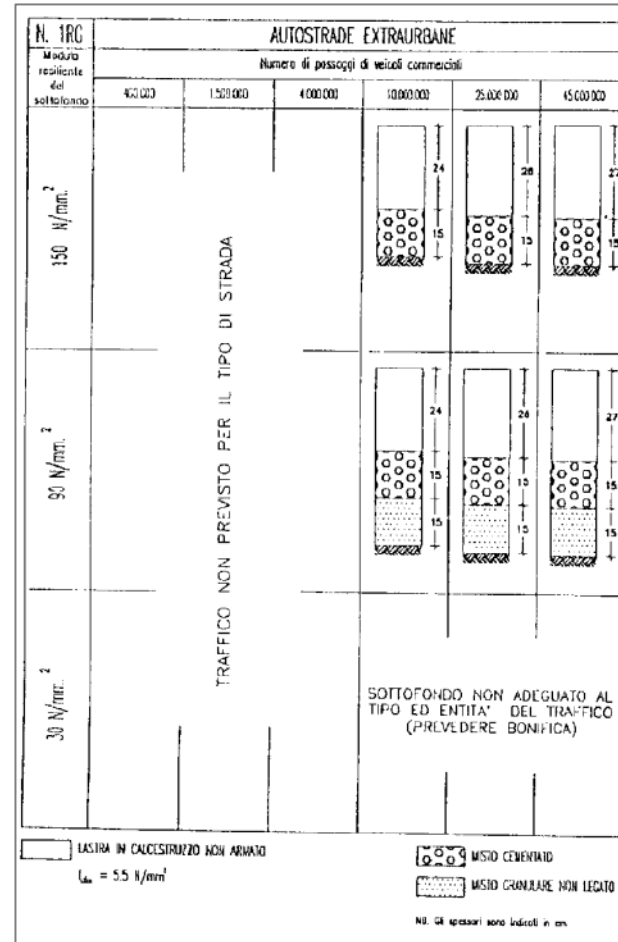


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Approccio al dimensionamento:

- Cataloghi (es. CNR, '95)



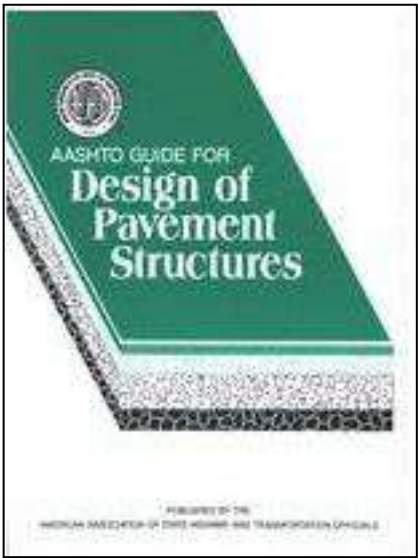


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## 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 <i>a</i>
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

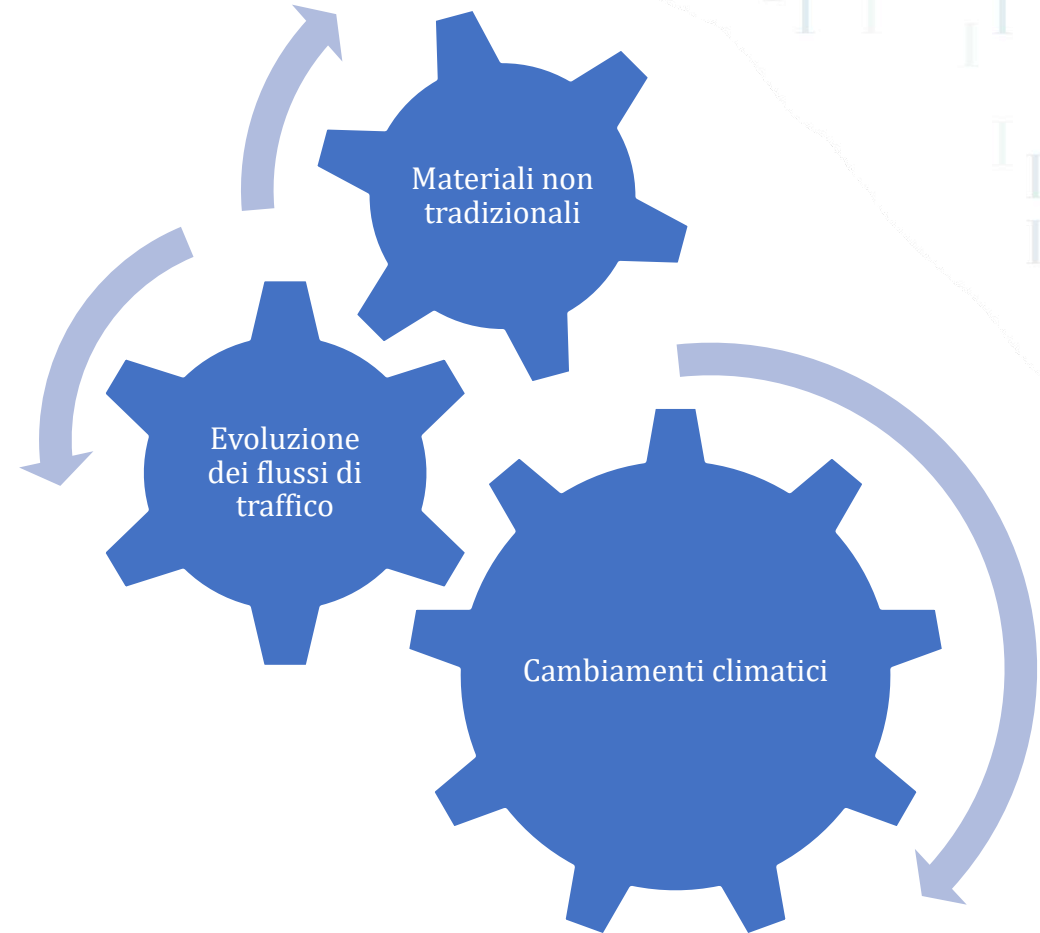
# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## 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:

