



## I sistemi di pesa dinamica e la sicurezza delle infrastrutture

10 marzo 2023 – ore 9.00/13.30

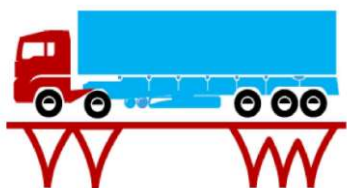
Cisco WebEx Ordine Ingegneri Napoli

**prof. Maria Rosaria Pecce** (Università di Napoli Federico II):  
Le applicazioni di pese dinamiche

**ing. Giovanni Bonini** (Movyon):  
Il sistema di pesatura dinamica per uso statistico e sanzionato



**prof. Iunio Iervolino** (Università di Napoli Federico II):  
La più grande base di dati WIM e le sue applicazioni per l'ingegneria strutturale



**ISWIM**  
International Society for Weigh in Motion

<http://www.is-wim.org/index.php?nm=2&nsm=3&lg=en>

Weighing in motion (WIM) e la International Society for WIM (ISWIM)

Un argomento in grande crescita con tecnologie in continua evoluzione,  
applicazioni, ricerca, convegni scientifici

Convegno internazionale di settore  
L'ultimo nel 2019

**ICWIM8**

**8<sup>th</sup> International Conference  
on Weigh-in-Motion**

**Il prossimo 9th International Conference on Weigh-In-Motion**

(ICWIM9) si terrà insieme al HVT17 dal 6 al 10 Novembre 2023 in Brisbane, Australia

### **Necessità di misurare i carichi in movimento sulle strade:**

-singole ruote, assi, interi mezzi

### **-Si misurano anche altre caratteristiche:**

- lunghezza dei mezzi, distanza tra gli assi, velocità di transito

- ✓ I sistemi di pesa dinamica cominciano a nascere negli anni '50 in Texas con lo scopo di dare informazioni alle normative sulla progettazione delle pavimentazioni stradali
- ✓ In Europa si sono sviluppati e diffusi diversi sistemi di pesatura dinamica negli anni '70
- ✓ Negli anni '90 sono state pubblicate le prime normative di riferimenti ASTM-1318 e i progetti di ricerca importanti anche in Europa (progetto Wave)
- ✓ Negli anni 2000 l'accuratezza dei sistemi WIM ha fatto grandi progressi e la ricerca e gli avanzamenti tecnologici si sono moltiplicati e continuano a crescere.

**Smart  
Infrastructures  
Academy**



## Tipi di pese dinamiche

Scales	Bilance
Strips and Bars	Strisce e barre
Multiple-sensor WIM	A sensori multipli
Bridge WIM	Ponte come sistema di pesatura
On-board WIM	Sistema di pesatura a bordo

**Importante distinguere il principio fisico alla base della pesatura e i sensori utilizzati per la misura delle grandezze.**

Qualsiasi sistema di misura è un trasduttore che può trasformare una grandezza da misurare in altre grandezze misurabili con opportuni strumenti meccanici o elettrici

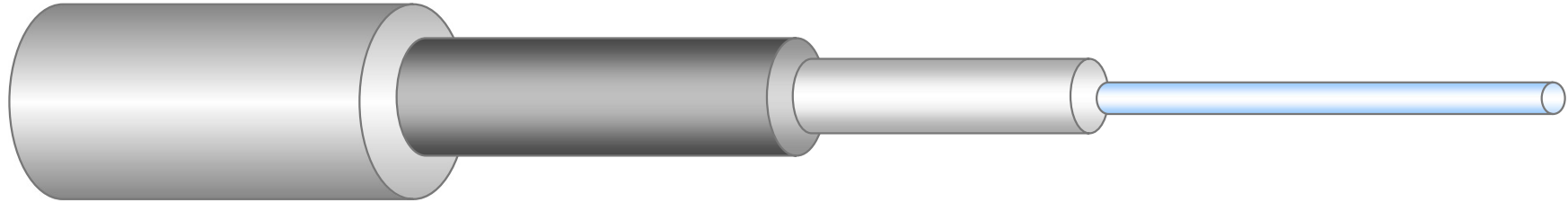
Il sistema di pesa dinamica non è costituito solo dalla pesa e dai sensori ma da un sistema integrato (hardware e software, telecamere, sistema esperto) che dalla lettura dei sensori fornisce le informazioni sui veicoli:

- Peso totale
- Peso per assi
- Distanza tra gli assi
- Numero di assi
- Velocità

## SISTEMA DI PESA DINAMICA

Tipo di sensori utilizzati:

Fibra ottica



Outer jacket    Aramid reinforcing fibres    Inner jacket    Fibre buffer    Fibre Sensor

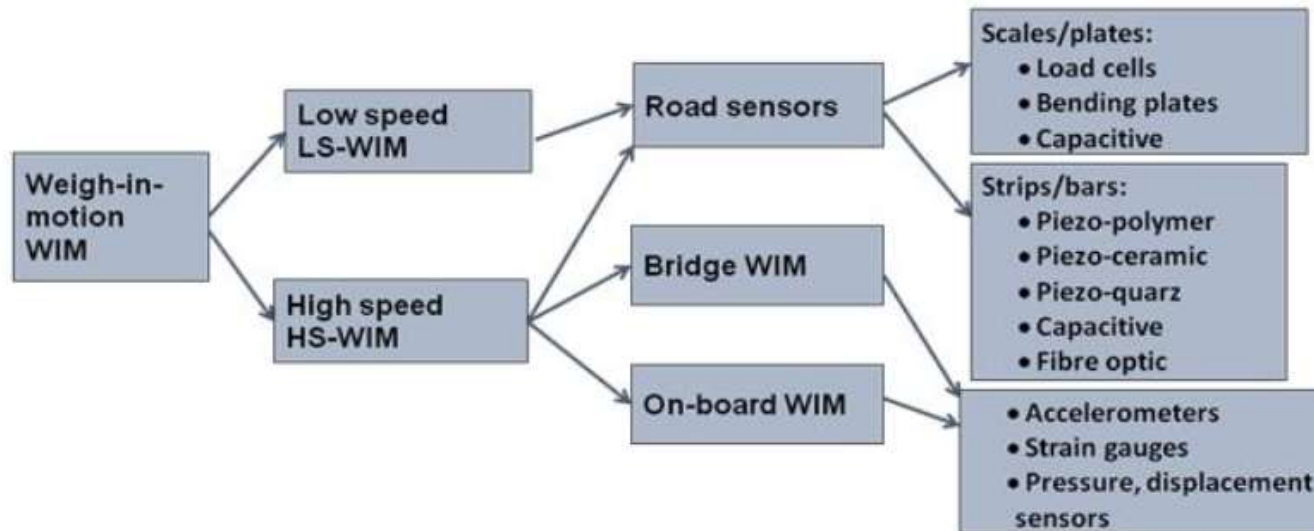
- **Reticolo di Bregg**
  - La deformazione della fibra modifica la lunghezza d'onda della luce riflessa quando si mandano onde luminose sulla fibra
  - Si utilizzano tecniche ottiche per determinare la deformazione dallo sfasamento dell'onda luminosa

Piezoelettrici (Quarzo, ceramici) naturali e artificiali

Utilizzano materiali cristallini che hanno la capacità di polarizzarsi generando una differenza di potenziale elettrico quando sono soggetti a una deformazione meccanica (**effetto piezoelettrico diretto**) e al tempo stesso di deformarsi in maniera elastica quando sono sottoposti ad una tensione elettrica.

- *LS-W.I.M.* a bassa velocità
- *HS-W.I.M.* ad alta velocità

## Scelta in base alla velocità



### MODALITA' DI MONITORAGGIO TRAMITE DISPOSITIVI W.I.M.

MISURA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DEL FLUSSO VEICOLARE	Volume di traffico	Classificazione veicolare	Numero di assi	Distanziamento tra gli assi	Peso complessivo	Peso per singolo asse	Velocità	Headway	Gap	Lunghezza dei veicoli	Tempo di occupazione
APPLICAZIONI IMPLEMENTATE	Progettazione di strade e ponti			Manutenzione delle pavimentazioni		Controllo soglie di pericolo sovraccarico			Gestione del traffico		
TIPOLOGIE DI SISTEMI W.I.M.	INSTALLAZIONI FISSE	Sistemi di pesatura a piastra	Sensori capacitivi								
			Bending plates								
			Sensori a celle di carico								
		Sistemi di pesatura con sensori a barra	Cavi piezoelettrici e sensori BL								
			Sensori al quarzo								
			Sensori a fibra ottica								
		Sistemi di pesatura a ponte									
		Sistemi di pesatura Multisensor									
	INSTALLAZIONI PORTATILI	Sensori capacitivi									
		Sensori piezoelettrici									
Bridge W.I.M.											



## SCALES (balance)

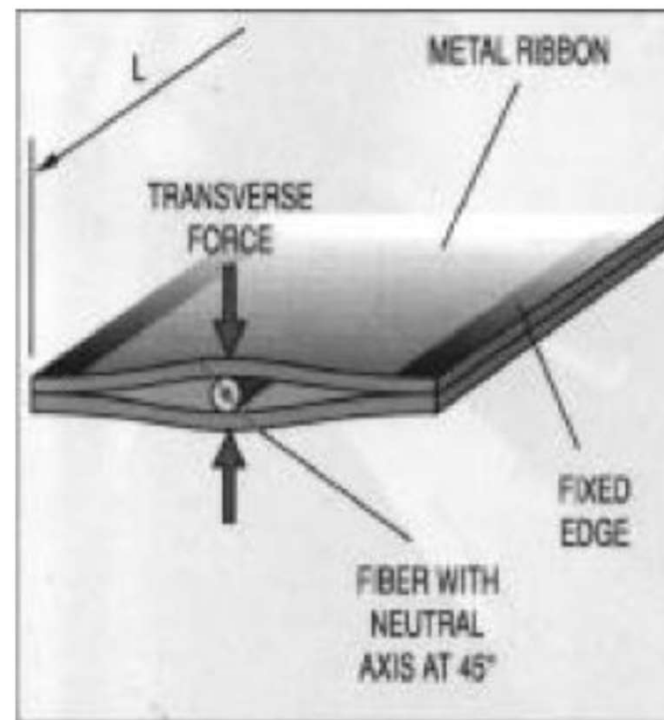
I sistemi a bilancia sono costituiti da una piastra metallica con dimensioni tali da garantire il passaggio di una ruota singola o di un asse



2 tecnologie principali di bilance:

- Piastra rigida appoggiata su celle di carico che misurano il carico. La piastra deve essere rigida per garantire una distribuzione dei carichi sulle celle nota. Il sistema è molto accurato ma molto costoso, va bene per basse e alte velocità.
- piastra deformabile inflessa appoggiata sui bordi con sensori di deformazione all'intradosso. Inserendo i sensori in diversi punti è possibile correlare la deformazione della piastra con il carico che si può trovare in posizioni diverse. E' più economico ma meno accurato, è utilizzato anche per alte velocità.

## Pese con celle di carico in fibra ottica

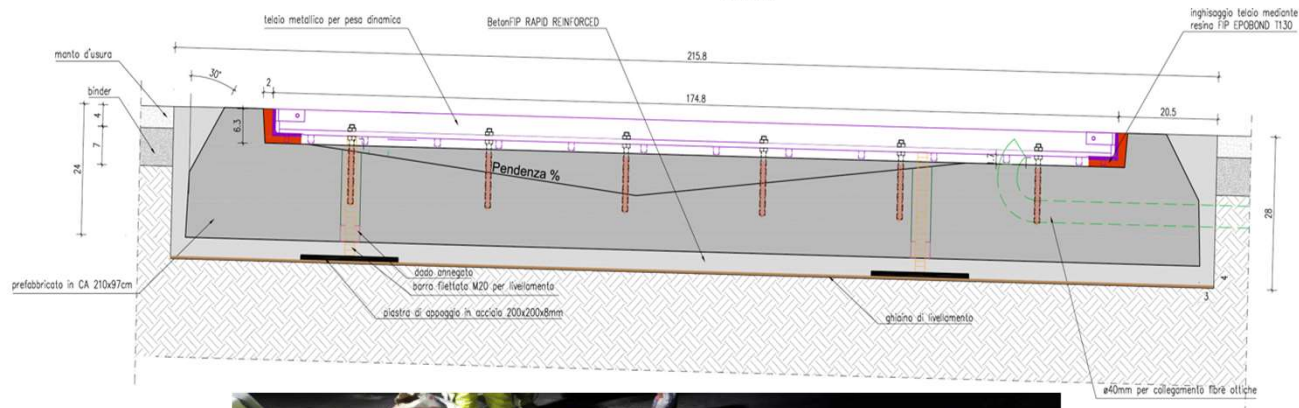


Una pesa dinamica installata e calibrata può fornire il peso di un veicolo pesante con il 6% nel 95% dei casi. Questo tipo di pese è utilizzata in siti particolarmente importanti o per applicazioni industriali e militari. Richiede uno scavo più limitato rispetto alle pese a piastre.

# Pesa a piastra (esempio montaggio su strada)

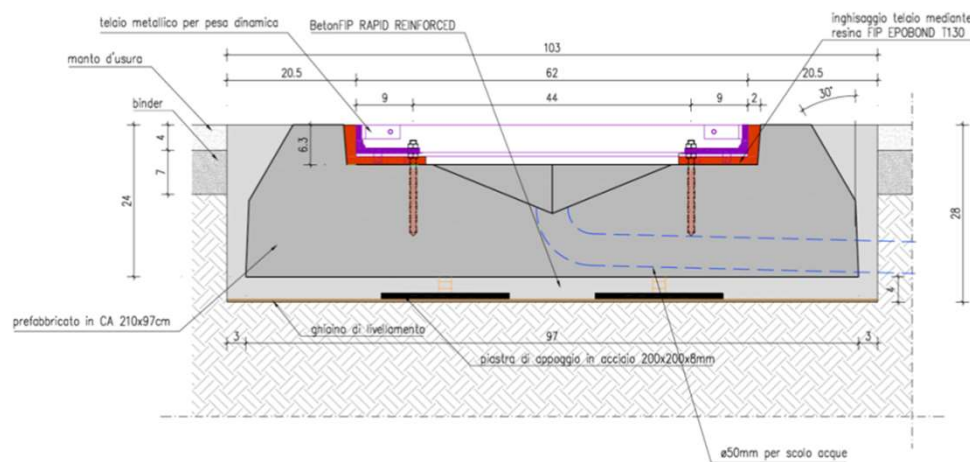
SEZIONE A-A

Scala 1:5

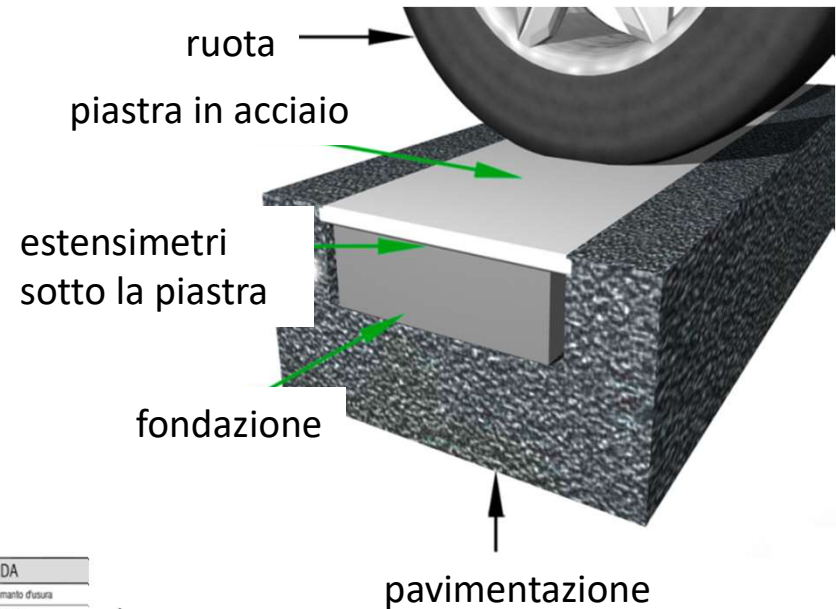


SEZIONE B-B

Scala 1:5

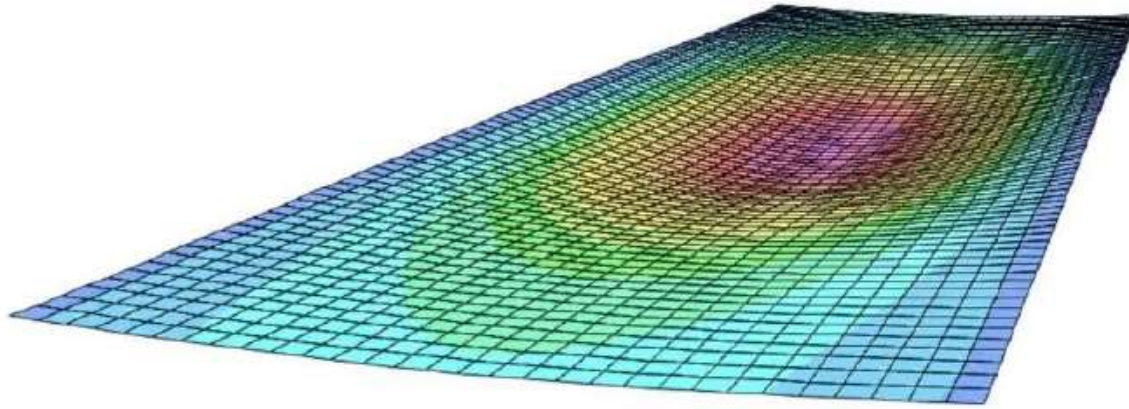


LEGENDA	
	manto d'usura
	binder
	telajo metalico
	elemento prefabbricato in CA
	resina FIP EPOBOND T130
	ghiaia di livellamento
	BetonFIP RAPID REINFORCED
	scarichi acque
	passaggi elettrici





## Pesa dinamica (tipo bilancia) a piastra



Mediante un modello strutturale si stabilisce la relazione tra il carico e la deformazione della piastra.

