

Convegno Finale


La sperimentazione delle Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti

**Accordo tra il CSLLPP ed il Consorzio ReLUIS
attuativo dei DM 578/2020 - DM 204/2022 - DM 304/2024**

**Procedure di Prova di Carico
a Supporto delle Verifiche di Sicurezza**

Daniele Losanno

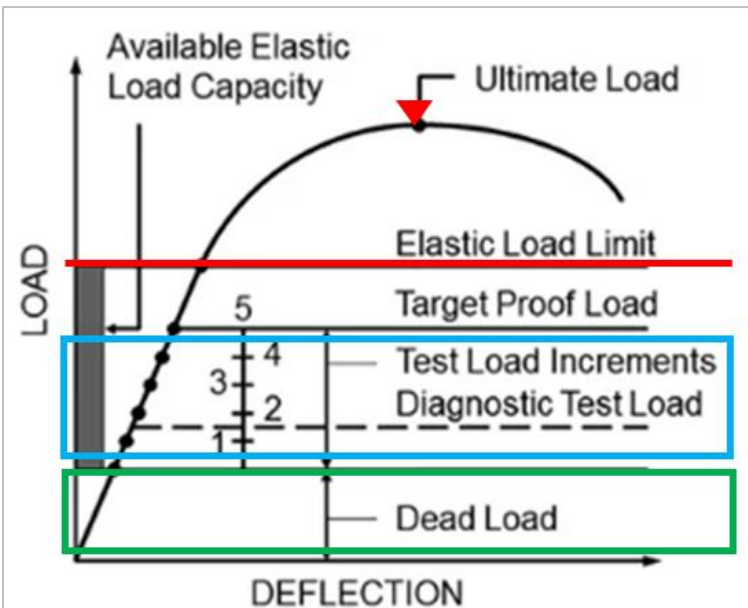
Roma, 19-20-21 novembre 2025

NUMERO WP	TITOLO DEL WP
4	SPERIMENTAZIONE SU COMPONENTI STRUTTURALI E/O SPECIALI
	<p>TASK 4.7 [PROCEDURE DI PROVA DI CARICO A SUPPORTO DELLE VERIFICHE DI SICUREZZA]</p> <p>COORDINATORE TASK</p> <p>Daniele Losanno – Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura – Università degli studi di Napoli Federico II – email: daniele.losanno@unina.it</p>

Nominativo (responsabile ur)	Affiliazione
Daniele Losanno	Università Federico II

Titolo sub task	UniNA
4.7.1 - Procedure per l'esecuzione di prove di carico rispetto alla sicurezza dell'opera	X
4.7.2 – Validazione sperimentale	X

LOAD TEST



OBIETTIVO

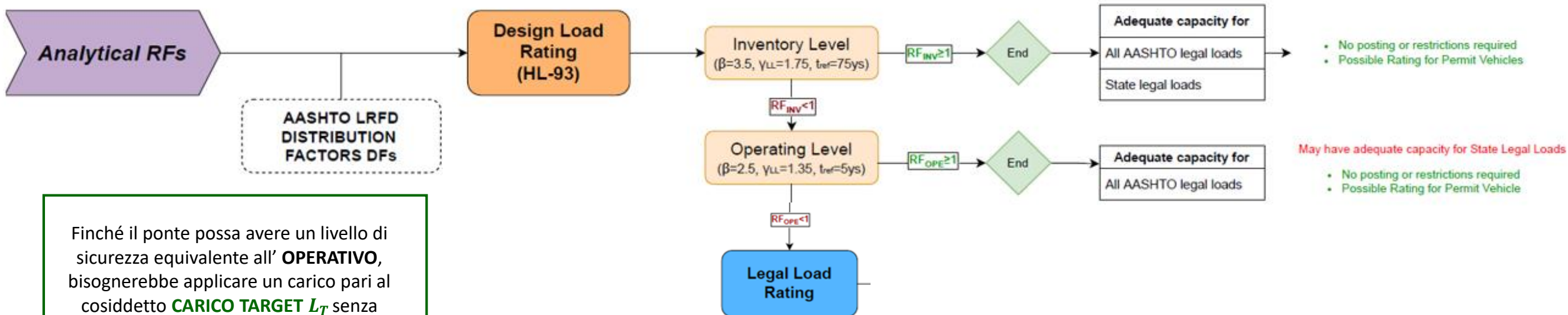
- ❑ Sviluppare una procedura di PROVA DI CARICO (**Proof Load Testing, PLT**) atta a determinare un **minorante della capacità** dei ponti esistenti per carichi da traffico e dimostrare un livello target di **affidabilità strutturale**, contenendo il rischio di fallimento **durante la prova**