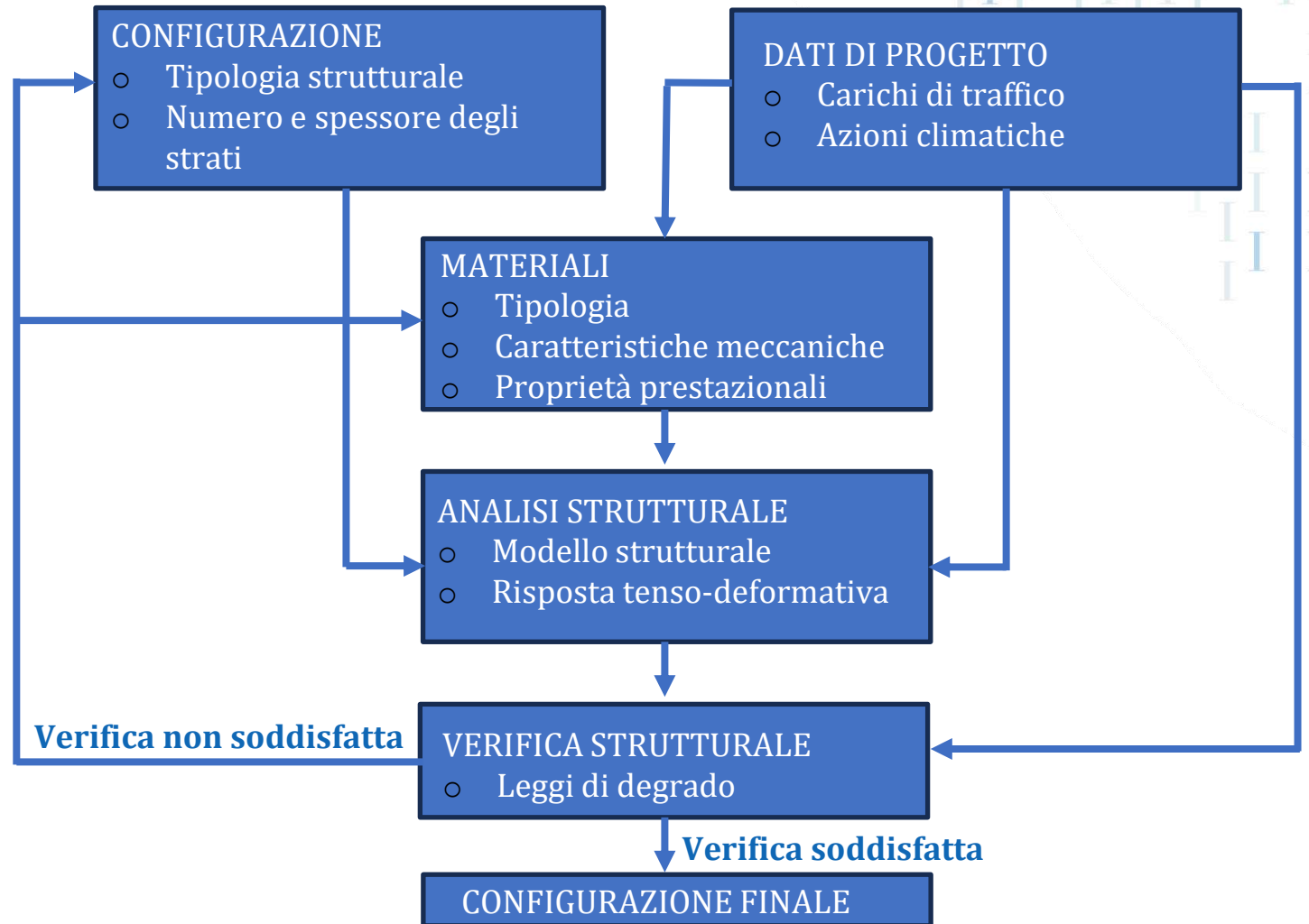
- Analisi strutturale

Componente empirica:

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

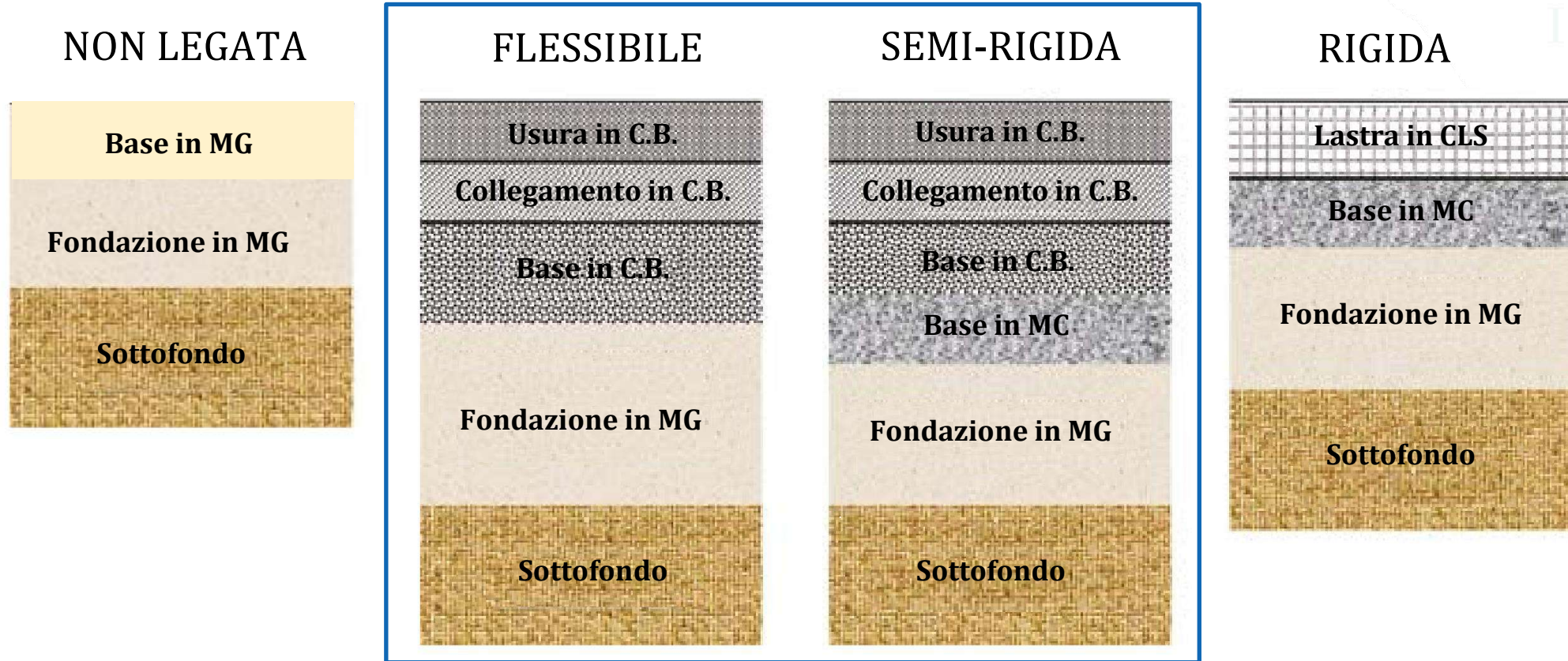
# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## 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



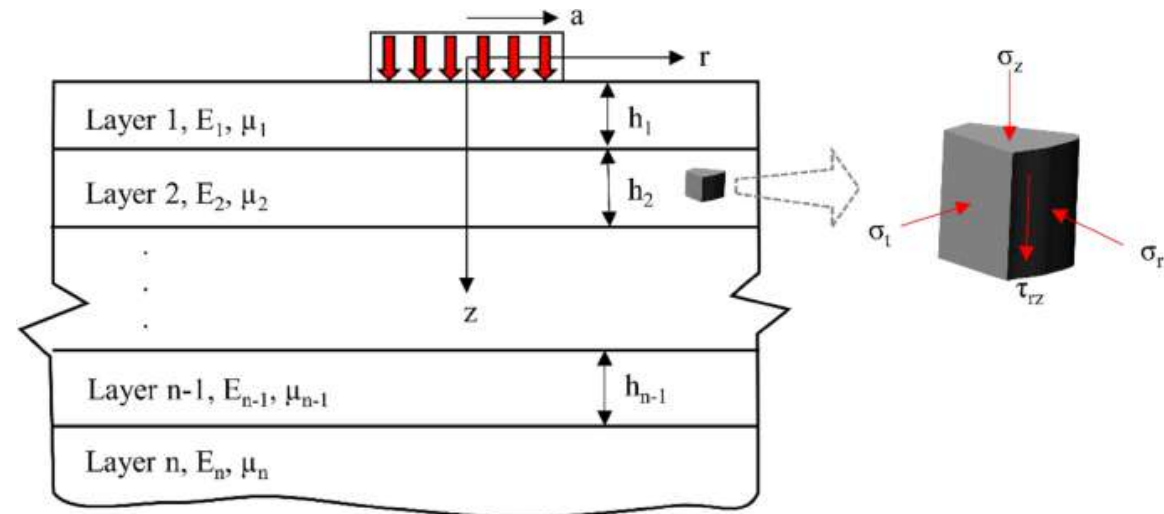


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Analisi strutturale

### Modello strutturale

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

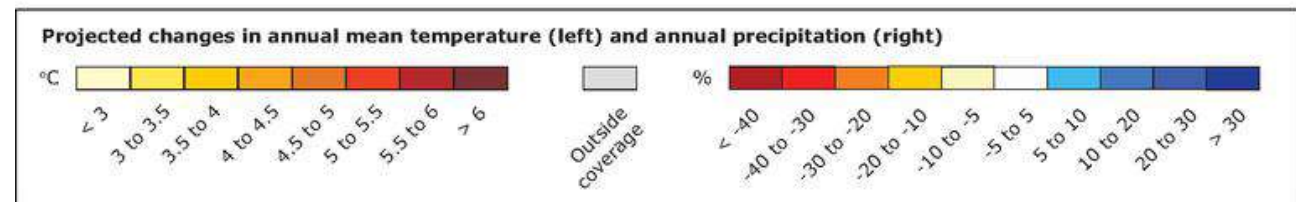
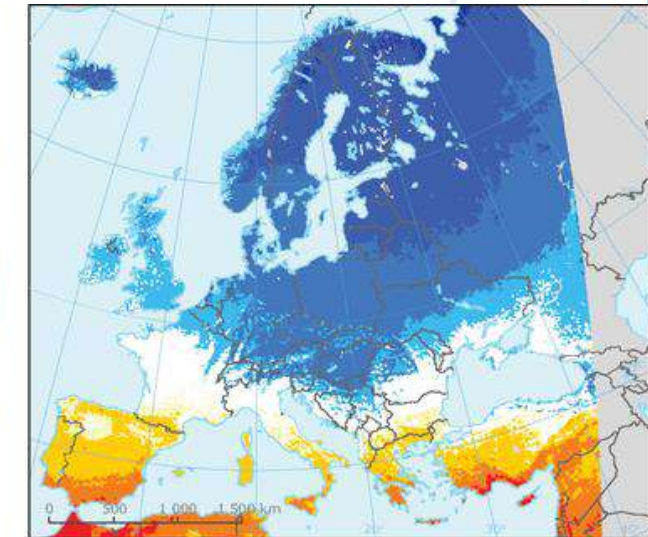
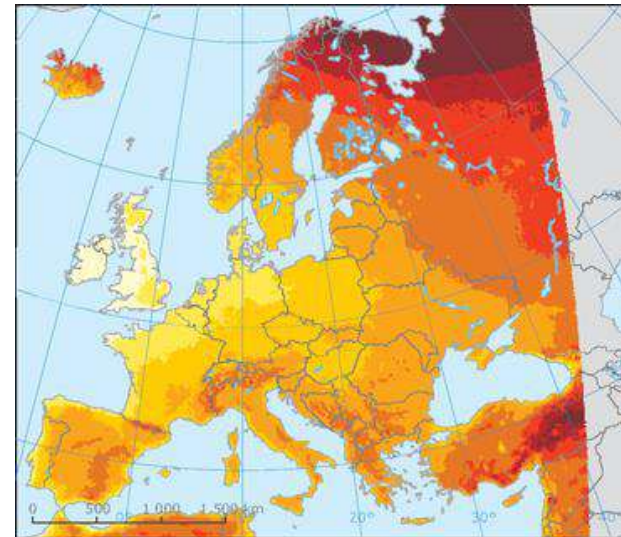
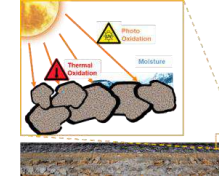