La deformazione della piastra viene misurata con sensori

I sensori in fibra ottica consentono di misurare la deformazione in molti punti

La risposta elastica di una piastra dipende da:

- materiale (acciaio in campo elastico)
- vincoli (appoggiata sul bordo)
- posizione dei carichi (si considerano tutte le posizioni)
- area di impronta del carico
- valore del carico
- effetto della temperatura

Tutti gli effetti devono essere tenuti in conto per ottenere l'accuratezza necessaria

Classe di precisione 10  
10% sul massimo carico



## Sistema iWIM 50-10

### PIANO DI CARICO

Tecnologia	Sensori Fibra Ottica
Dimensioni LxAxP	151x62x5 [cm]
Numero di piani di carico per sistema	2
Material	Acciaio Inox AISI 316L
Distanza sistema acquisizione	5 ÷ 1000 [m]
Collegamento	Ottico
Alimentazione	Non richiesta (utilizzo fibra ottica)

### SPECIFICHE (OIML R134)

Classe di precisione	10
Range di velocità	5 ÷ 50 [km/h]
Peso minimo per asse	1,5 [ton]
Peso massimo per asse	20 [ton]
Direzione di transito	Ambo i sensi

### SPECIFICHE DI ACQUISIZIONE

Dimensioni	Rack 19" 2U
Range temperatura	da -10 a 40 [°C]
Umidità	Fino 85%RH
Collegamento al piano di carico	Cavo Fibra Ottica
Interfaccia utente (WEB)	Accessibile da PC, tablet e smartphone
Alimentazione	110-220 [Volt] 50/60 [Hz]
Optional	stampante - database personalizzabile



Range di velocità

Tabella 11 – Interfaccia utente

### INTERFACCIA UTENTE

Accesso da remoto
Smartphone, tablet e/o computer
Database facilmente integrabile con altri sistemi

#### DATI RILEVABILI

ID veicoli
Data e ora transito
Peso complessivo
Velocità di transito e accelerazione
Segnalazione errori

#### FUNZIONI

Ricerca veicolo
Informazioni sugli assi
Analisi eventuali errori
Stampa informazioni veicolo

Peso(kg)	6297	5074	2949	2771	2831
Vel (km/h)	26	25	26	26	26
Peso(kg)	3206	2502	1559	1348	1230
Distanza	3.83 m	5.64 m	1.29 m	1.31 m	
Peso(kg)	3091	2571	1391	1423	1601

International Organization of  
Legal Metrology



Smart  
Infrastructures  
Academy

TECNE  
Sustainable  
Engineering

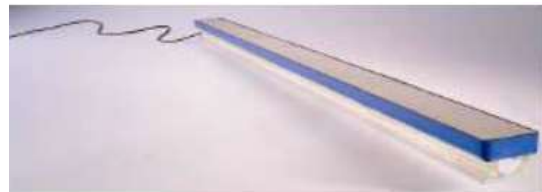
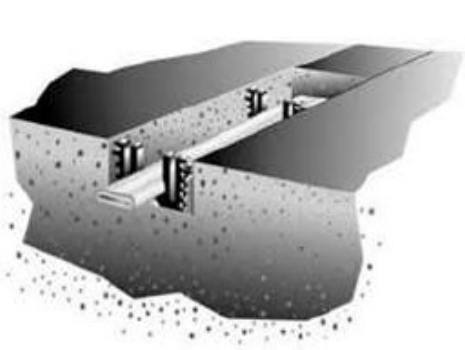


## Strips and Bars (strisce e barre)

Strisce e barre sono state le soluzioni introdotte negli anni '70 perché sono a basso costo e poco invasive.

Le barre di dimensioni circa 4cm si installano in scanalature di profondità e larghezza 6-8cm. La lunghezza dipende dalla necessità di misurare singole ruote (0.75-1m) o assi (3-4m). Le strisce hanno dimensioni di circa 2cm e si installano in scanalature di 3-5cm. La lettura della pressione viene fatta con diversi tipi di strumenti.

**La deformazione dell'elemento è sensibile alla deformabilità della pavimentazione perché avendo una piccola dimensione si deforma anche quando la ruota è sulla parte di pavimentazione vicina. Può essere importante integrare il sistema con la misura della velocità del mezzo per collegare la risposta in pressione con la posizione della ruota.**



Sensore al quarzo

Il quarzo è dotato di una sensibilità piezoelettrica maggiormente stabile nel tempo, risente meno delle variazioni di temperatura (resiste a temperature fino a 500°C e non richiede correzioni di temperatura), ha un'elevata linearità, isteresi trascurabile ed alta rigidità, grazie alla quale è possibile una costruzione a stato solido con una sensibilità unidirezionale ed una rigidità adatta alla pavimentazione.





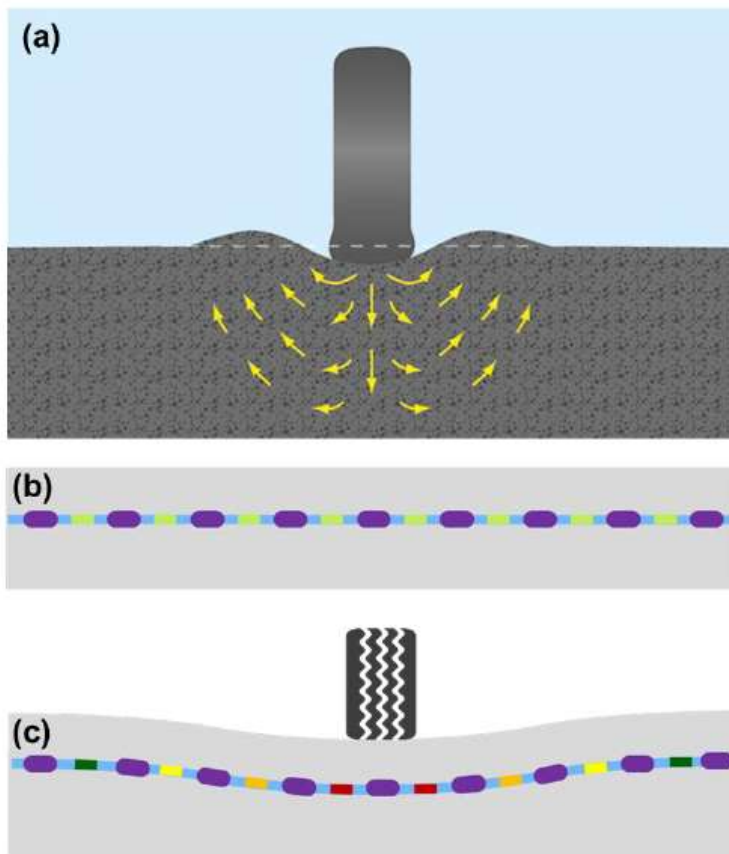
The most common technologies available on the market are:

- Piezo-polymer strips and bars: the cheapest technology, but also the less accurate and quite sensitive to the temperature;
- Piezo-ceramic bars (in some cases nude cables are also used for lower accurate measurements): are an intermediate solution (accuracy and cost), which was widely used in the 80s and 2000s;
- Piezo-quarz bars: the most accurate and expensive technology, which provide on a smooth pavement an accuracy comparable to the bending plates; this technology is the mostly used since 2010.
- Strain-gauge strip sensors behave as a bending structure/beam but in the form of a bar; this technology was introduced in 2014.

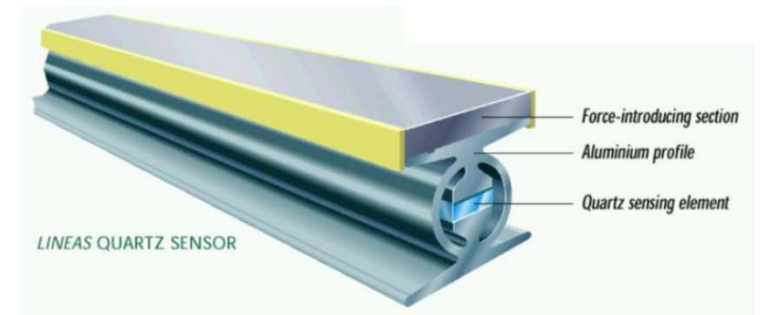
Before 1995 capacitive strips and bars were marketed. Fiber optics bars were also studied and prototypes were experienced, but are not yet marketed on a large scale.







Grande importanza della manutenzione della pavimentazione



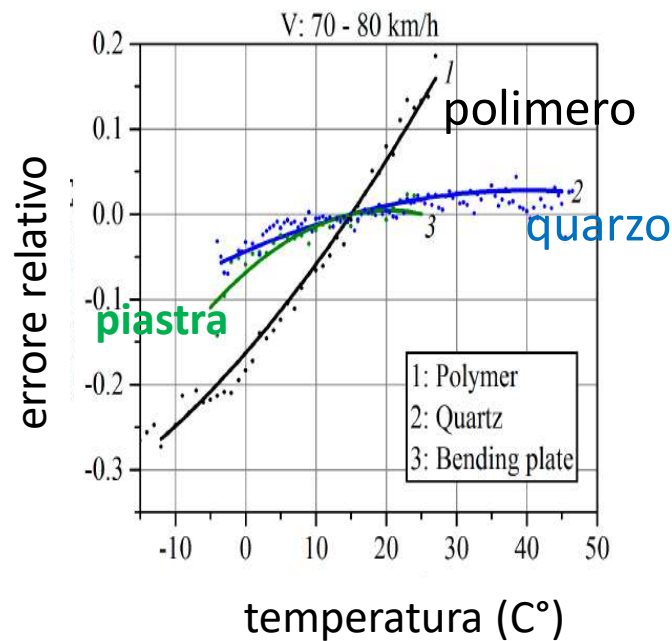
(a) deformazione della pavimentazione. (b) fibre ottiche  
(c) deformazioni dei singoli sensori. (d) tipica fibre annegata nella pavimentazione

Una tipica installazione delle fibre nelle pese con fibre ottiche presenta una linea di estensimetri in fibre ottiche annegata nell'asfalto con un campionamento di 2000 letture al secondo. I sensori dovrebbero essere installati nel secondo strato di asfalto ad una profondità di 15-20cm dalla superficie. La pavimentazione realizzata al di sopra dei sensori protegge i sensori.

# Parametri che influenzano le strisce e le barre WIM

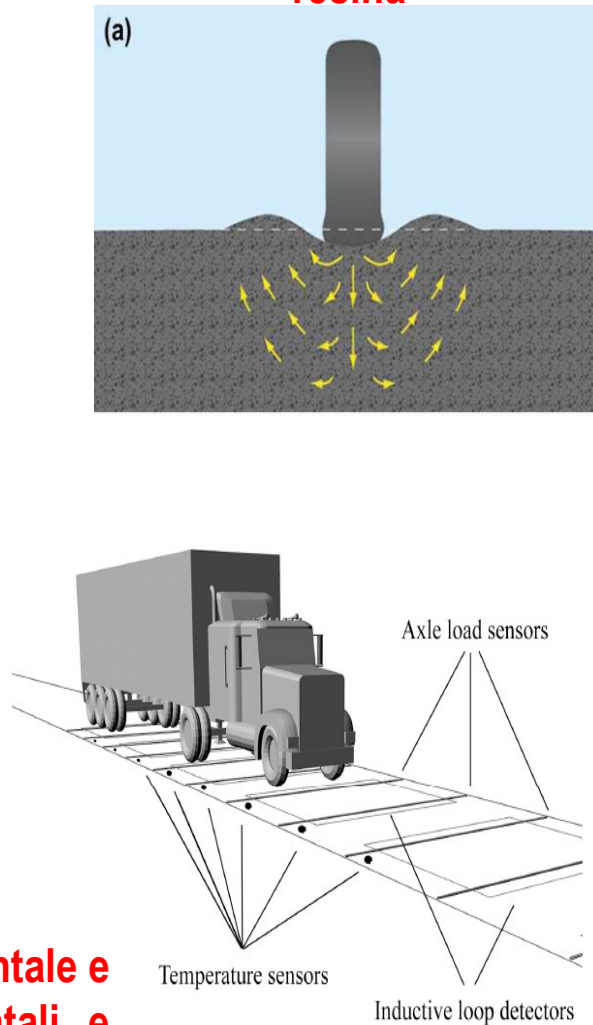
- umidità
- temperatura
- deformabilità della pavimentazione
- caratteristiche della resina

**Effect of the temperature on the various types of sensors**



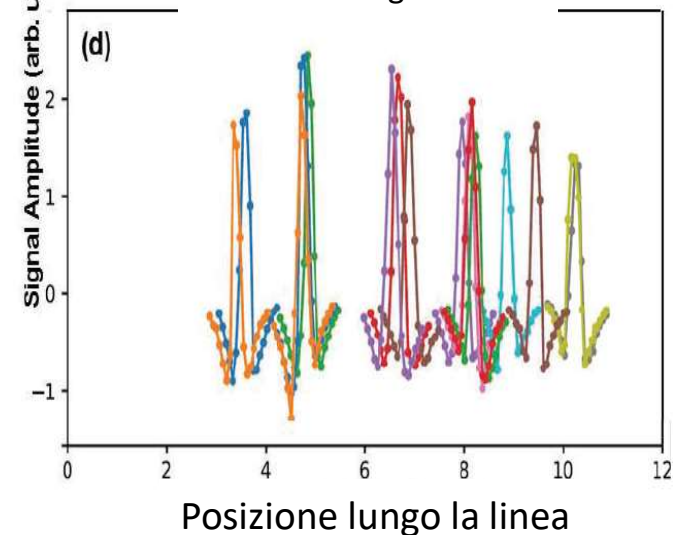
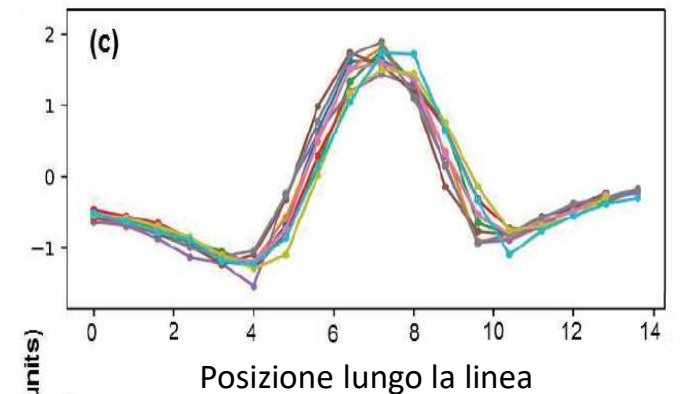
**La calibrazione del sito è fondamentale e dipende dalle condizioni ambientali e dalla pavimentazione stradale**