MOTIVAZIONI

- ❑ Frequente **carenza di informazioni** riguardo dettagli costruttivi e configurazione del sistema strutturale (progetto originario, interventi, stato di conservazione, etc)
- ❑ **Meccanismi resistenti** affetti da significative incertezze (es. resistenza a trazione cls, precompressione residua, effetti spaziali 3D) che posso portare ad una stima di resistenza oltremodo cautelativa
- ❑ Disponibilità limitata di risorse degli **Enti locali** per valutazioni accurate previa caratterizzazione e indagini sui materiali a fronte di una eventuale **documentata storia di carico**

STATO DELL'ARTE

Manual for Bridge Evaluation (AASHTO 2022)

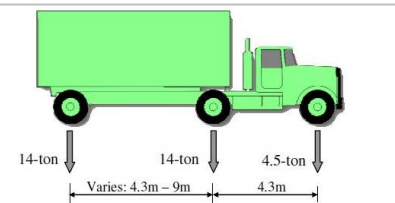


Finché il ponte possa avere un livello di sicurezza equivalente all' **OPERATIVO**, bisognerebbe applicare un carico pari al cosiddetto **CARICO TARGET** L_T senza danneggiamento attraverso step di carico piccoli e gradual

$$L_T = X_{pA} L_R (1 + IM)$$

X_p (>1.4) RAPPRESENTA IL **MOLTIPLICATORE DEI CARICHI** USATI PER L'ASSESSMENT, TALE CHE SI RAGGIUNGA UN LIVELLO DI SICUREZZA **OPERATING** CORRISPONDENTE A [$B=2,5 - \gamma_{LL}=1,35 - TREF=5Y$]

L_R rappresenta l'effetto prodotto dal carico (ad esempio momento flettente in mezzeria, massimo taglio in appoggio, etc) utilizzato per il rating *Operating* (i.e. HL-93) o più in generale il carico che si utilizzerebbe se fosse fatta una valutazione analitica



Da X_p si ottiene X_{pA} , ossia il target live load corretto per tener conto delle condizioni di sito del ponte nel seguente modo:

$$X_{pA} = X_p \left(1 + \frac{\Sigma\%}{100} \right)$$

Consideration	Adjustment
One-lane load controls	+15%
Nonredundant structure	+10%
Fracture-critical details present	+10%
Bridges in poor condition	+10%
In-depth inspection performed	-5%
Rateable, existing $RF \geq 1.0$	-5%
ADTT ≤ 1000	-10%
ADTT ≤ 100	-15%

ADTT = average daily truck traffic.

7.5 PROVE DI CARICO STATICHE E RILIEVI DINAMICI

Esse sono anche utili ad accrescere l'affidabilità del modello dell'opera nell'effettuazione delle verifiche accurate di Livello 4, come previsto al § 6.3.3.4.

... Di per sé, le prove statiche o dinamiche condotte occasionalmente non forniscono, salvo casi particolari, informazioni direttamente utilizzabili per valutare la sicurezza della struttura ovvero per identificare danneggiamenti di carattere strutturale ma, tuttavia, costituiscono un valido supporto nei processi di valutazione dello stato di condizione di un manufatto basati sull'integrazione con esse dei risultati del monitoraggio. Si fa anche riferimento al § 6.3.5.5.

7.5.1 PROVE DI CARICO STATICHE

... la risposta della struttura, in termini di spostamenti, rotazioni e deformazioni, è confrontata con la risposta teorica, determinata attraverso modelli attualizzati della struttura che tengano conto del degrado o del danneggiamento nonché delle variazioni di temperatura e delle condizioni atmosferiche intervenute nel corso della prova.