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Azioni climatiche

Variabili di progetto

- Temperatura
- Precipitazioni
- Vento
- Irraggiamento



# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

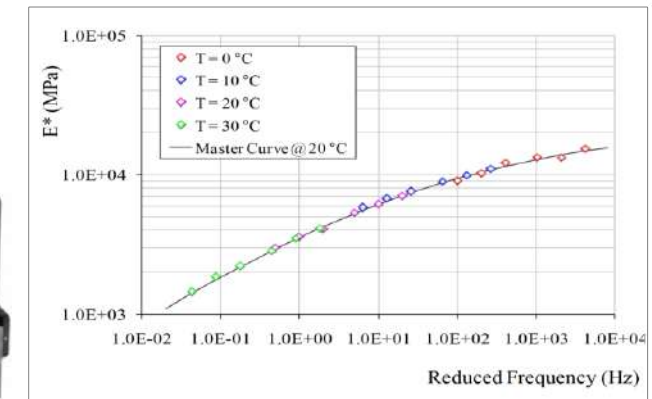
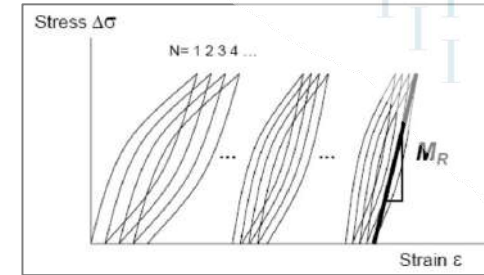
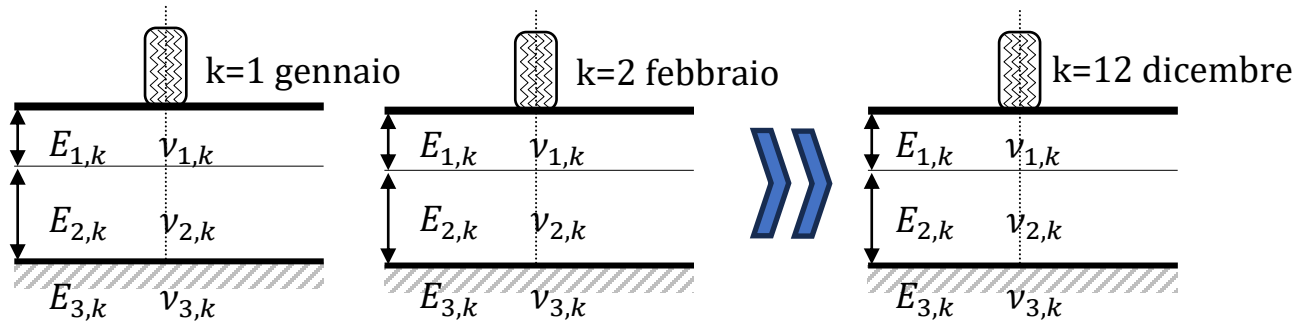
## METODO EMPIRICO-RAZIONALE

Modello strutturale

- Teoria del multistrato

Modellazione

- Periodi di analisi



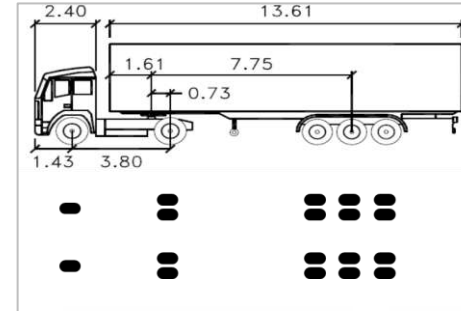


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## 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.