**Effetto della deformabilità della pavimentazione e della resina**



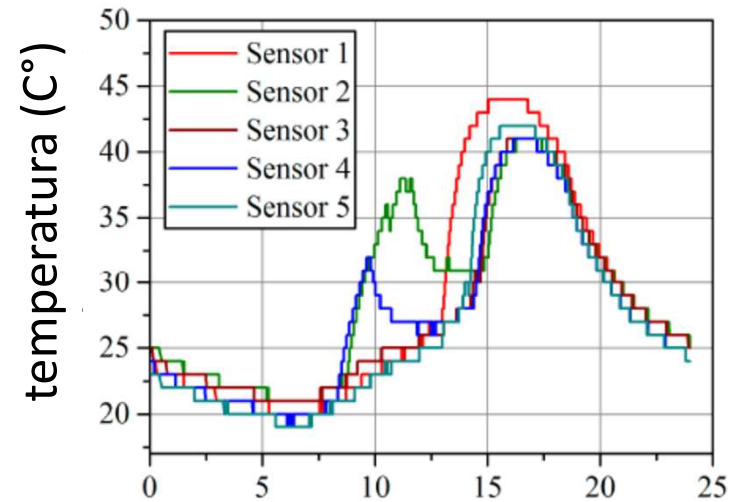
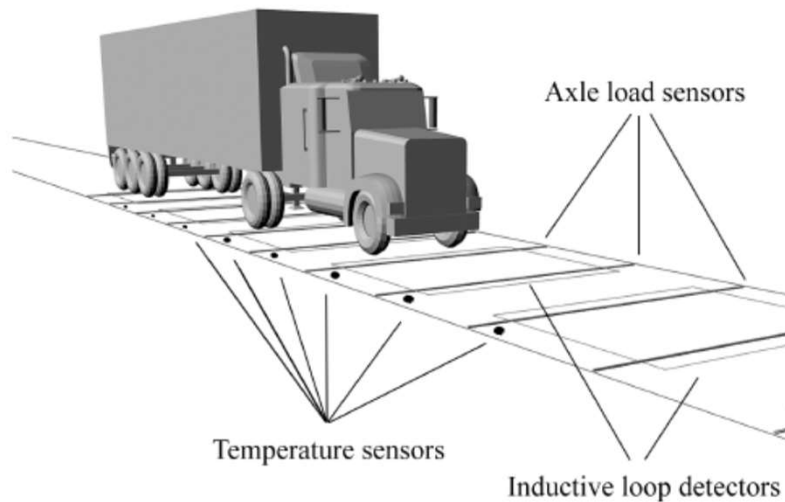
**c) Ripetibilità della misura dello stesso veicolo con lo stesso tipo di sensori**

**d) Misure dello stesso veicolo in 3 punti lungo la stessa strada**

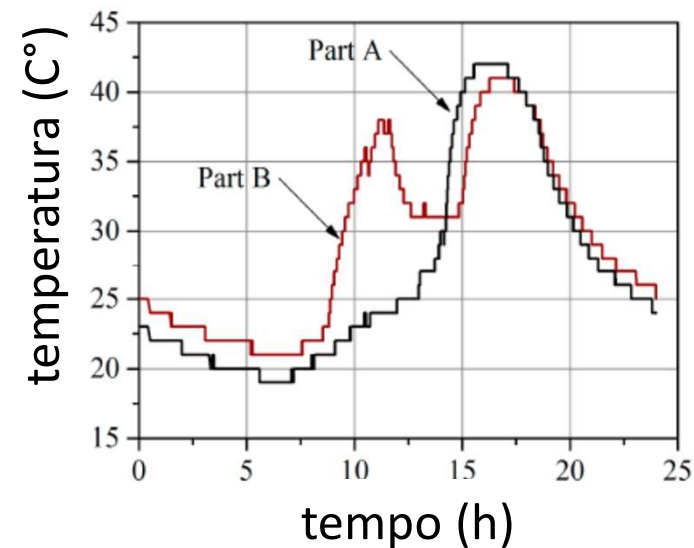
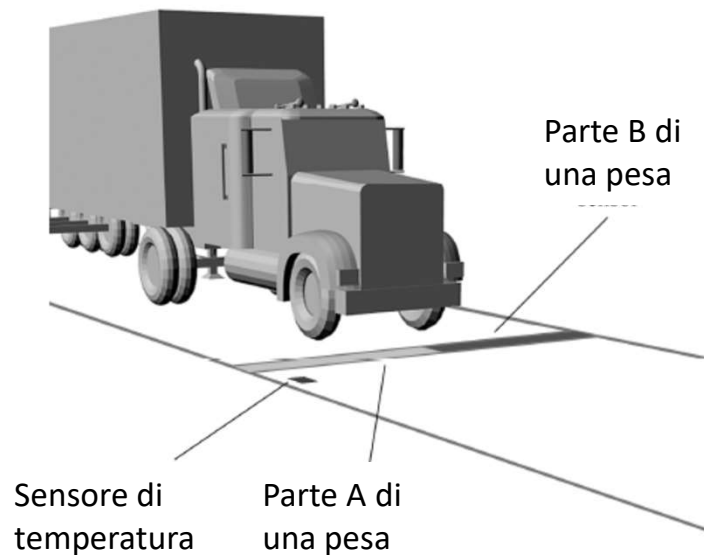


# Effetto della temperatura nella pavimentazione: difficile sperimentazione

## Effetto della variazione di temperatura longitudinalmente

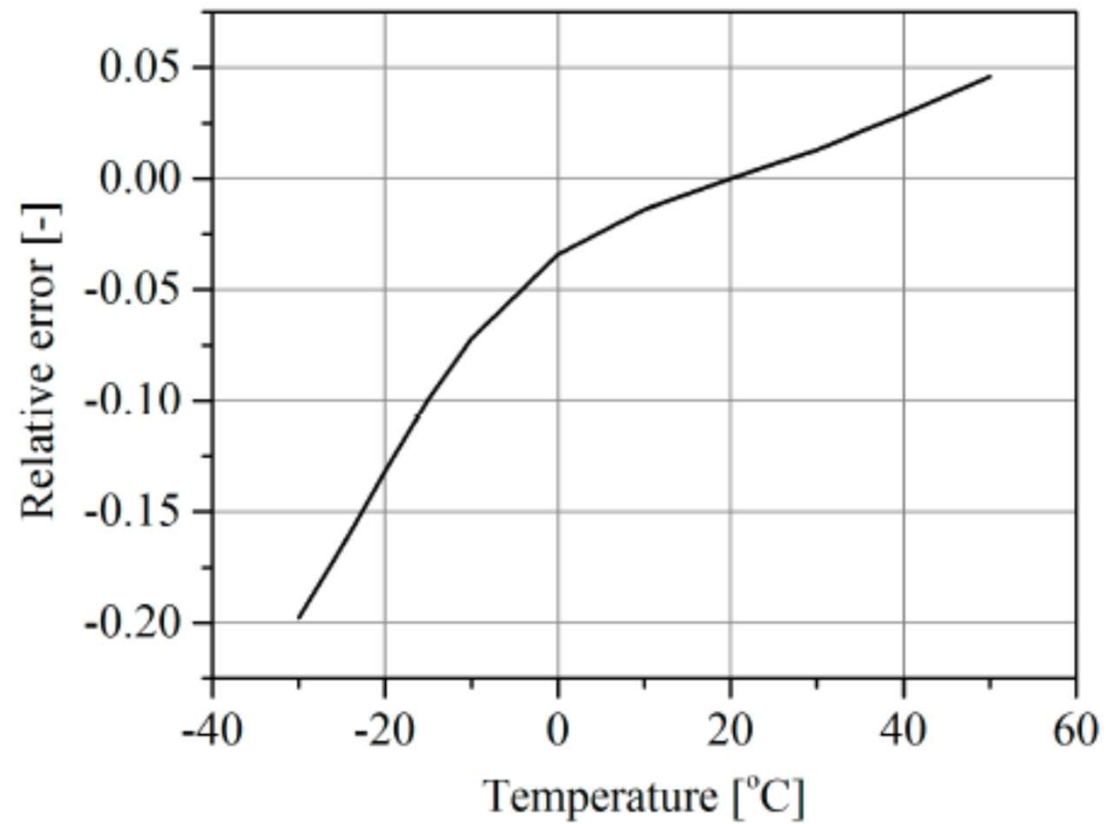


## Effetto della variazione di temperatura trasversalmente



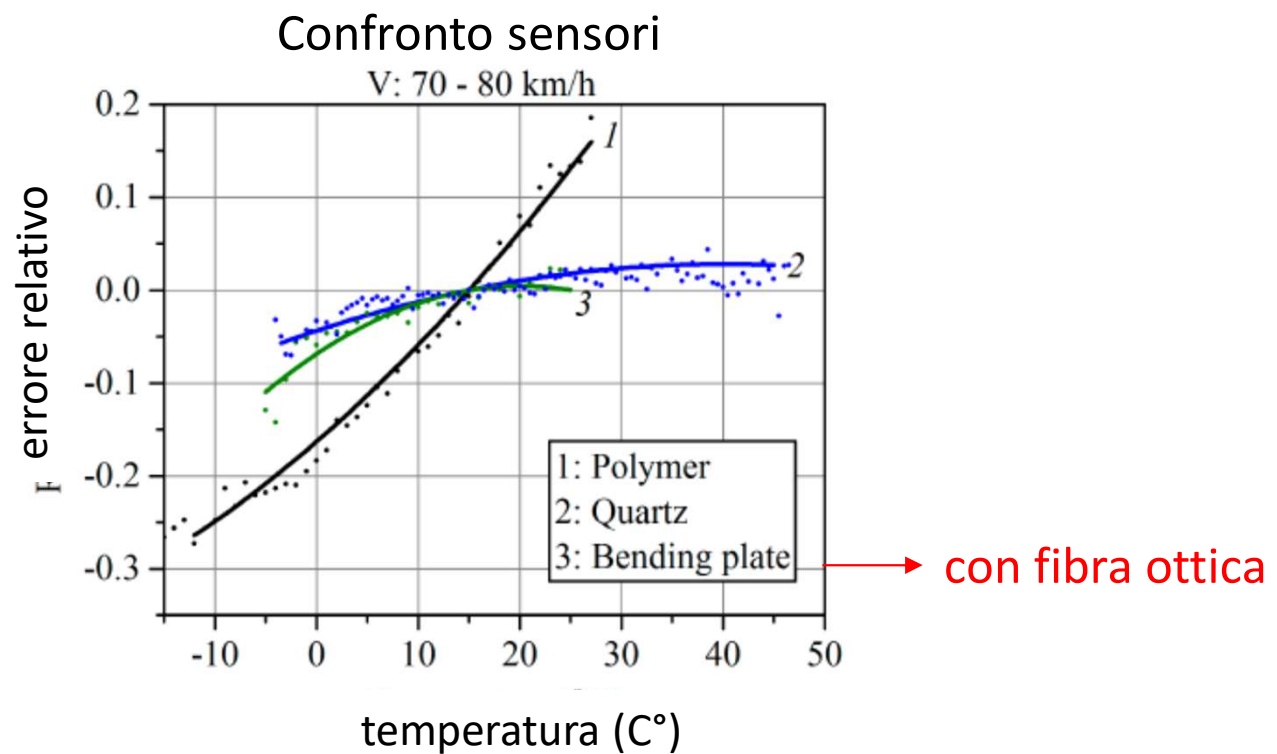
Calibrazione in diversi periodi della giornata e dell'anno

## Effetto della temperatura



Errore di una pesa con sensori piezoelettrici dovuto solo alla temperatura

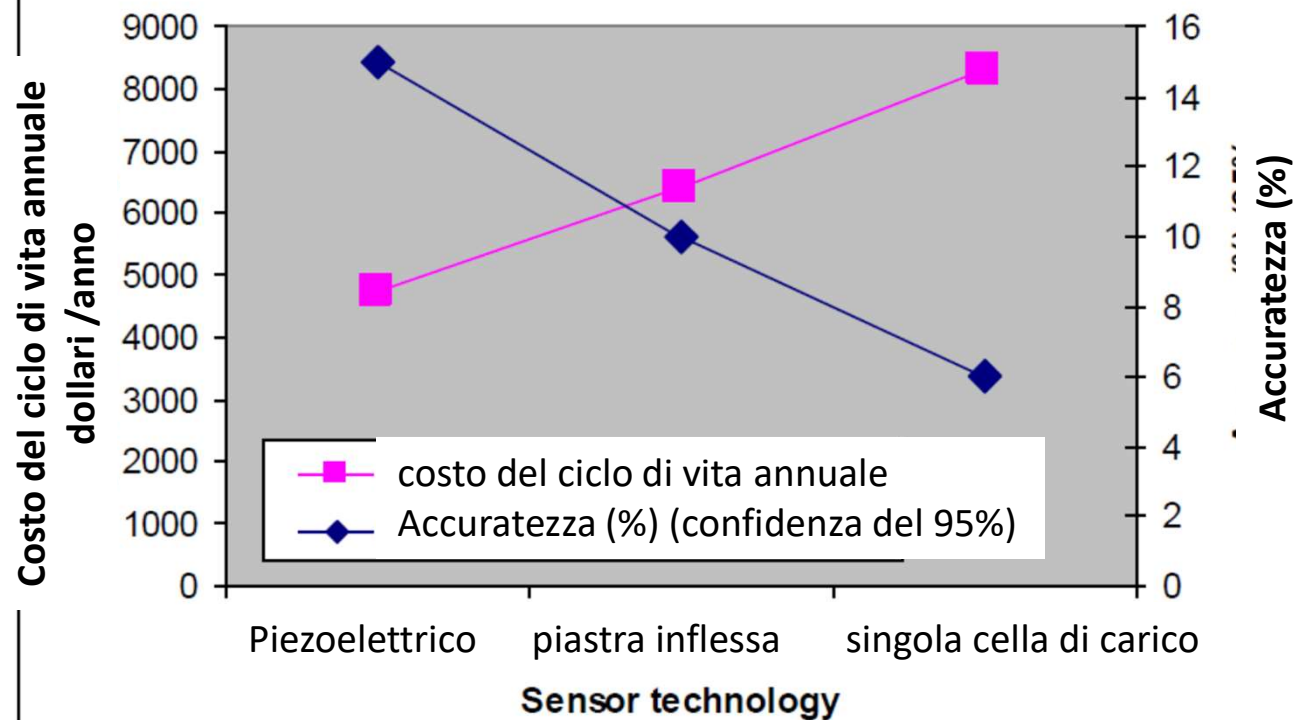




L'errore intrinseco dipende dalla variazione dei parametri elettrici dei sensori in funzione della temperatura. Oltre a questo errore si aggiunge l'errore dovuto alla installazione nella pavimentazione.