... L'applicazione dei carichi deve essere interrotta qualora si manifestassero deviazioni dal comportamento lineare carico-spostamento ovvero apparissero lesioni, anche minime, alla superficie delle parti strutturali o si riscontrasse qualsiasi altro comportamento anomalo. A seguito di tali avvenimenti devono essere eseguite indagini di dettaglio e verifiche di sicurezza e di transitabilità. Gli spostamenti residui devono risultare inferiori al 5% dei valori massimi...

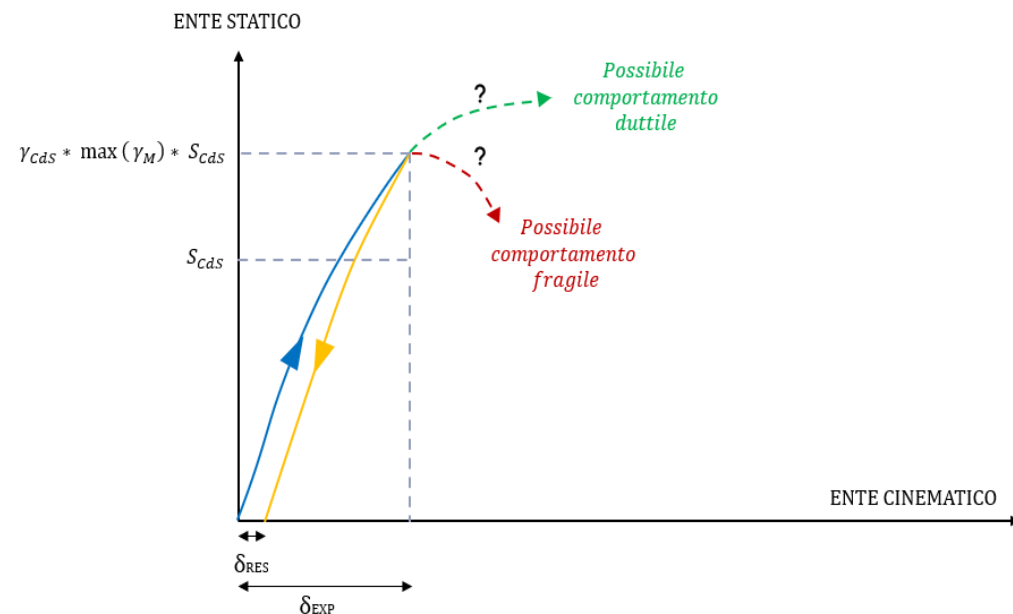
6.3.5.5 Verifica in sito della sicurezza per transitabilità temporanea

... Nel caso in cui su di un ponte o viadotto siano riscontrate difettosità strutturali che, da un'analisi di Livello 2, abbiano comportato una Classe di Attenzione Alta dell'opera e, per gravi motivi di viabilità sia necessario verificare la possibilità di una transitabilità provvisoria nelle more di una verifica di transitabilità ai sensi del § 6.1.5.3 delle presenti Linee Guida, si può procedere nel seguente modo.

Si effettua una prova di carico sul ponte/viadotto, applicando i carichi da Codice della Strada del § 6.3.2.2 amplificati dal valore appropriato γ_{cds} prescelto fra i tre livelli del § 6.3.3.4 e dal fattore parziale del materiale γ_M , considerando il valore più alto fra quelli relativi ai materiali costituenti la struttura (§ 6.3.4.1).

$$\gamma_{cds} \cdot S_{cds} < \frac{R_{el.exp}}{\max(\gamma_M)} \quad (\max \gamma_M) \cdot \gamma_{cds} \cdot q_{cds} \leq q_{el}^{SPER}$$

La verifica di transitabilità di cui al § 6.1.5.3 si esegue entro un limite massimo di 60 giorni dall'esecuzione della prova e deve confermare la valutazione di transitabilità temporanea; diversamente occorre valutare ed adottare gli idonei provvedimenti sulla circolazione del ponte, compresa, se del caso, la chiusura al traffico del ponte/viadotto.



AFFIDABILITÀ STRUTTURALE ATTRAVERSO PROVE DI CARICO

Come aggiornare il livello di conoscenza dell'opera e di sicurezza strutturale mediante effettuazione di **prove di carico**?