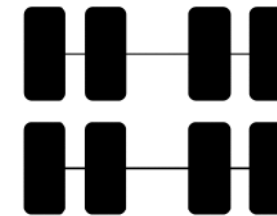
Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in KN			
1) autocarri leggeri	2	↓10	↓20		
2) " "	"	↓15	↓30		
3) autocarri medi e pesanti	"	↓40	↓80		
4) " " "	"	↓50	↓110		
5) autocarri pesanti	3	↓40	↓80	↓80	
6) " "	"	↓60	↓100	↓100	
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90	↓80	↓80
8) " "	"	↓60	↓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		



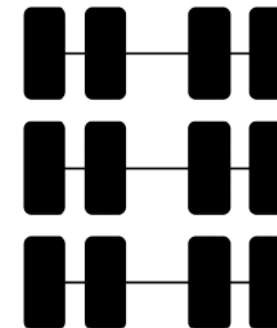
Asse singolo con ruota singola



Asse singolo con ruote gemellate



Gruppo di asse tandem con ruote gemellate



Gruppo di asse tridem con ruote gemellate

# 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)
- $\alpha$ : 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  $j$

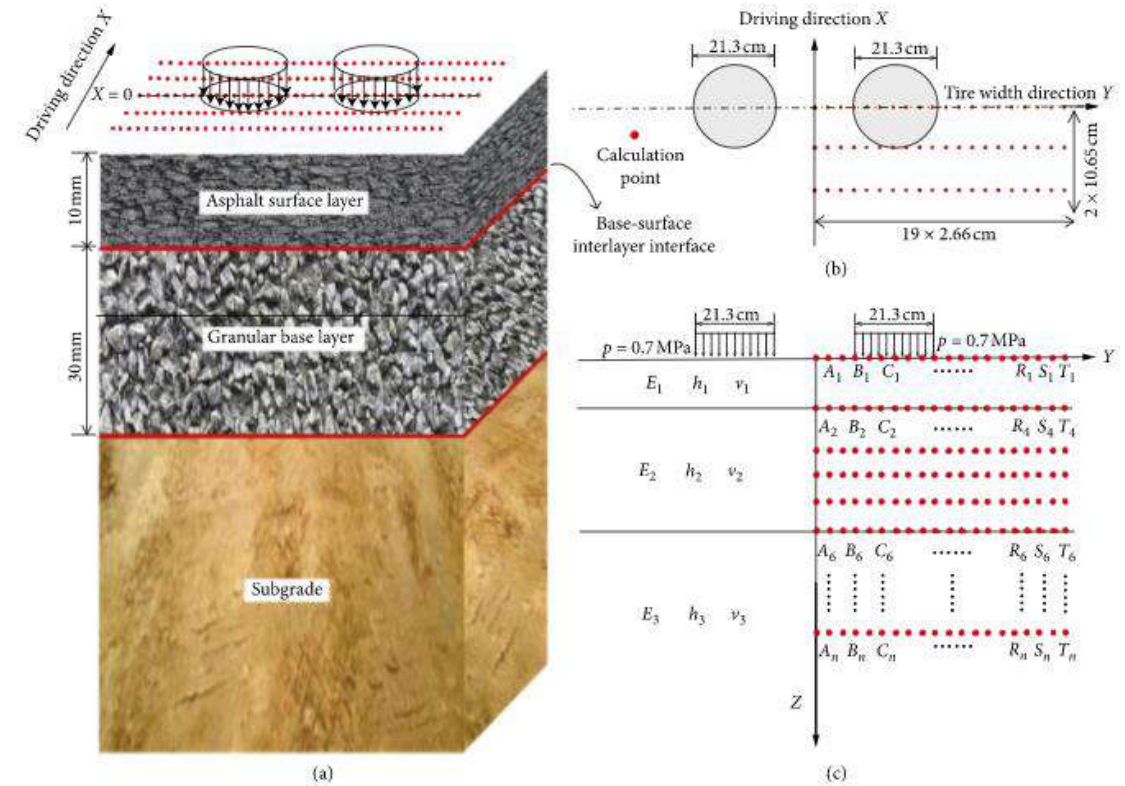
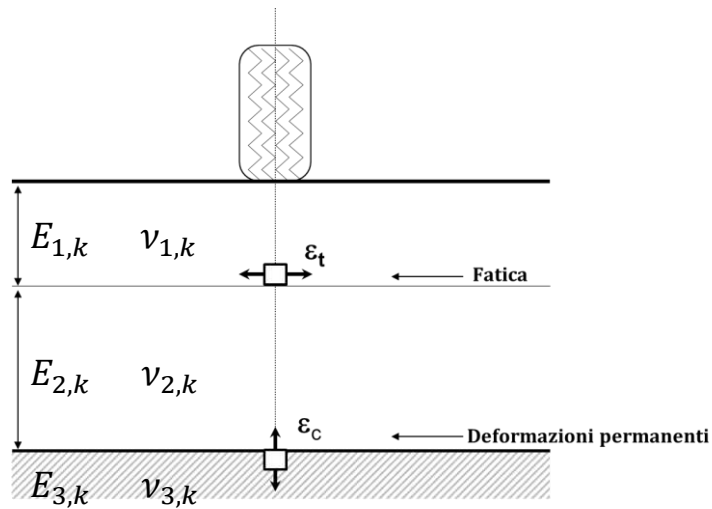