I sistemi di pesa che utilizzano **sensori polimerici** sono **più sensibili alle variazioni di temperatura** rispetto ai sensori a quarzo e alle piastre. Per questo tipo di sensore **la variazione di temperatura da 10° a 30° può produrre un errore fino al 50%**, mentre con i **sensori al quarzo si ha un errore del 7%**, pertanto è possibile non utilizzare una correzione software.

## Confronto sensori WIM costi e accuratezza



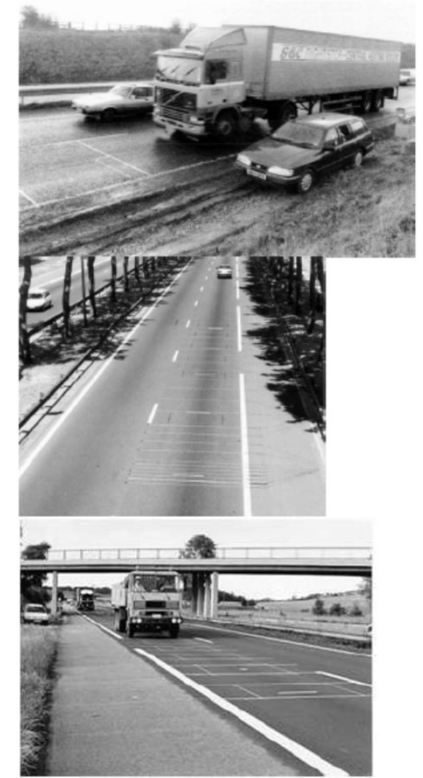
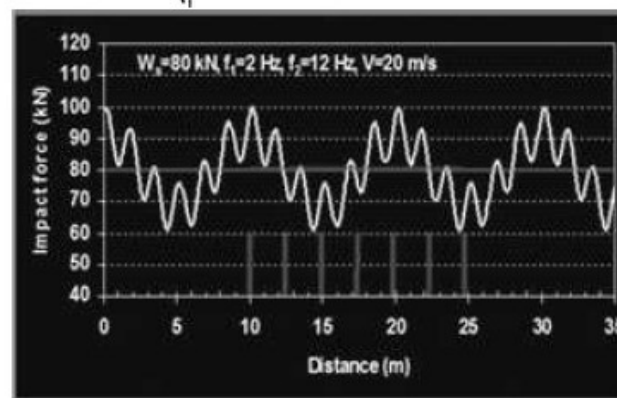
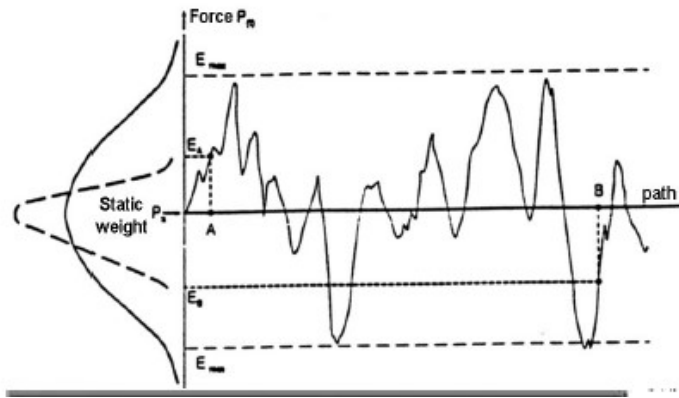
## Multiple-sensors WIM (sensori multipli)

Il carico istantaneo di una ruota, asse o serie di assi dipende da vari parametri:

-Il valore statico, la ruvidezza della pavimentazione, la velocità e le sospensioni del mezzo.

Per aumentare l'accuratezza dei sistemi WIM può essere importante misurare lo stesso carico in più punti lungo il percorso stradale.

L'analisi dei dati può consentire di approssimare meglio il valore statico.



Se la forza di impatto si modella come sinusoidale con frequenza media  $f$ , velocità media  $V$  e una spaziatura uniforme  $d$  dei sensori, Cebon e Winkler propongono la seguente relazione.

$$d = \frac{2(N - 1)V}{f N^2}$$

Il progetto di ricerca WAVE ha mostrato che 10-12 sensori perfetti l'accuratezza può arrivare al 2% mentre con sensori reali tra 6-12 si arriva a 7-10%.

## Bridge WIM (Ponte come sistema di pesatura)

Il Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM) è stato introdotto alla fine degli anni '70 negli Stati Uniti.

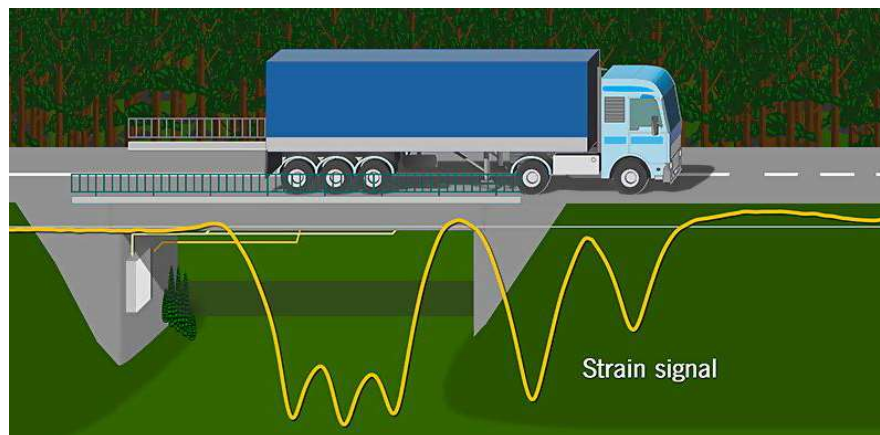
Un ponte esistente è stato usato come misuratore dei carichi dovuti agli assi degli autocarri.

Sono stati sviluppati molti progetti di ricerca per utilizzare i ponti come misuratori dei carichi impiegando soprattutto trasduttori di spostamento ed estensimetri. Attualmente ci sono molte applicazioni. Il sistema evita di avere attrezzature sul ponte che possono essere pericolose per i conducenti e l'attrezzatura può essere montata e smontata facilmente.

I ponti devono essere selezionati in base al livello di accuratezza che possono garantire.

Si utilizzano diversi tipi di ponti, molto raramente quelli in muratura.

Poiché si utilizza l'intero ponte o una sua campata le misure possono essere molto accurate ma sulla pavimentazione non ci devono essere imperfezioni importanti (buche ).



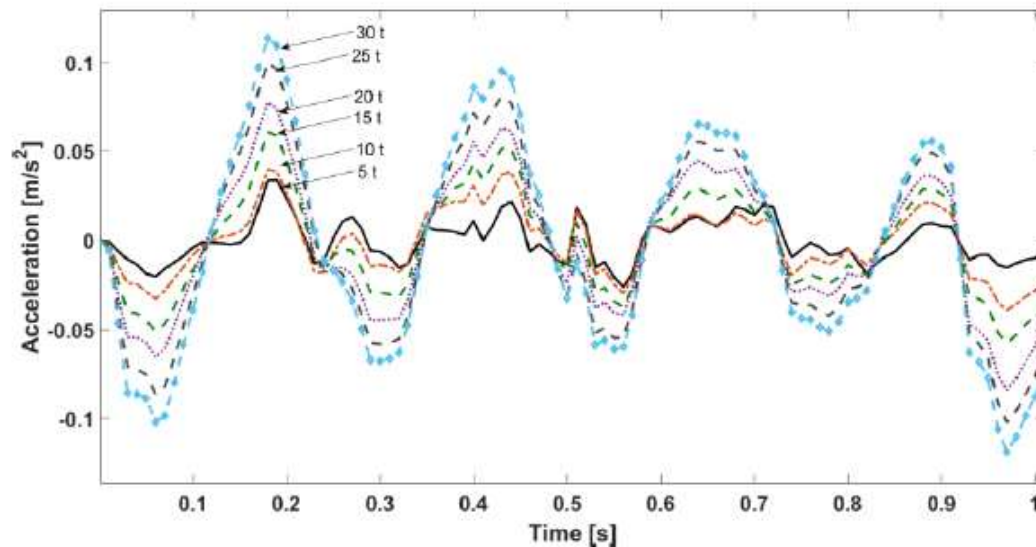
Smart  
Infrastructures  
Academy

TECNE  
Sustainable  
Engineering

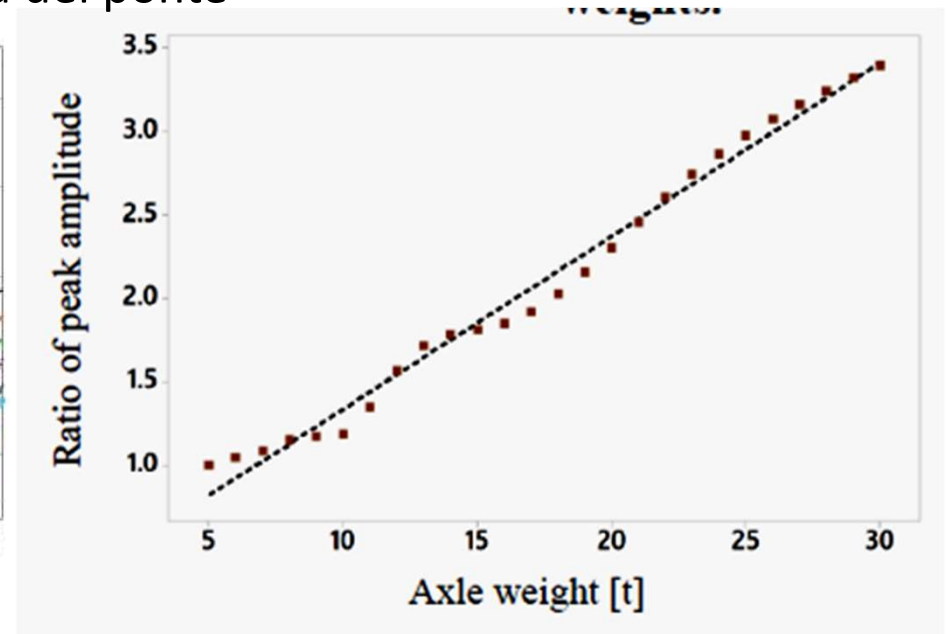




## Risposta dinamica del ponte



Accelerazione in campata per il peso del singolo asse



Ampiezza di picco dell'accelerazione in rapporto di quella relativa a un asse di 5t

La possibilità di utilizzare il sistema come pesa richiede la modellazione della risposta dinamica del ponte anche per effetto del carico viaggiante ad una certa velocità. Confrontando la risposta in accelerazione in un punto del ponte si rileva che la risposta cambia in base al peso del veicolo tra 5t e 30t considerando la stessa velocità. Poiché la massa considerata è leggera rispetto al peso del ponte la forma della risposta rimane pressoché la stessa. Il rapporto dell'accelerazione di picco al variare del peso dell'asse rispetto al caso di 5t risulta lineare.

## On-board WIM (sistemi di pesatura a bordo)

Il sistema di sensori è costituito da celle di carico, trasduttori di pressione e strain gauges, cavi e una box.

La box contiene il sistema di elaborazione e trasmissione.

Il mezzo viene pesato generalmente quando è fermo ma attualmente sono disponibili anche sistemi di pesatura quando è in movimento.

Ci sono anche sistemi attivi che bilanciano i carichi sugli assi.



Load cell sensor



Air pressure sensor

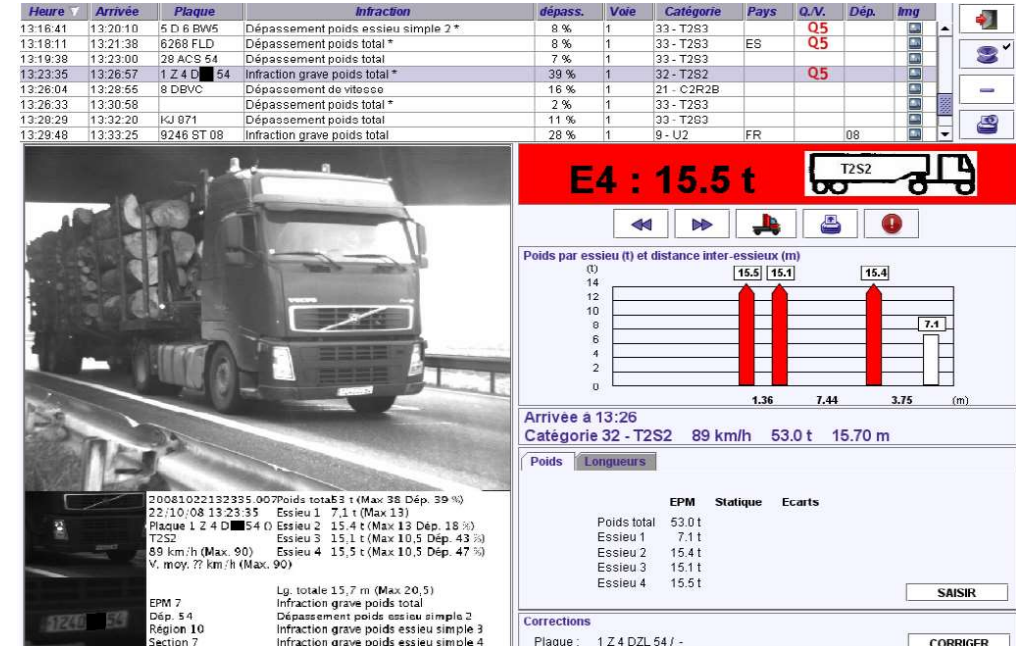


Strain gauge sensor

I sistemi on board sono i più affidabili attualmente 2% di accuratezza nel 95% delle misure.

Sono disponibili diversi sistemi anche di costo contenuto.