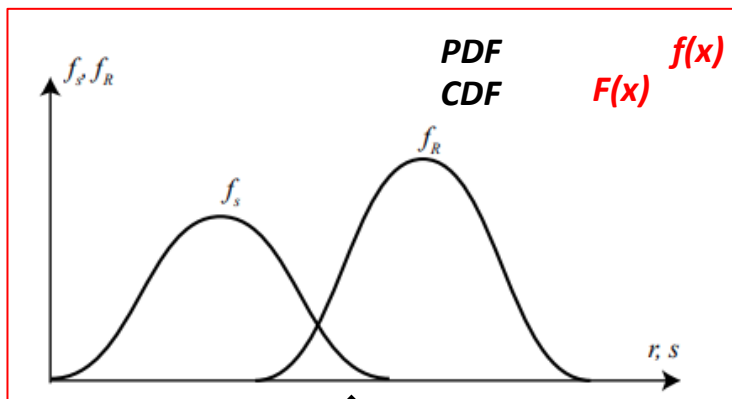
AFFIDABILITÀ strutturale

$$P[\text{Fail in } (t, t + \Delta t)] = P[R \leq S_{\max}(1yr)]$$

*MODELLO SEMPLIFICATO R-S: condizionamento distribuzione di capacità residua** R*

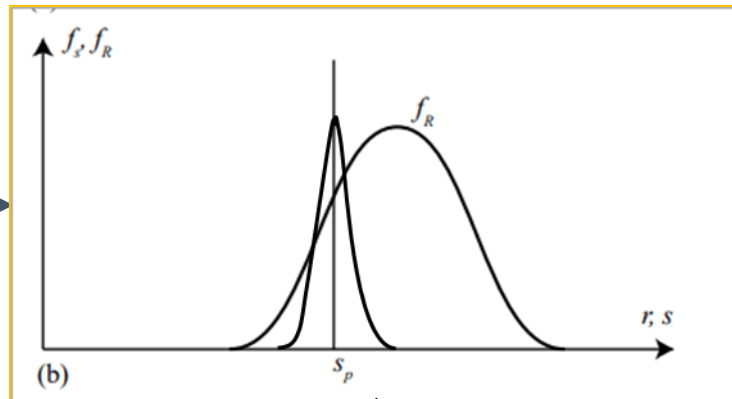
$$P_F = \Phi(-\beta)$$

Prior



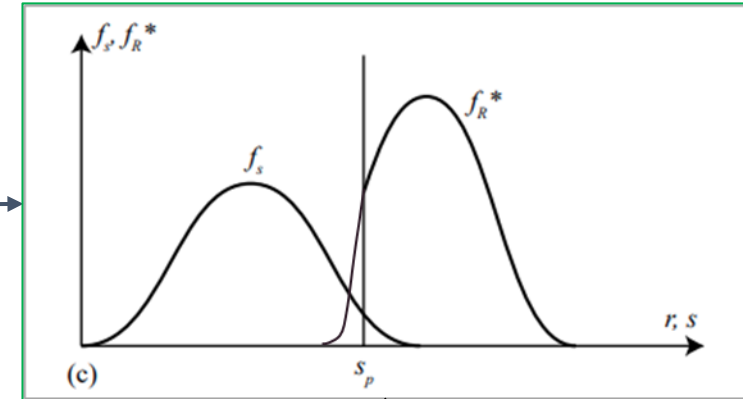
$$P_{f,\xi, \text{before}} (\Delta t = 1yr) = P[\theta_R \cdot R_\xi - \theta_E \cdot (D + TL_{1yr}) \leq 0]$$

During proof load test



$$P_{f_during} = P_f(R - s_p < 0)$$

Posterior



$$P_{f,\xi, \text{after}_{PL_i}} (\Delta t = 1yr) = P[\theta_R \cdot R_\xi - \theta_E \cdot (D + TL_{1yr}) \leq 0 \mid \theta_R \cdot R_\xi - \theta_E \cdot D > \theta_E \cdot PL_i]$$

NB: La variabile **R** per un ponte esistente sarebbe già troncata inferiormente ad un valore che è funzione del massimo carico di esercizio verificatosi durante la vita di servizio (es. carichi eccezionali, prove di collaudo dell'epoca, prove di carico successive)

Task 4.7.1 – Procedure per l'esecuzione di prove di carico rispetto alla sicurezza dell'opera