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Analisi strutturale

### Risposta tenso-deformativa

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



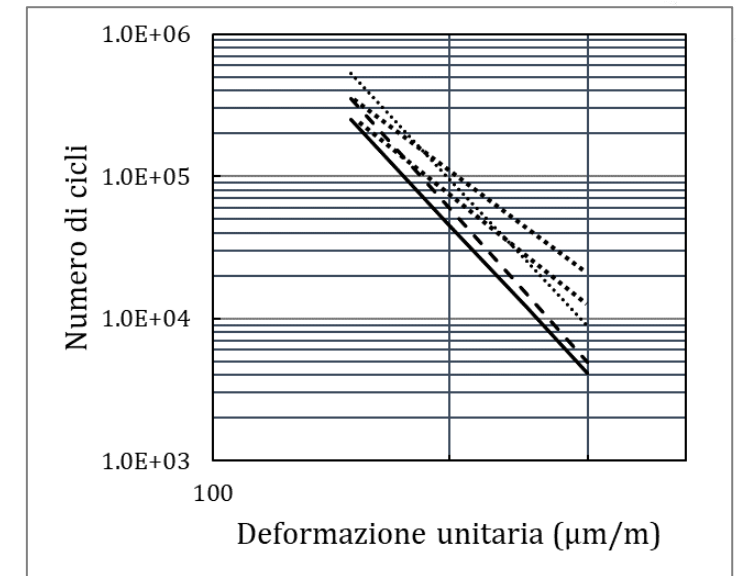
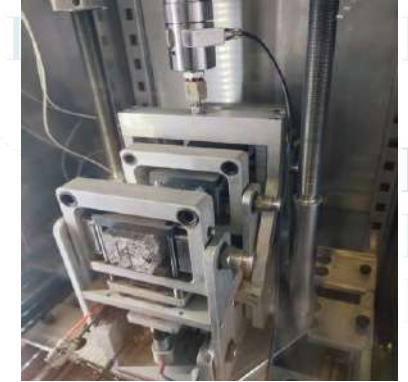
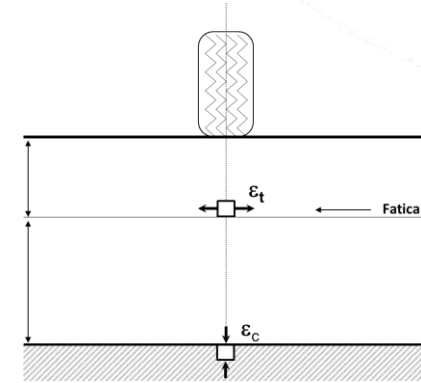
# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## 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
- $\varepsilon_t$ : Deformazione unitaria di trazione alla base dello strato in conglomerato bituminoso
- $E$ : Modulo elastico del conglomerato bituminoso



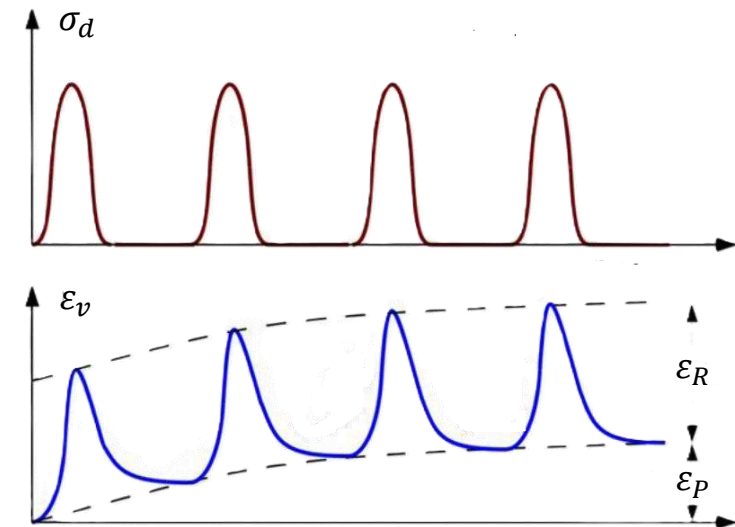
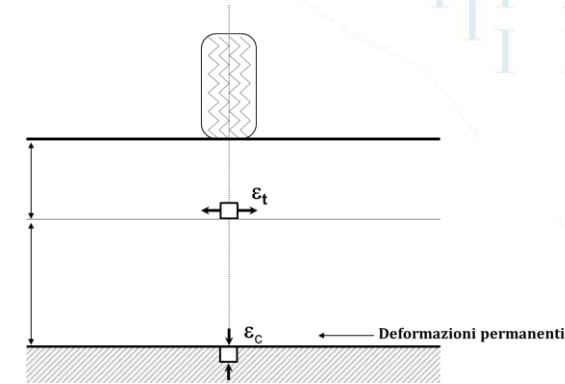
# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## 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
- $\varepsilon_c$ : Deformazione unitaria verticale di compressione sulla superficie del sottofondo



# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

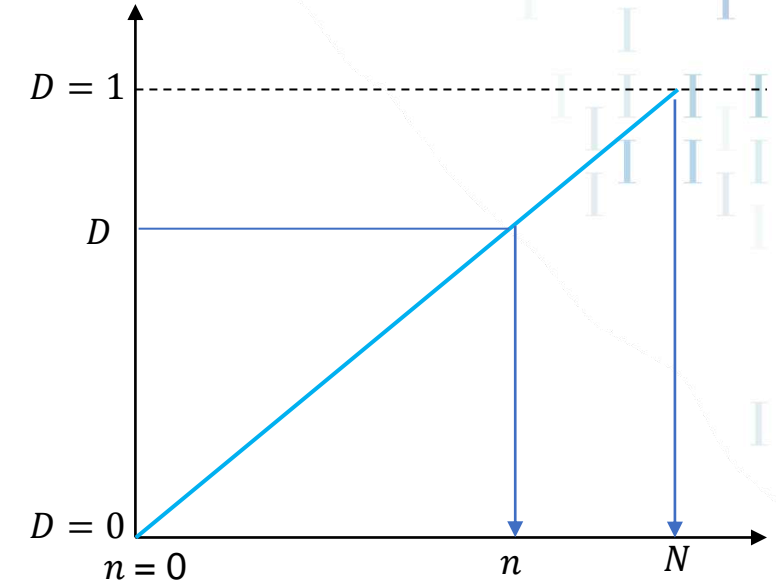
## METODO EMPIRICO-RAZIONALE – Verifica strutturale