# Applicazione pese dinamiche in Francia

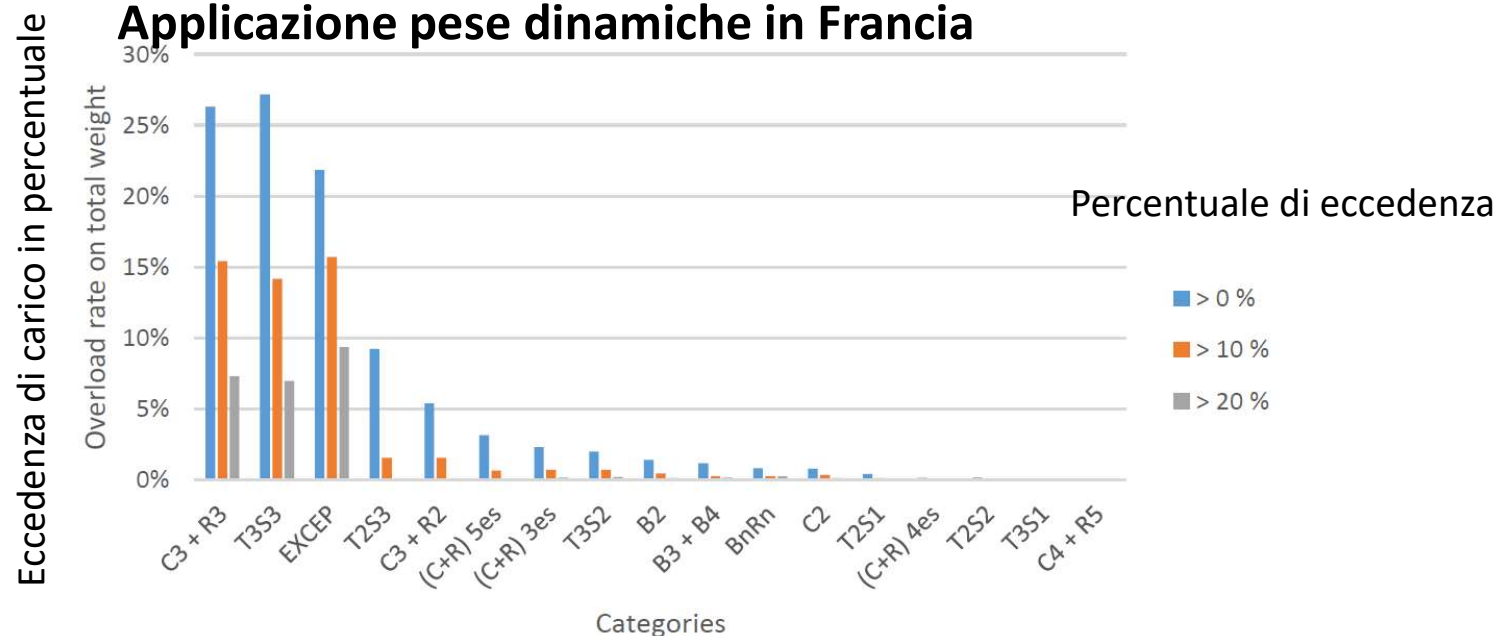


Ogni anno si rilevano 120 milioni di veicoli (carico degli assi, distanza tra gli assi, sagoma, carico totale) tra cui 30 milioni di mezzi pesanti

In Italia la diffusione è ancora limitata ma la rete si sta incrementando

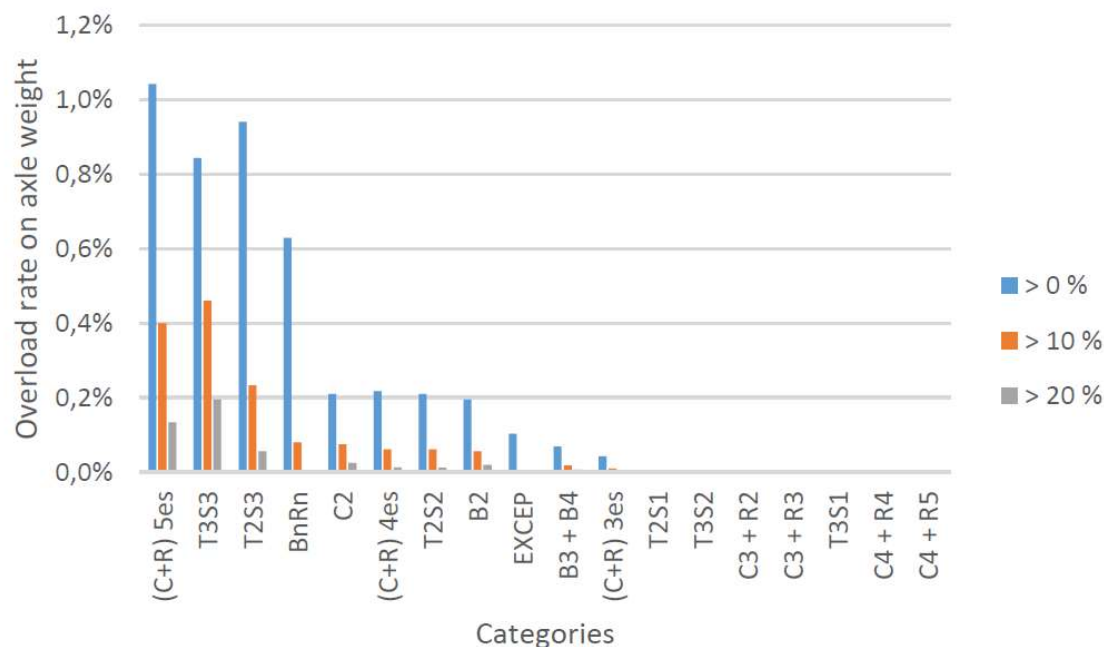
## Applicazione pese dinamiche in Francia

dati su carico totale



I veicoli con più di 5 assi hanno un sovrappeso elevato rispetto agli altri veicoli. I veicoli con 6 assi superano più del 20% la soglia di carico di 40t. Nel 2017 è stato rilevato 8.5% di veicoli pesante che superano la soglia di peso, tra questi il 1.3% eccede più del 10% e il 0.1% più del 20%.

dati su singolo asse

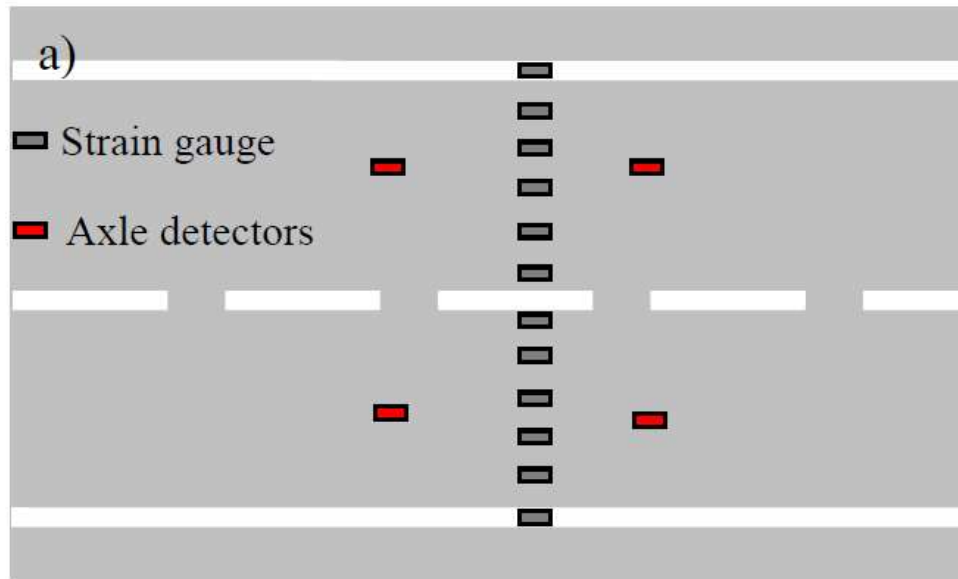


Il sovrappeso sul singolo asse, considerando come riferimento 13t indica che 1% degli assi eccede 13t, 0.26% eccede più del 10% e 0.06% più del 20%.

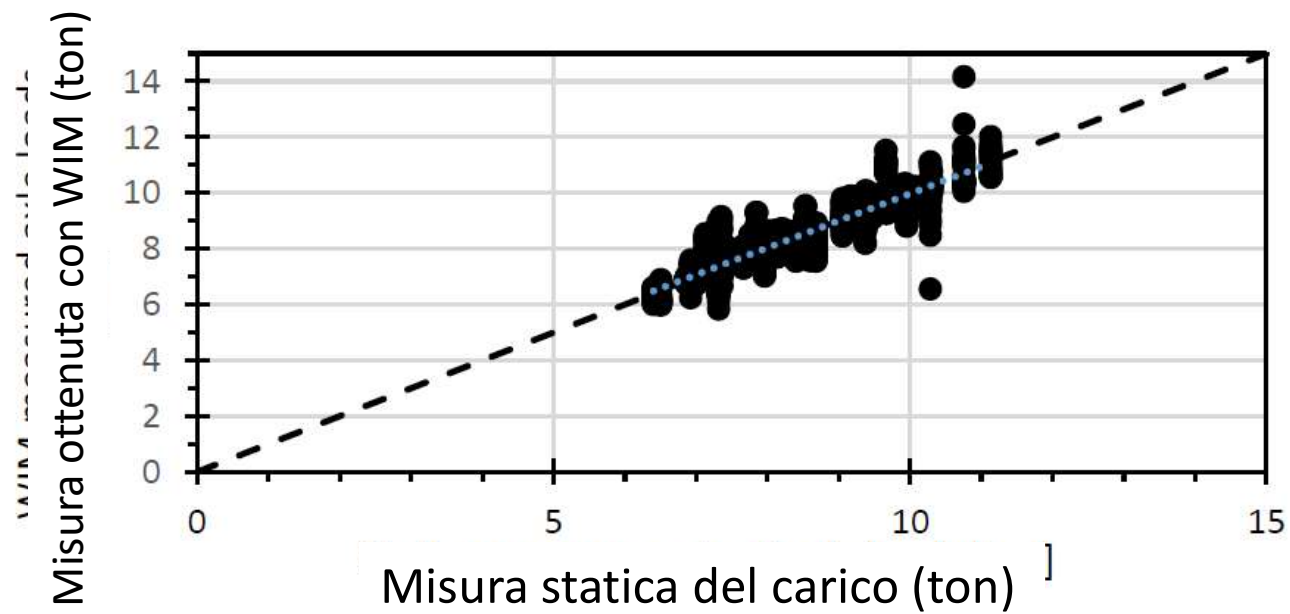


## WIM Bridge

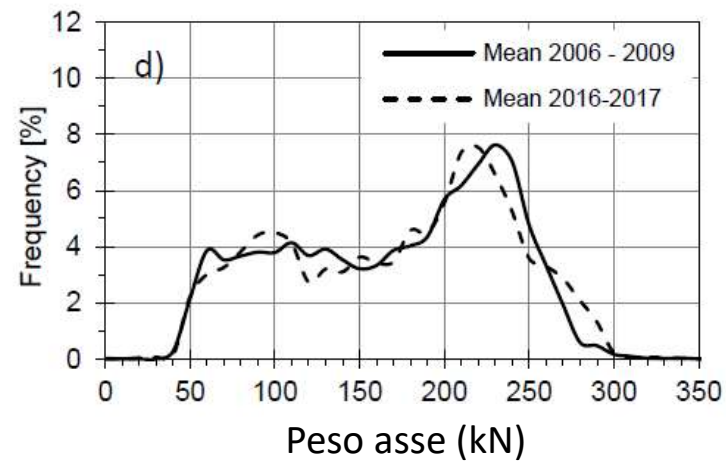
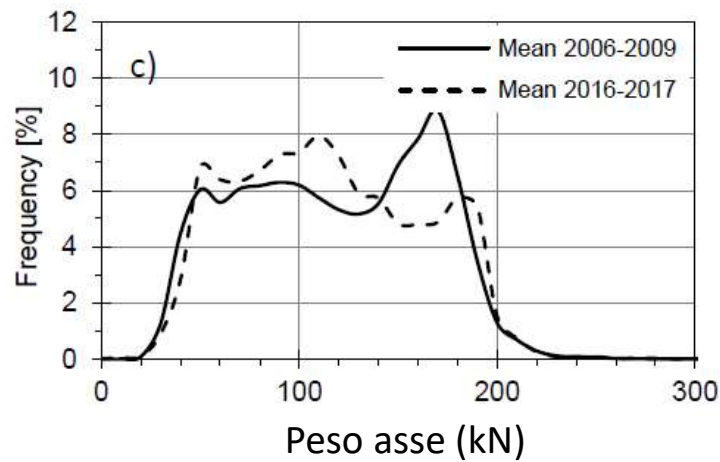
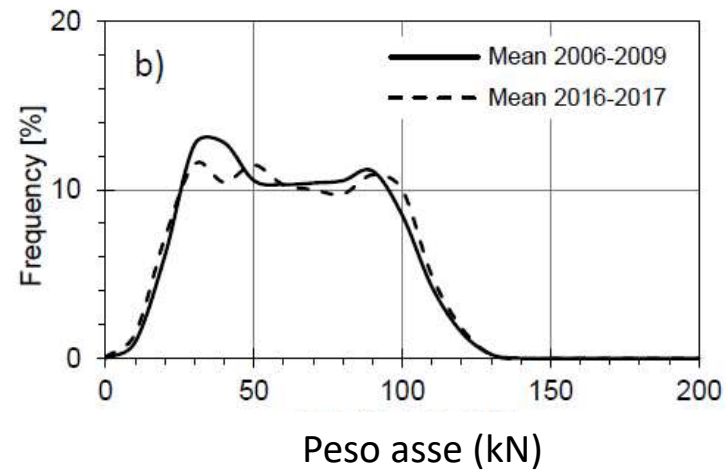
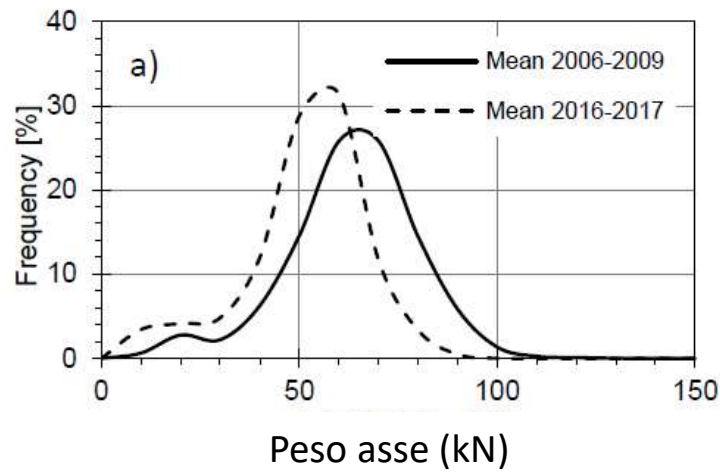
### Applicazione in Svezia



I sistemi di WIM bridge consistono in due set di estensimetri per identificare gli assi e il peso degli assi.

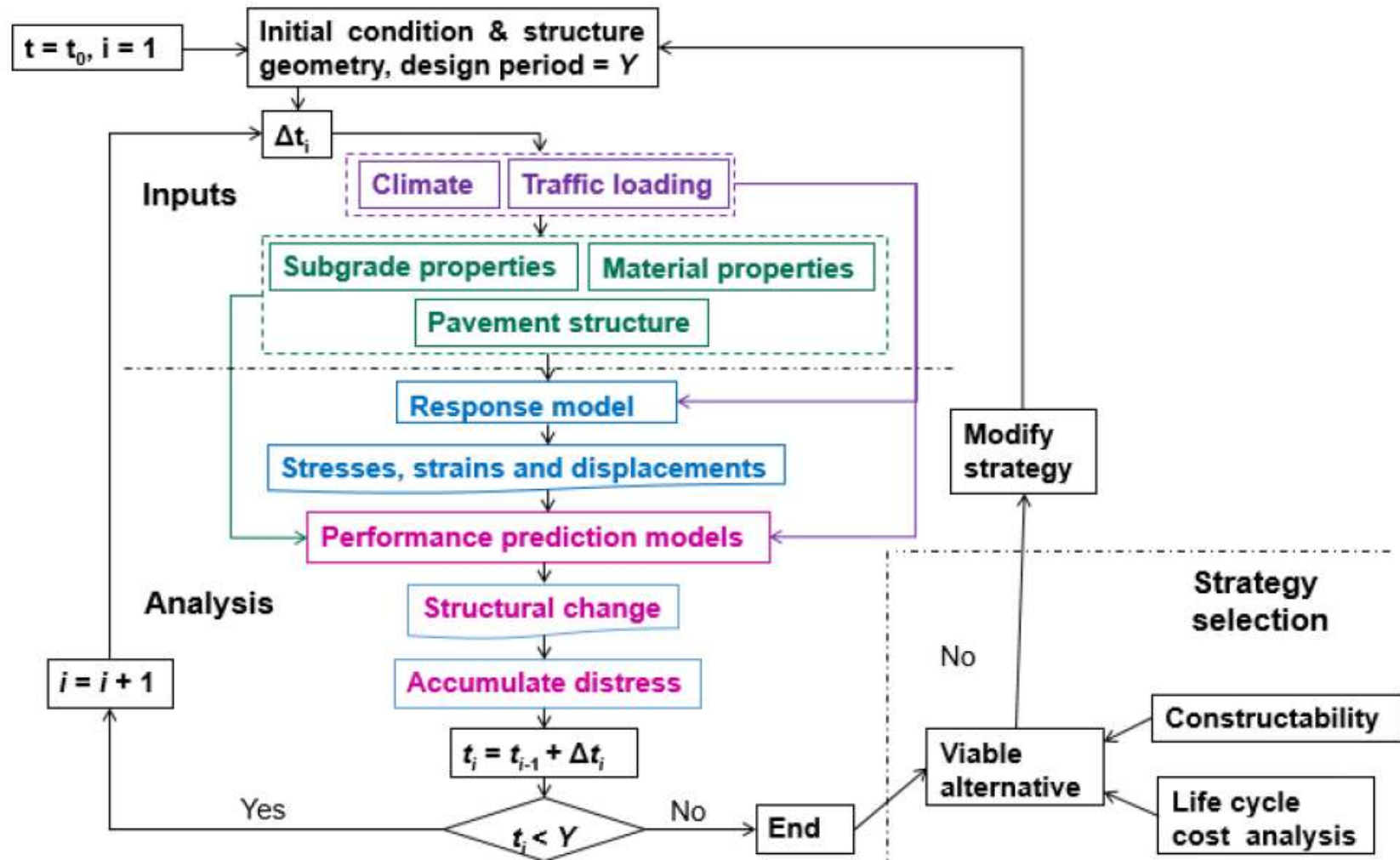


# Applicazione in Svezia

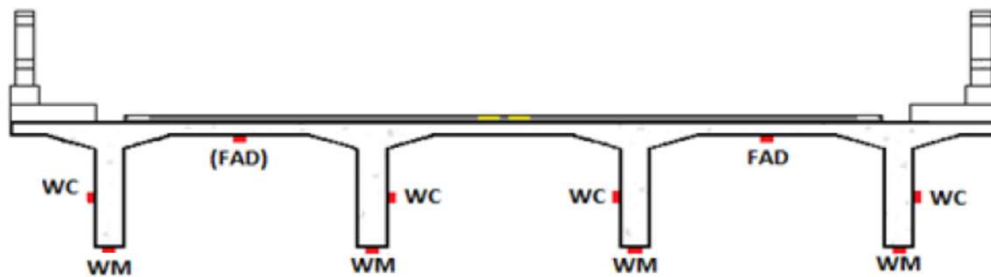


a) Asse di trazione b) asse singolo c) assi tandem d) tre assi

The aim is to predict the structural degradation of road structures as a function of time (Erlingsson and Ahmed, 2017). The calculation scheme is based on two main steps; a response calculation step for the different traffic loads applied, taking into account the ambient climate, and a performance prediction step where pavement degradation is predicted in time steps and subsequently accumulated over the entire design period of the pavement structure.