METODOLOGIA

Sicurezza prima e dopo la prova di carico

$$LS_{j,0} = \theta_R R_j - \theta_E G - TL(\Delta t)$$

$$P_{f,before}(LS_{j,0}, \Delta t) = P[LS_{j,0} \leq 0]$$

$$P_{f,after}(LS_j, \Delta t, PL_\alpha) = P[LS_{j,0} \leq 0 \mid LS_{PL_\alpha} > 0]$$

$$P_f = \Phi(-\beta) \rightarrow \beta_{after} > \beta_{before}$$

Sicurezza durante la prova di carico

$$P_{f,during}^u(LS_j, PL_\alpha) = P[LS_{PL_\alpha} \leq 0]$$

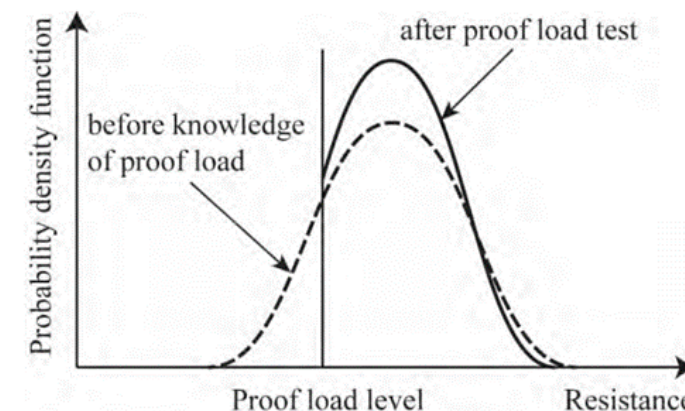
$$P_{f,i,during}^c(LS_j, PL_\alpha, i) = P[LS_{PL_i} \leq 0 \mid LS_{PL_{i-1}} > 0]$$

$$PL_\alpha = \alpha \cdot LM1$$

Consequence Class	β_{up}	β_0
CC1	$3.3 - 0.5 = 2.8$	$3.3 - 1.5 = 1.8$
CC2	$3.8 - 0.5 = 3.3$	$3.8 - 1.5 = 2.3$
CC3	$4.3 - 0.5 = 3.8$	$4.3 - 1.5 = 2.8$

Table 1 – ULS target reliability indexes (fib Bulletin 80,2016)

La variabile R risulta troncata dalla PLT

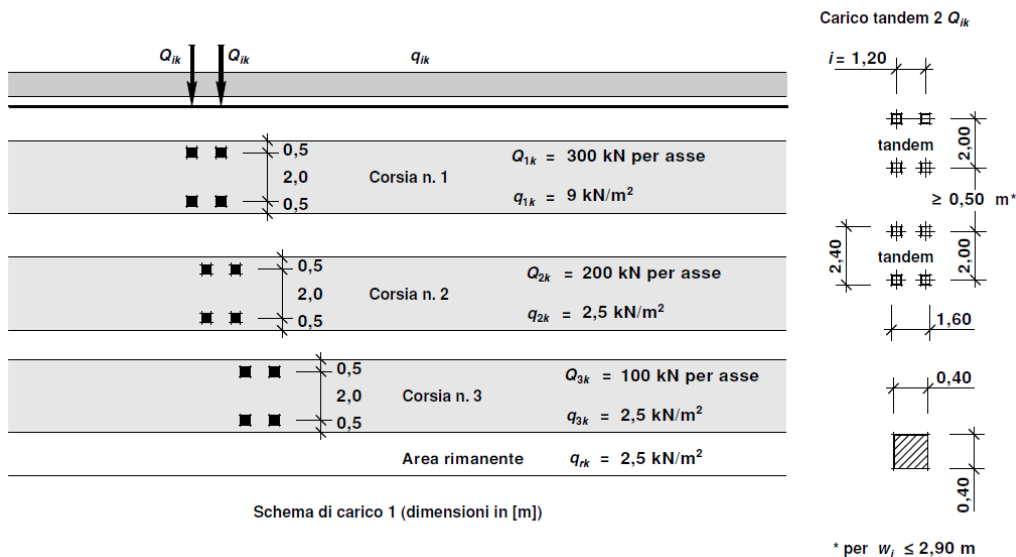


La variabile R risulta aggiornata durante la PLT

*Addonizio G., Losanno D., Lantsoght E.O.L., Casas J.R. (2025). Value of proof load testing for prestressed concrete I-girder bridges in accordance with Eurocode-based safety levels. *Engineering Structures*, 343(B), 121067