### Calcolo del danno

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

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

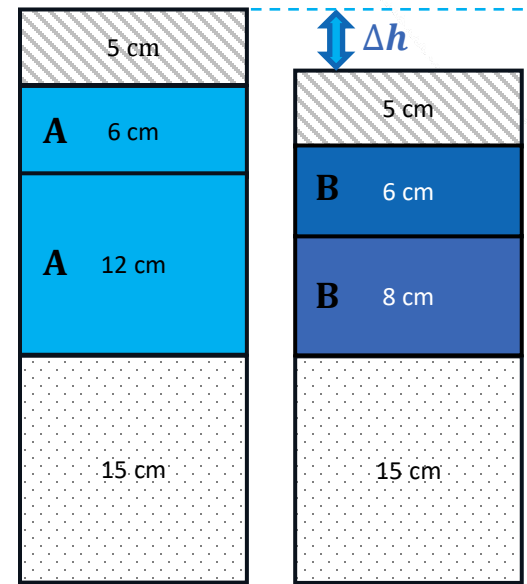
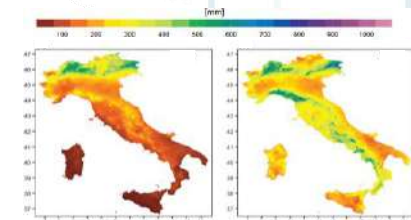
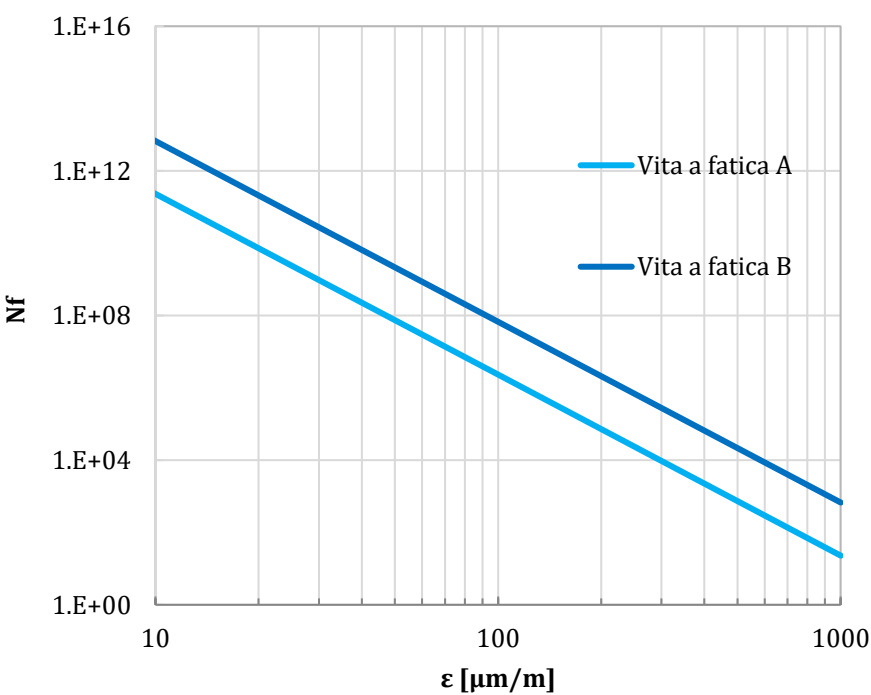
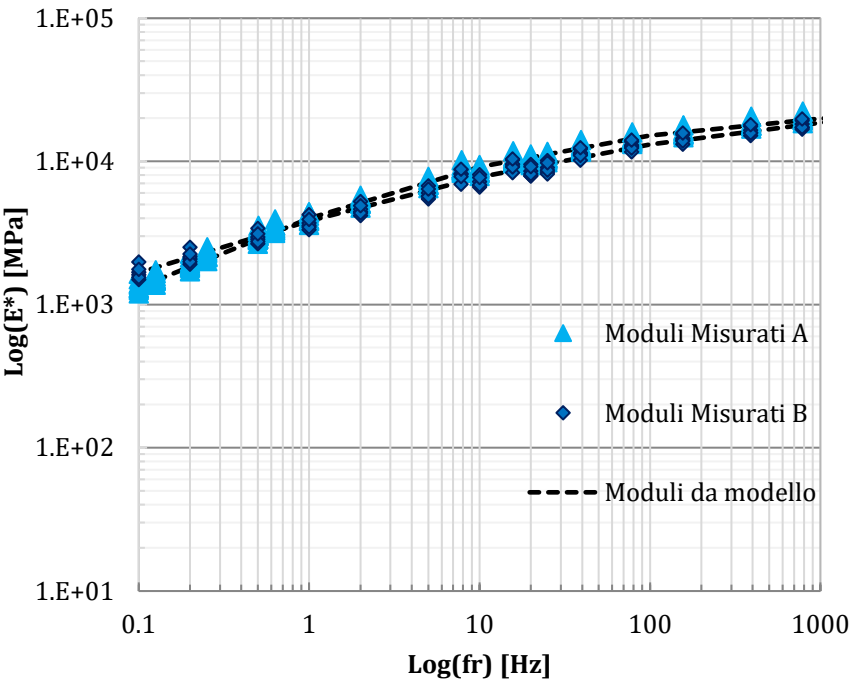
- $D_{f,d}$ : Danno per fatica ( $f$ ) o accumulo di deformazioni permanenti ( $d$ )
- $n_k$ : Numero di applicazioni di assi equivalenti nel generico periodo climatico  $k$
- $N_k$ : Numero di applicazioni di assi equivalenti nel generico periodo climatico  $k$  che determina il raggiungimento delle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