# WIM bridge in Brasile



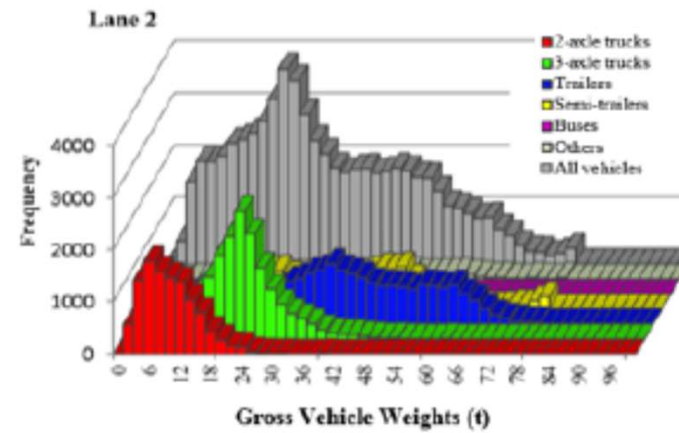
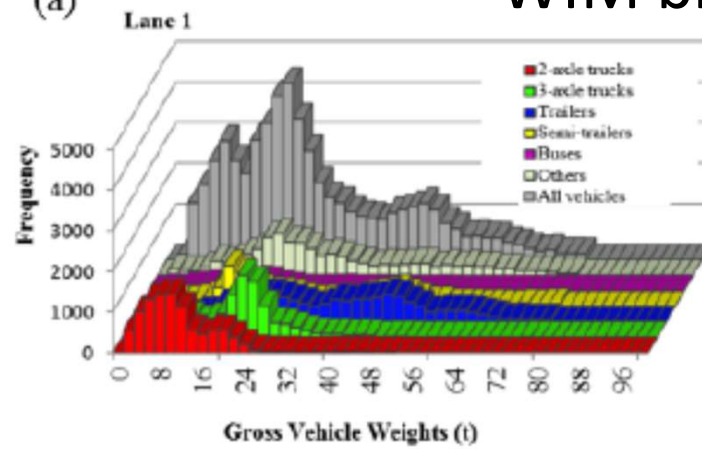
Bridge	Superstructure and Total Length (TL)	General Conditions	Rating
Passa Três River	3 spans simply supported, 5 longitudinal beams, No transversal beams. TL of 105 m	Does not present serious degradation.	Very good
Itinguijada River	1 simply supported span with cantilevers, 2 longitudinal beams, With transversal beams. TL of 29 m	Satisfactory condition (steel corrosion in transversal beams).	Satisfactory
Lambari River	1 span, 4 longitudinal beams, With transversal beams. TL of 22 m	Generalized presence of moisture (spots of steel corrosion).	Good

**sensori di carico (WM), sensori di taglio (WC)**

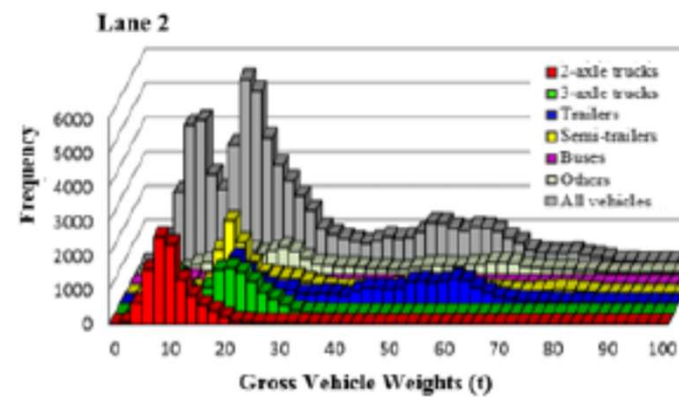
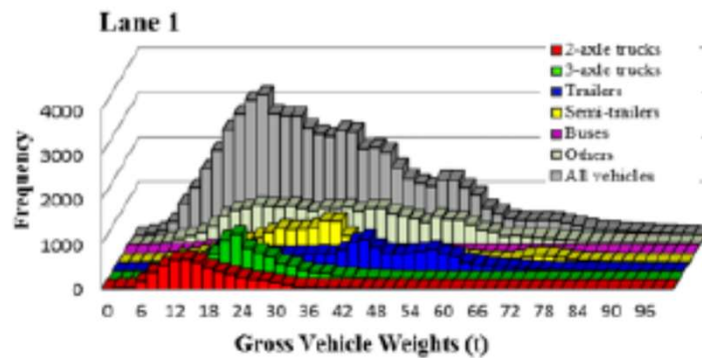


# WIM bridge in Brasile

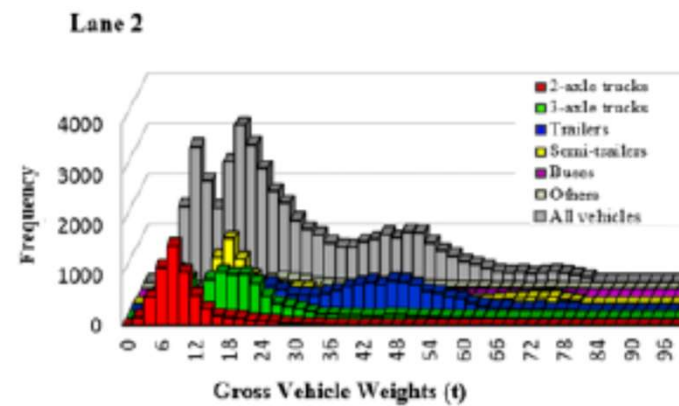
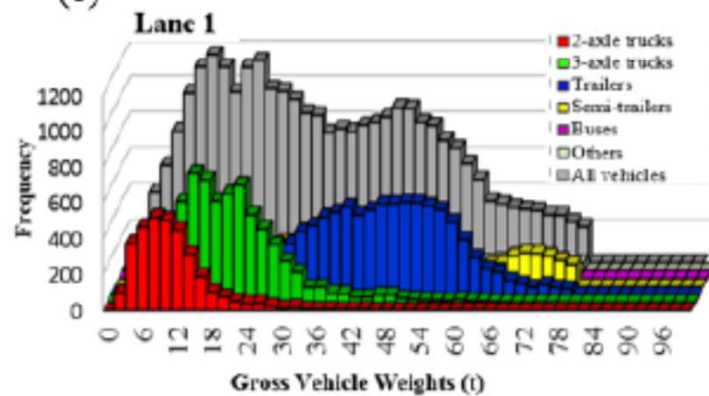
(a)



(b)



(c)



# Dati del WIM bridge per calcolare il coefficiente dinamico

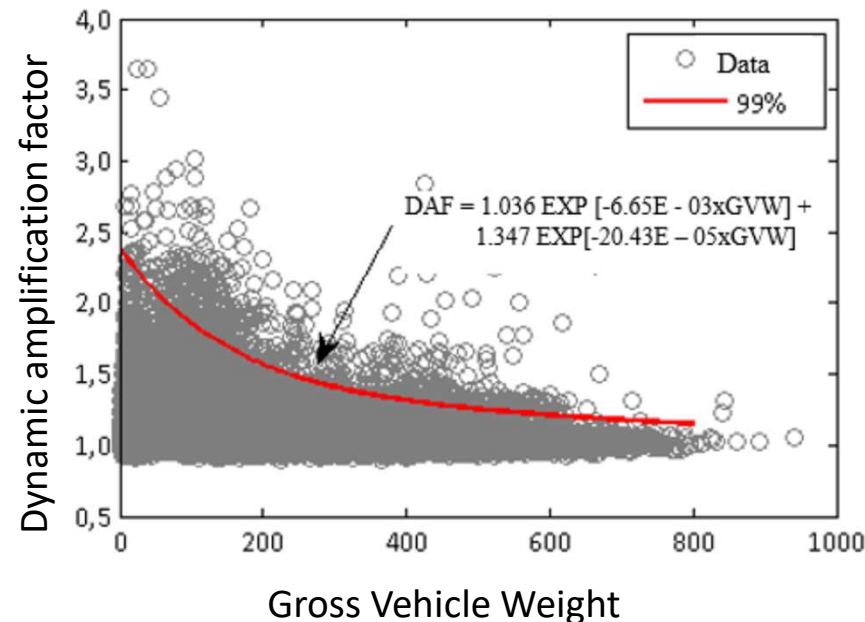
$$RF = \frac{\Phi \times R_d - \gamma_G \times G_n}{\gamma_Q \times G_Q \times DAF}$$

$\Phi$  Resistant capacity reduction factor obtained during the initial inspection;  
 $R_d$  Rd Loading capacity of the beam section obtained from the structural project and site inspection;

$\gamma_G, \gamma_Q$   $\gamma_G, \gamma_Q$  Safety factors to augment normalized forces respectively;  
 $G_n, G_Q$   $G_n, G_Q$  Forces due to permanent loads and traffic loads, respectively, obtained from collected B-WIM data;

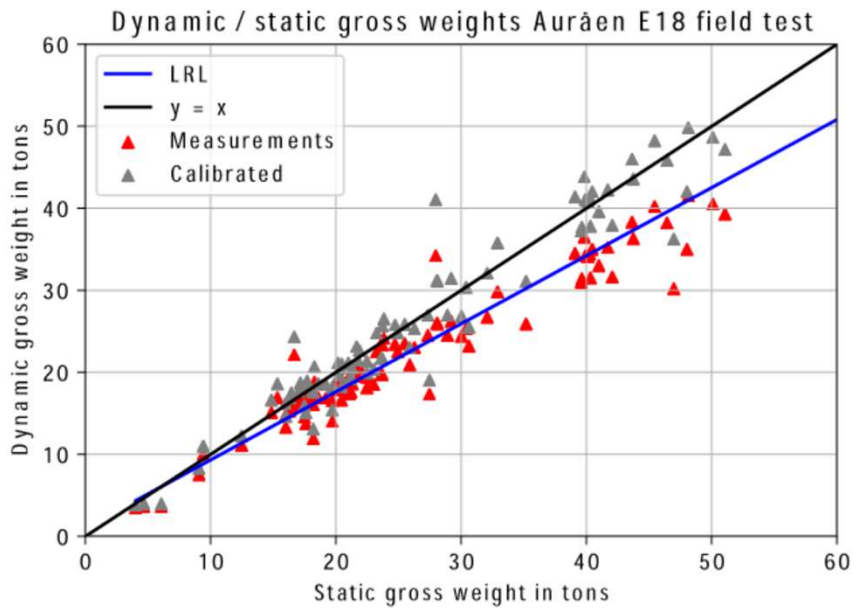
$DAF$  DAF Dynamic Amplification Factor, obtained from collected B-WIM data.

Utilizzando il monitoraggio del ponte è possibile valutare il coefficiente di amplificazione dinamica  
Si osserva che il coefficiente dinamico DAF è inversamente proporzionale al peso del veicolo. Pertanto maggiore è il peso del veicolo minore è il coefficiente di amplificazione dinamica.

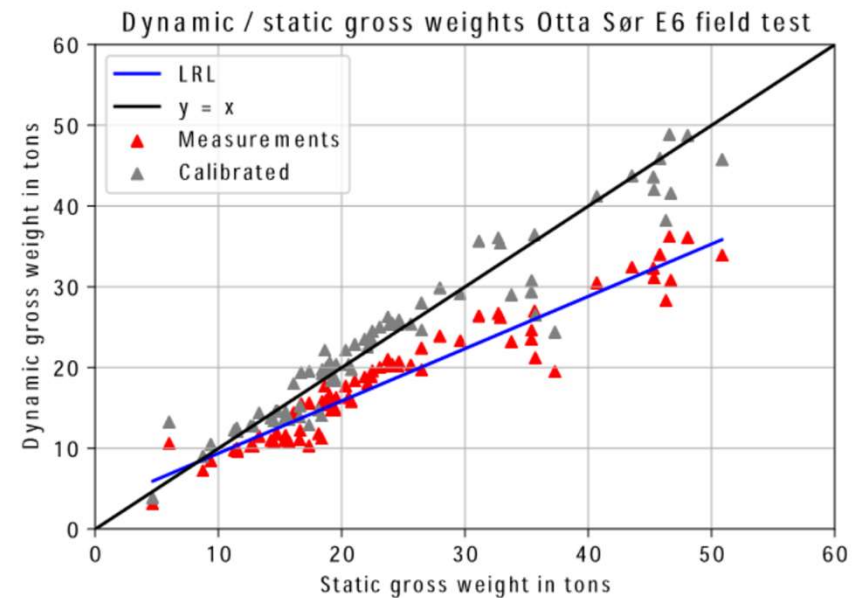
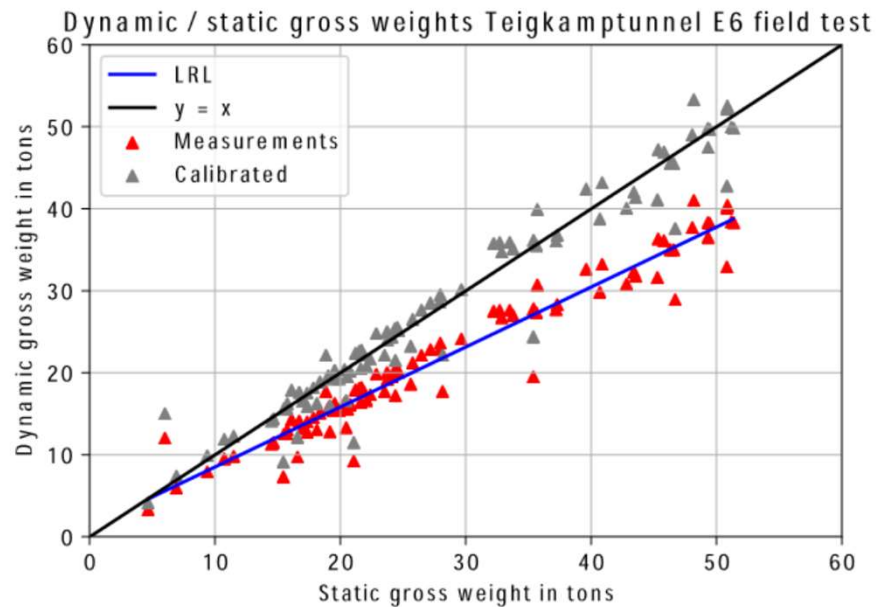
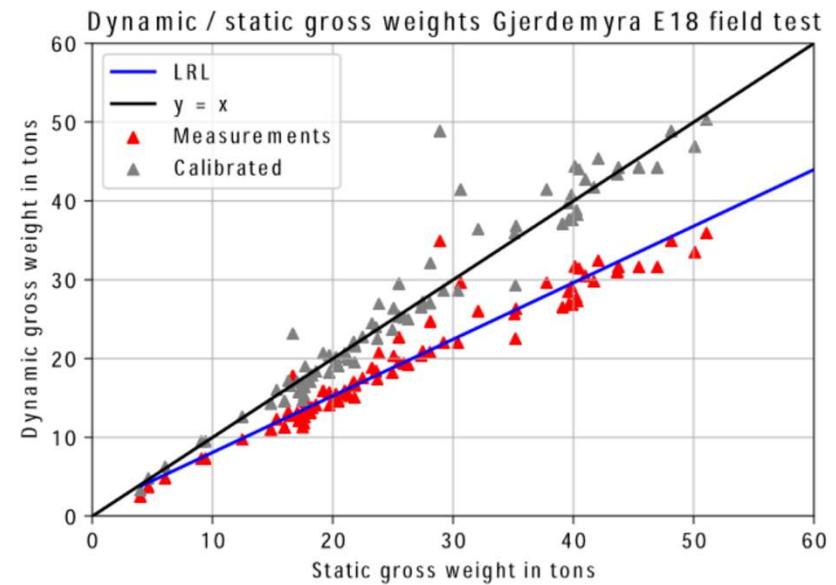