MODELLO DI CARICO DA TRAFFICO

Schema di carico 1 (LM1)

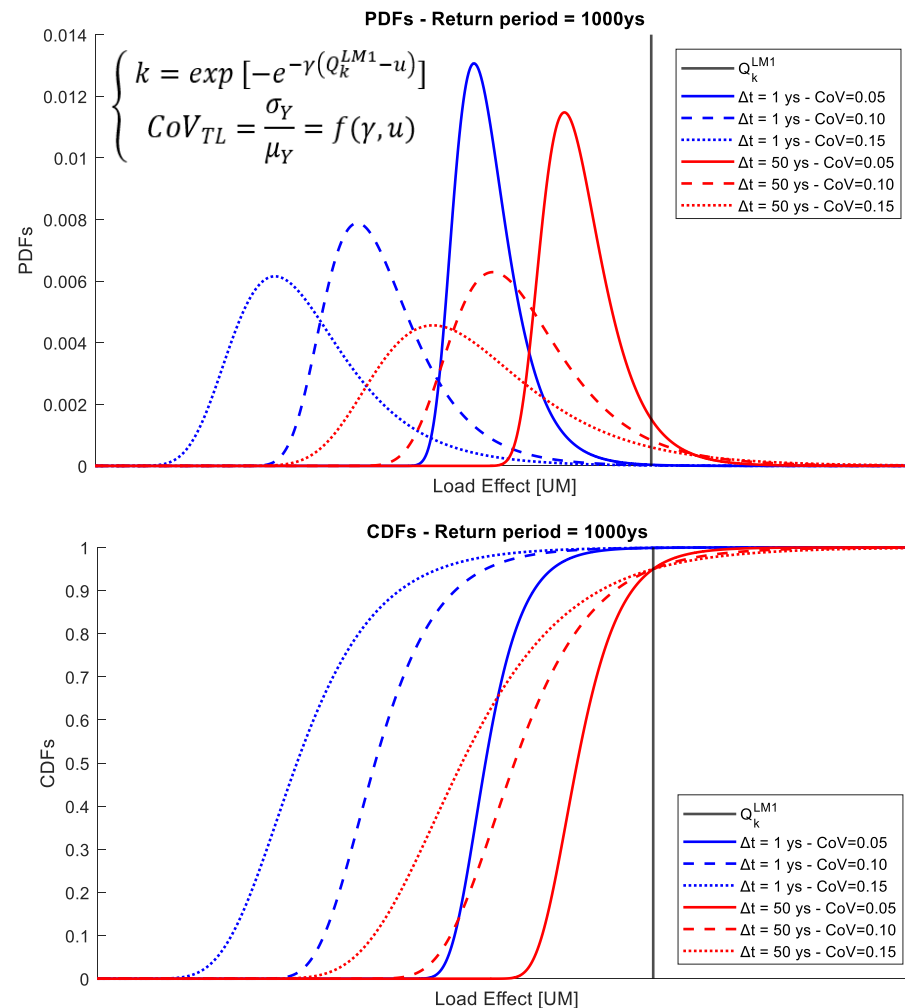


Tab. 5.1.II - Intensità dei carichi Q_{ik} e q_{ik} per le diverse corsie

Posizione	Carico asse Q_{ik} [kN]	q_{ik} [kN/m²]
Corsia Numero 1	300	9,00
Corsia Numero 2	200	2,50
Corsia Numero 3	100	2,50
Altre corsie	0,00	2,50

$$PL_{\alpha} = \alpha \cdot LM1$$

Distribuzione dei massimi annuali (LM1)