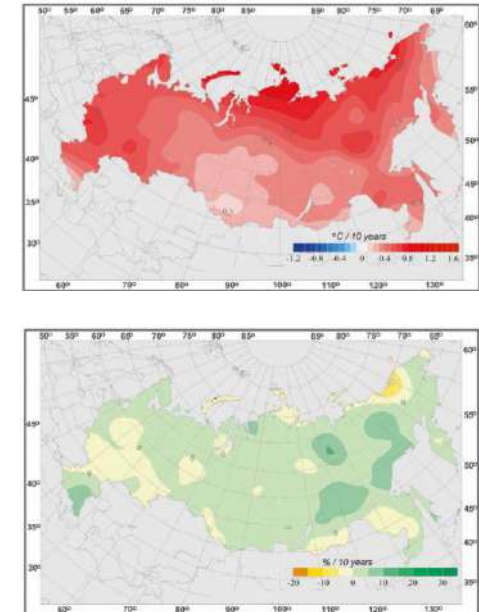
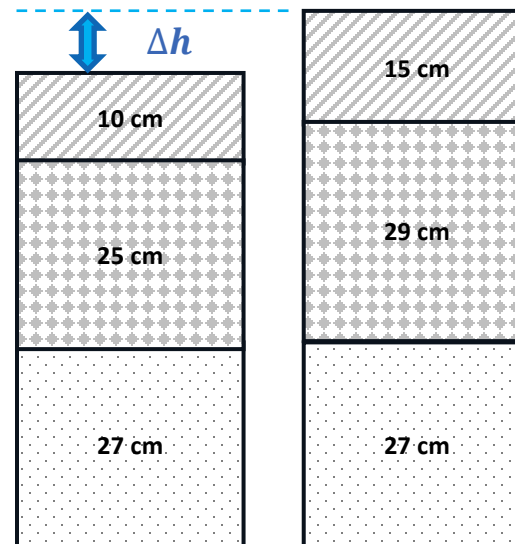
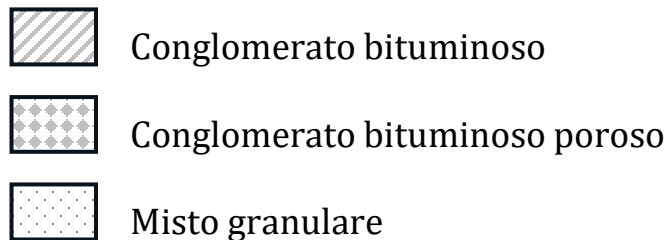


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

## 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 ( $\uparrow$ )



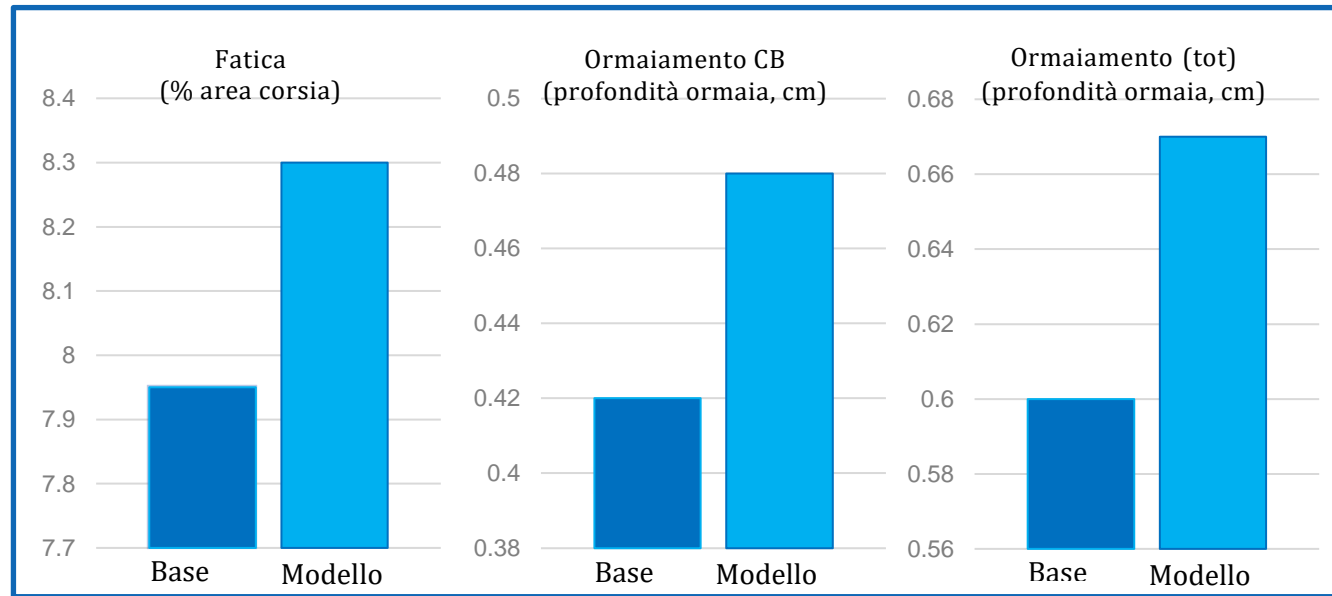


# Il Ruolo della Progettazione Strutturale nella Sostenibilità delle Pavimentazioni Stradali

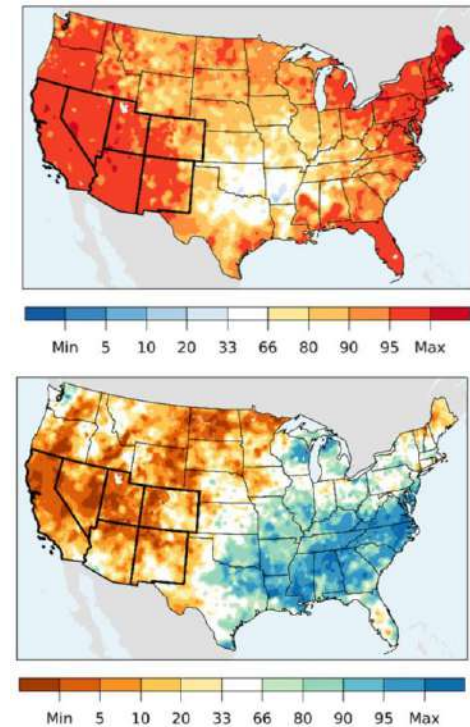
## CASO STUDIO 3

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



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**