## E' necessaria una calibrazione

peso misurato dinamicamente



peso misurato staticamente



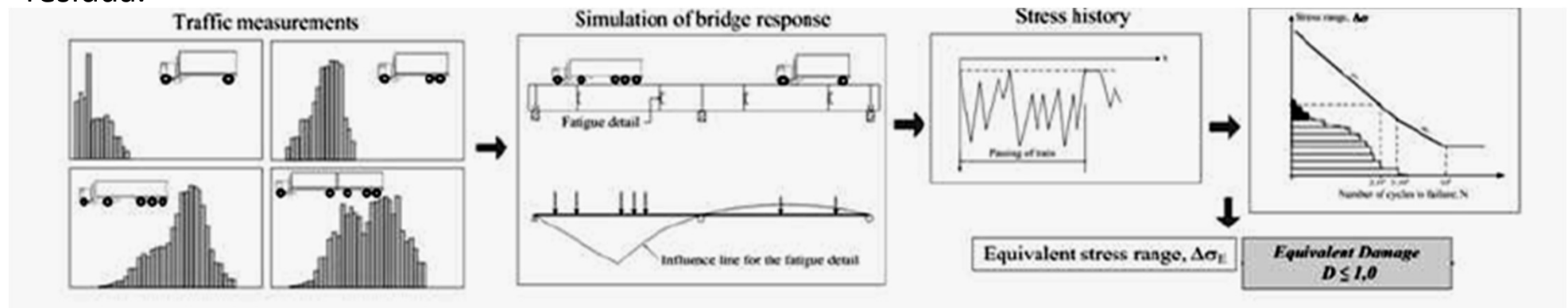
# Applicazioni dei sistemi WIM

I dati delle pesse dinamiche possono essere utilizzati per diversi scopi:

- Calibrazione dei carichi delle normative per il progetto di ponti
- Indicazioni per il progetto di ponti che hanno dimensioni non previste dalle indicazioni normative
- verifiche del danno per fatica e della vita residua delle strutture
- verifica di strutture esistenti

Le tipologie di ponti che si progettano attualmente presentano una riduzione del peso proprio mentre i carichi da traffico sono aumentati, pertanto è di fondamentale importanza rivedere i carichi da traffico ed i fattori parziali di sicurezza

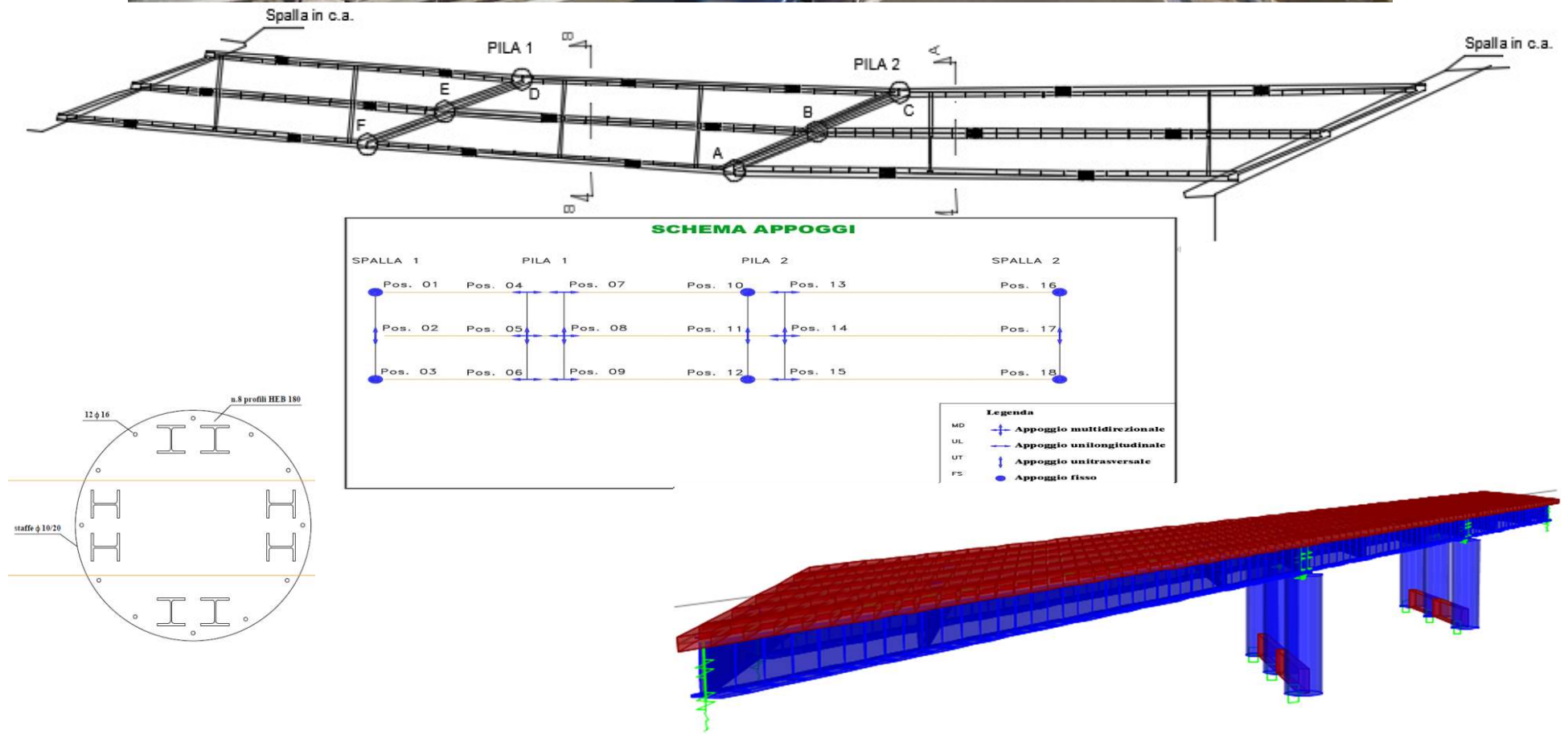
La fatica e la vita residua delle strutture sono di fondamentale importanza per i ponti in acciaio e composti. Mediante i dati dei sistemi WIM è possibile calcolare i cicli di variazione di tensione che insieme alle curve S-N della fatica (Miner Model) possono dare importanti indicazioni sulla vita residua.



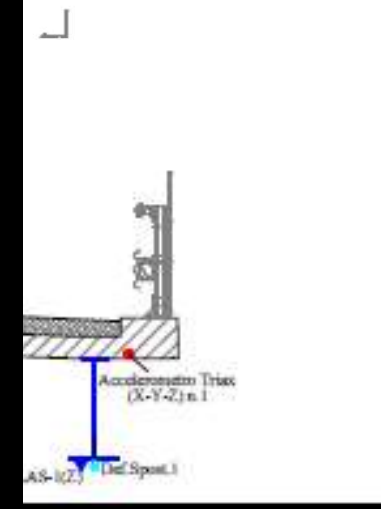
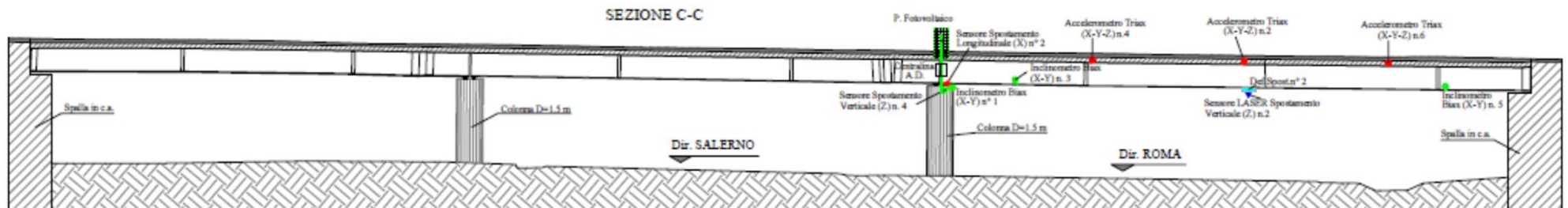
Nella verifica delle strutture esistenti, anche degradate o danneggiate, l'applicazione dei carichi di normativa può condurre ad una penalizzazione rispetto ai carichi reali da traffico.

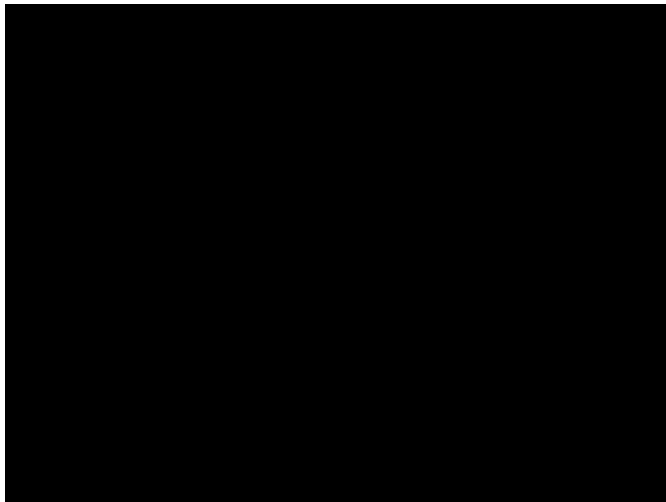


# Studio in corso

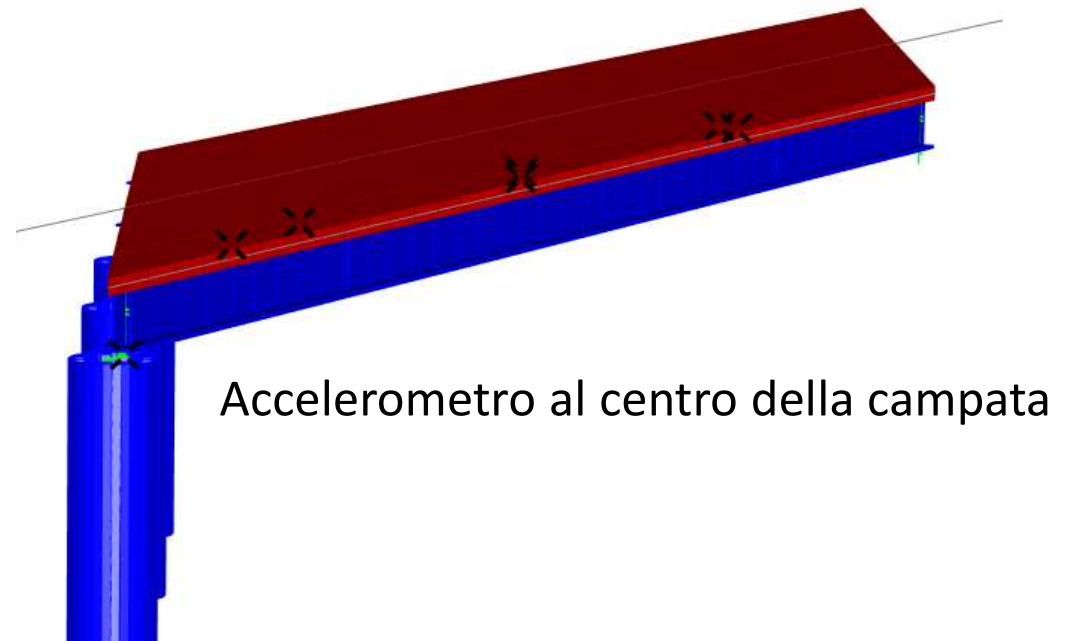


# Progetto sistema di monitoraggio

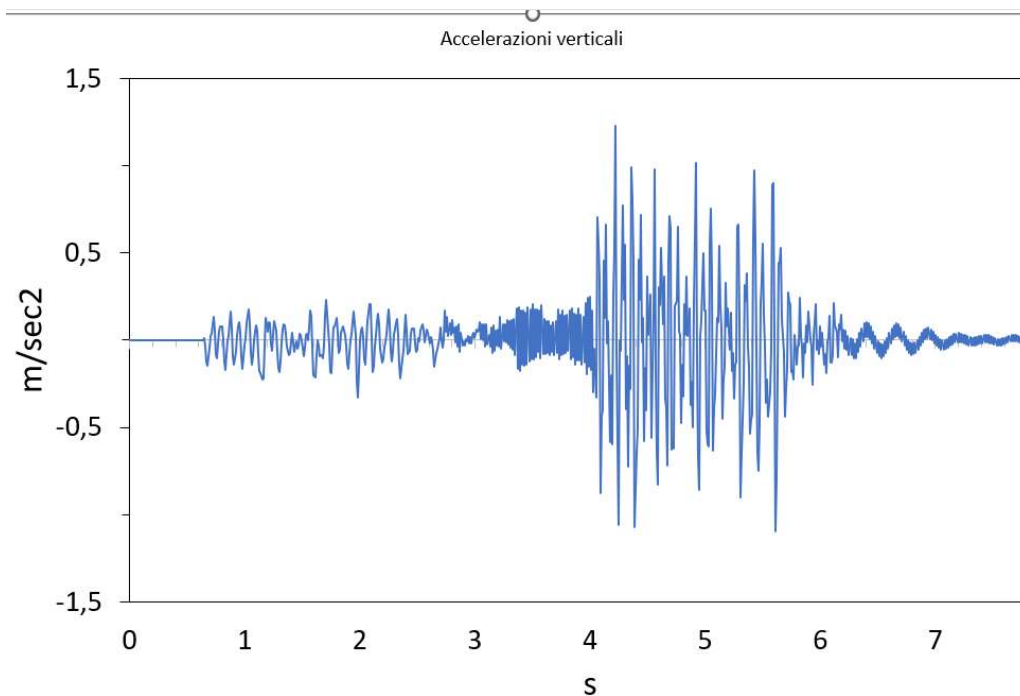




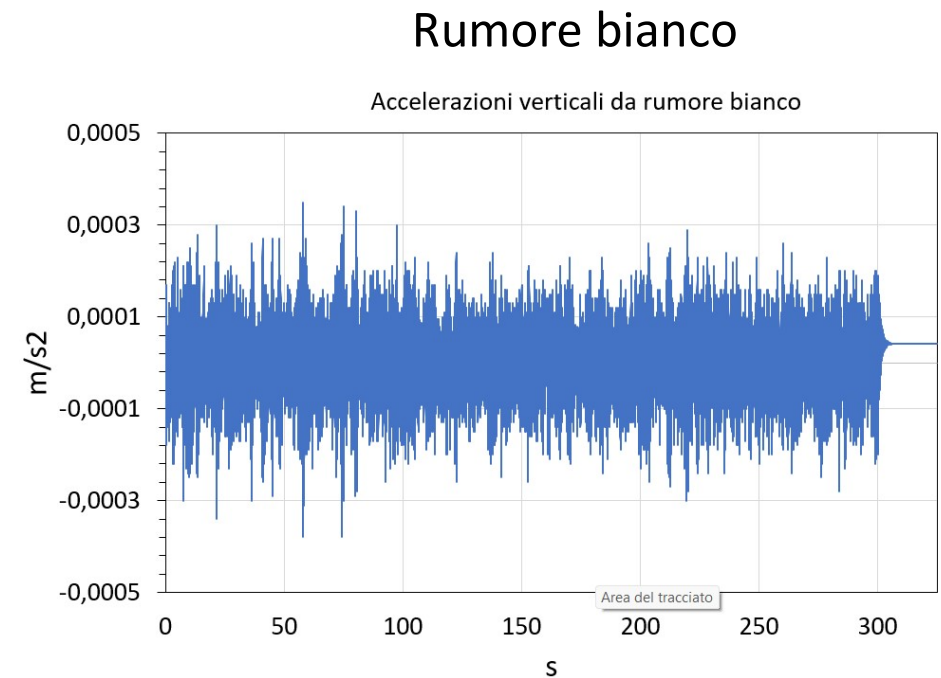
Passaggio mezzo pesante  
smorzamento al 5%