Flessione (SLU)

$$M_R = 0.9d_s \cdot A_s \cdot f_y + 0.9d_{sp} \cdot A_{sp} \cdot f_{p,01}$$

Taglio (SLU)

$$1) V_{R,U} = \frac{I}{S} b_w \sqrt{f_{ct}^2 + f_{ct} \cdot \sigma_{cp}}$$

$$2) V_{R,T} = \min(V_{rs}; V_{rc})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{R,S} = \frac{A_{sw}}{s} z \cdot f_{yw} \cdot \cot(\theta) \\ V_{R,C} = 0.5b_w z \cdot \alpha_{cw} \cdot f_c \cdot \frac{1}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} \end{array} \right.$$

$$3) V_{R,WS} = \left[\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100\rho \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w d$$

$$V_R = \max(V_{R,U}; V_{R,T}; V_{R,WS})$$

Fessurazione (SLE)

$$M_{CR} = \frac{I_m}{y_m^c} \cdot \left[f_{ct} + \sum_{i=1}^m \left[\frac{P_i(x)}{A_i} + \frac{P_i(x)e_i(x) - M_{G,i}(x)}{I_i} y_i^c \right] \right]$$

Verifica di sicurezza ai fattori parziali per ponte adeguato

$$CDR = \frac{R_d}{S_d}$$

Symbol	Value	Object
γ_s	1.15	Steel
γ_c	1.50	Concrete
γ_G	1.35	Dead Load
γ_{TL}	1.35	Traffic Load
γ_p	1.00	Prestressing

Table 1 – Partial Safety Factors

$$CDR(\xi) = \xi \frac{R_d}{S_d}$$

ξ = coefficiente di sensibilità

$$CDR(\xi_F) = \frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} = \frac{\xi_F \cdot \left[0.9d_s A_s \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_s} + 0.9d_{sp} A_{sp} \cdot \frac{f_{p,01,k}}{\gamma_s} \right]}{\gamma_G M_{G,k} + \gamma_{TL} M_{TL,k}}$$

$$CDR(\xi_V) = \frac{V_{Rd}}{V_{Sd}} = \frac{\xi_V \cdot V_R(\gamma_c; \gamma_s)}{\gamma_G V_{G,k} + \gamma_{TL} V_{TL,k} - \gamma_P V_P}$$

$$CDR(\xi_{CR}) = \frac{\xi_{CR} \cdot M_{CR}}{M_{TL,f}}$$

Task 4.7.1 – Procedure per l'esecuzione di prove di carico rispetto alla sicurezza dell'opera

MANCANZA DI INFORMAZIONI SULLA RESISTENZA

Informazioni insufficienti sulla resistenza a priori del ponte

9.1.2.2 Taglio

Vale quanto detto per la verifica a flessione.

Verifica da confermare con PdC (Prova di Carico)

10.1 Prescrizione prova di carico

Non essendo possibile, come usualmente avviene nelle travi c.a.p. in assenza delle informazioni di progetto, conoscere l'effettivo quantitativo di armatura di precompressione, considerato che il quantitativo di armatura richiesto è compatibile con il quantitativo che potrebbe essere effettivamente in opera nella trave c.a.p. la verifica di sicurezza è da ritenere plausibilmente positiva, con prescrizione di esecuzione di una prova di carico.

Si prescrive quindi una prova di carico per l'accertamento in opera della sicurezza.

**ESTRATTO VERIFICHE
DI SICUREZZA
(ENTE LOCALE)**

L'Ente, in assenza di informazioni di progetto e di approfondite indagini in sito, ricorre alla prova di carico per valutare il livello di sicurezza dell'opera.

Assumendo che la resistenza della struttura (R) sia uguale alla somma degli effetti prodotti dalla prova di carico (PL) e dal carico permanente (G), deterministici