Accelerometro al centro della campata



Senza smorzamento si arriva a  $18\text{m/s}^2$



# Pese ferroviarie



## Rail WIM

In generale I sistemi WIM per le ferrovie misurano la deformazione della rotaia durante il passaggio del treno

E' possibile misurare il peso dei singoli assi, dei vagoni e dell'intero treno.

Si possono utilizzare diversi sensori come strain gauge, piezoelettrici al quarzo, fibre ottiche.

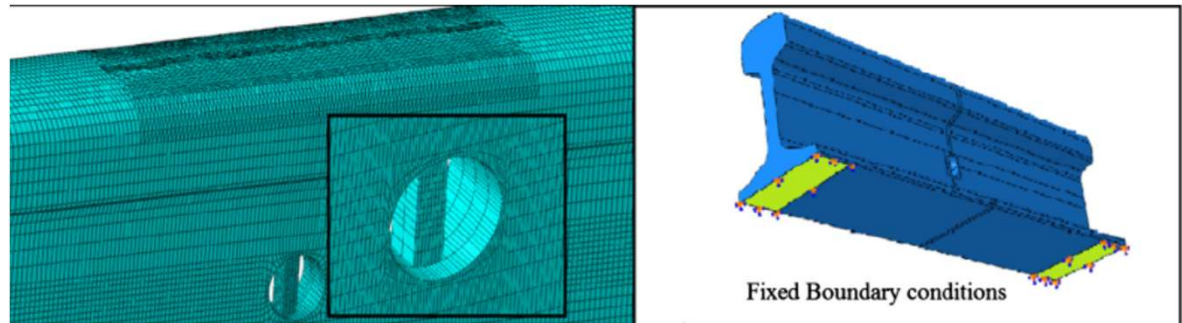
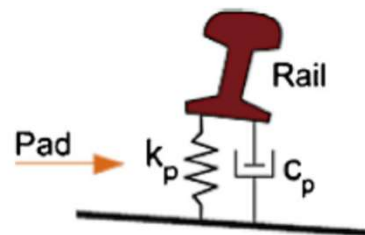
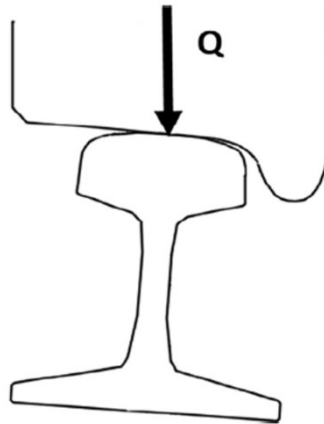
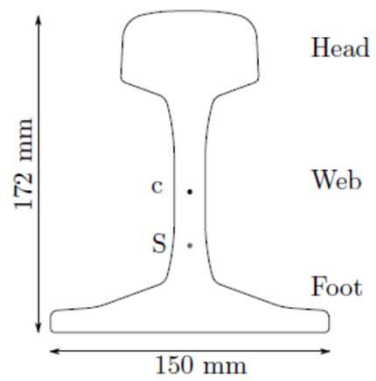
In confronto alle pese stradali si ottiene una accuratezza migliore, 2% per l'intero peso e 5% per il singolo asse.

Poichè il treno percorre la linea del binario il disturbo di effetti laterali è ridotto e le misure sono ripetibili.

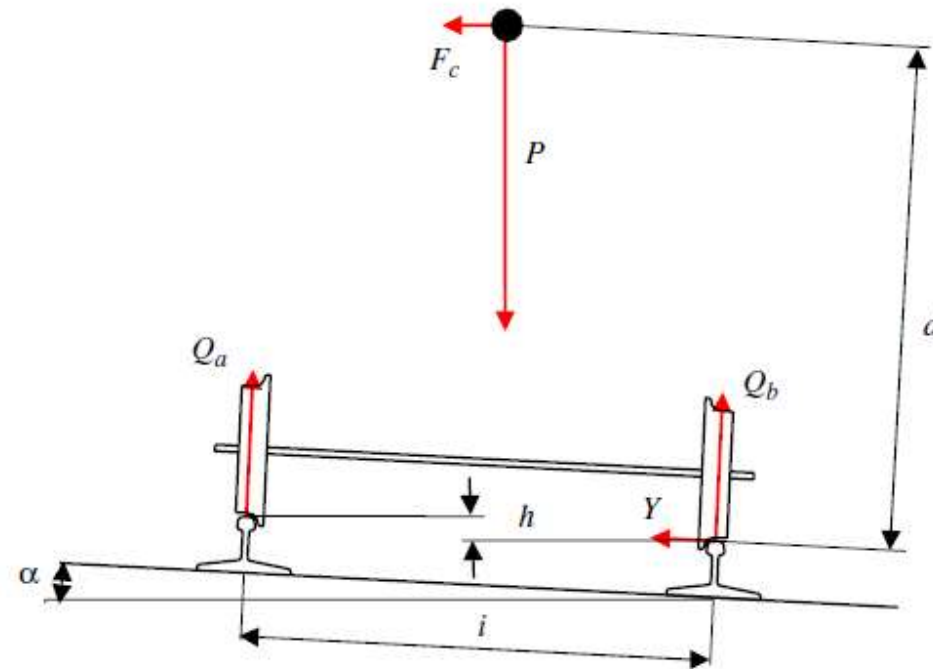
Inoltre le locomotive hanno un peso fisso e noto, pertanto possono essere utilizzate per la calibrazione. Il passaggio della locomotiva può essere individuato mediante un sistema ottico (telecamera, barriera laser).



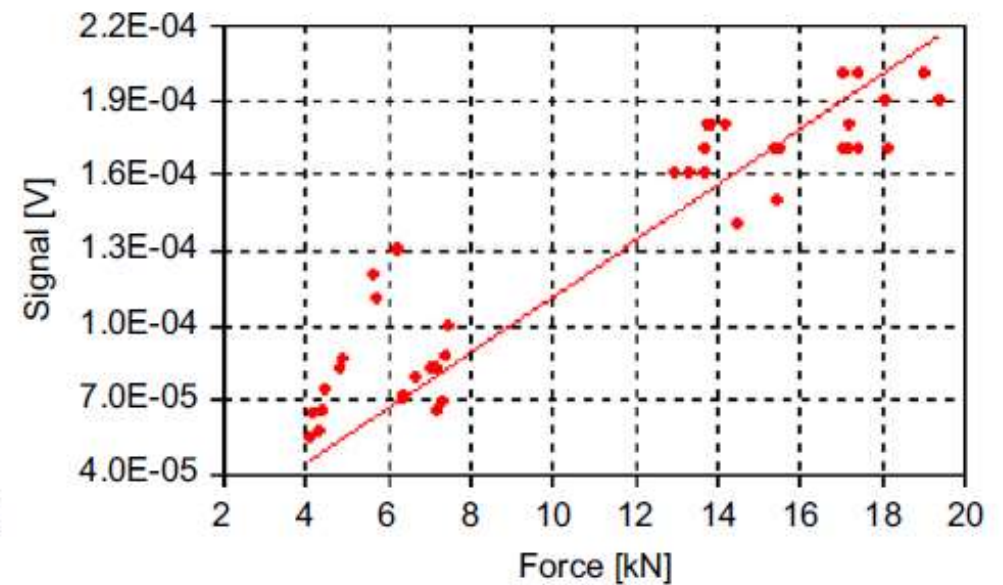
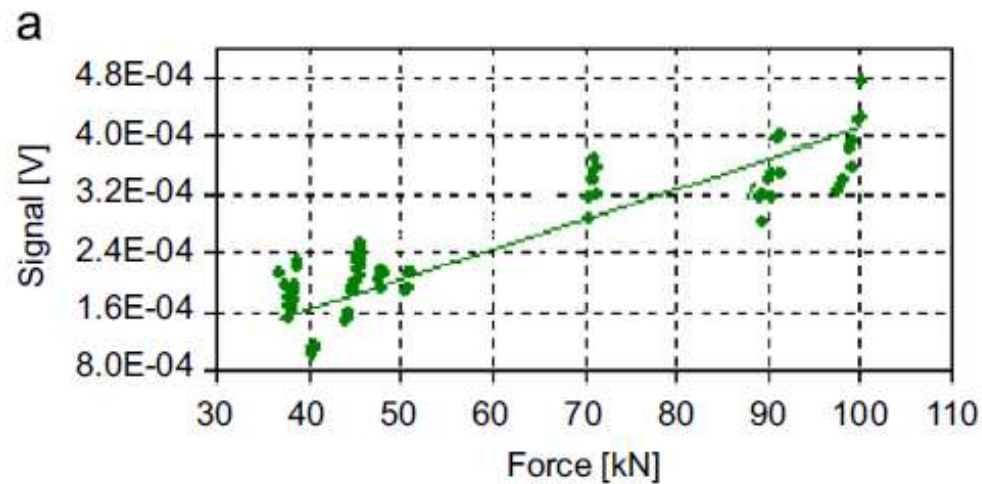
## Pesa dinamica treni



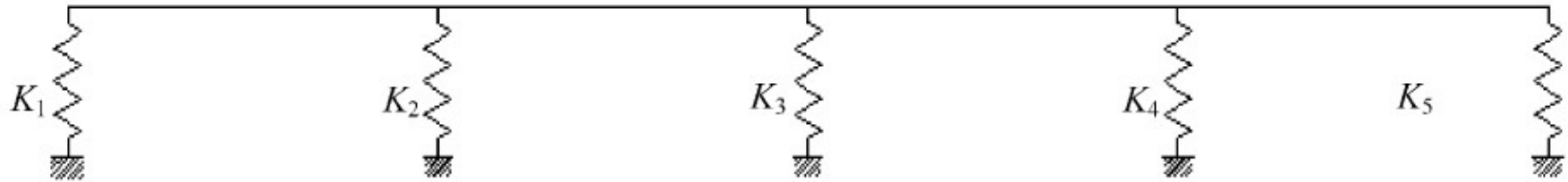
## Relazioni tra deformazione nella rotaia e carico



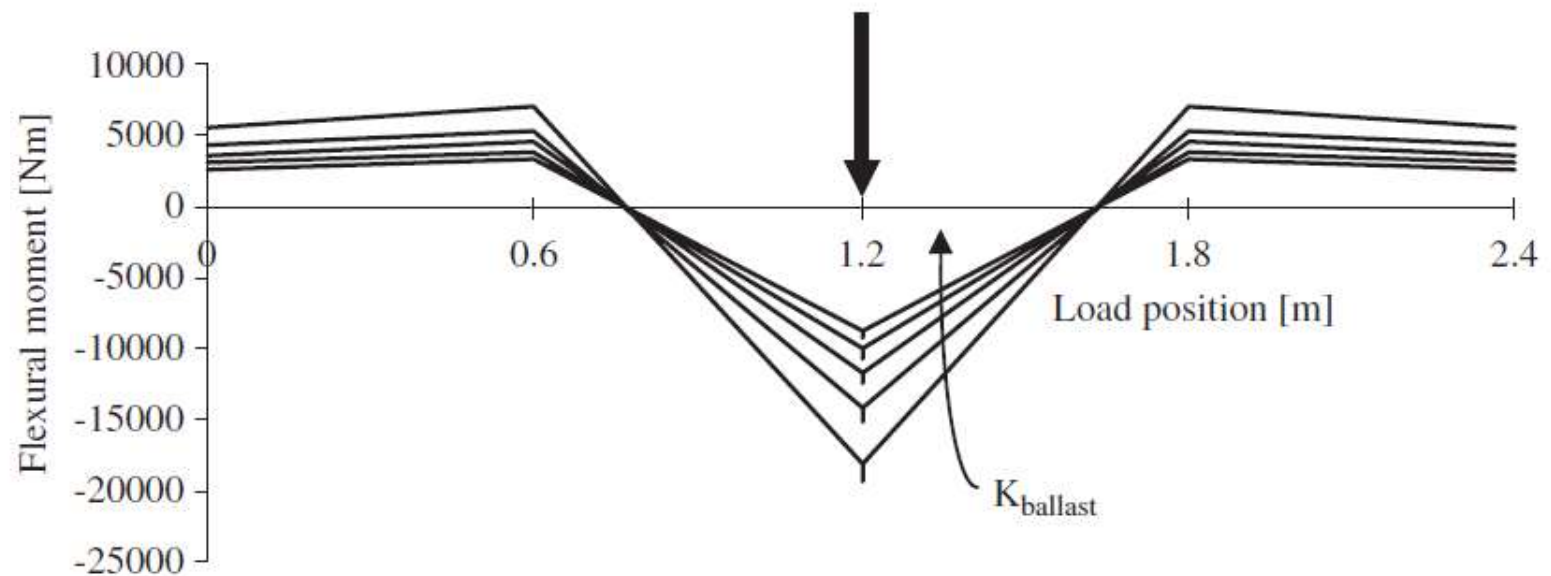
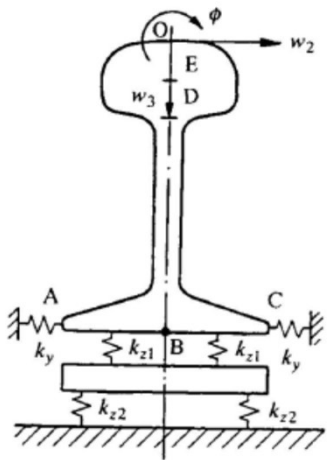
b



## Modello per la valutazione del peso



Effetto di appoggio elastico del ballast



Momento flettente nella rotaia al variare della deformabilità del ballast