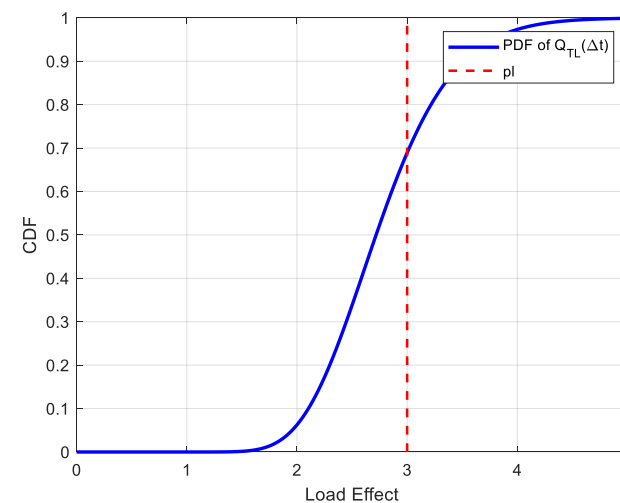
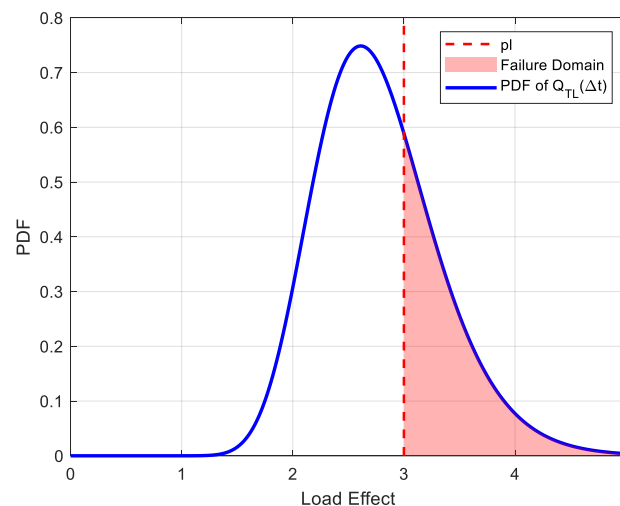
$$R = PL + G$$

Effetto dovuto ai carichi da traffico $\rightarrow Q_{TL}(\Delta t)$

LA PROBABILITÀ CHE LA STRUTTURA FALLISCA NEL PERIODO DI RIFERIMENTO (Δt) DOPO CHE SIA STATA EFFETTUATA UNA PROVA DI CARICO pl È PARI A:

$$P_f(\Delta t) = 1 - CDF_{Q_{TL}(\Delta t)}(pl)$$

Informazioni relative a carichi già transitati/applicati



Il risultato dipende significativamente dalla definizione degli effetti dei massimi carichi da traffico

RIFERIMENTI NORMATIVI

- 1) EN 1991-2: 2: Traffic loads on bridges (**EC**)
- 2) fib Model Code for Concrete Structures 2020 (**MC20**)

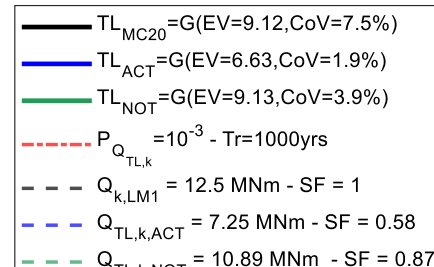
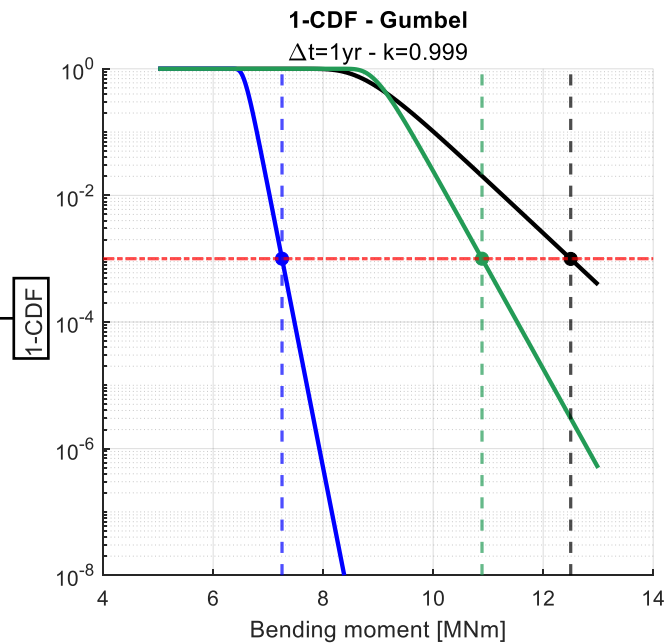
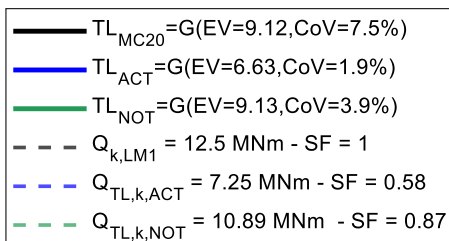
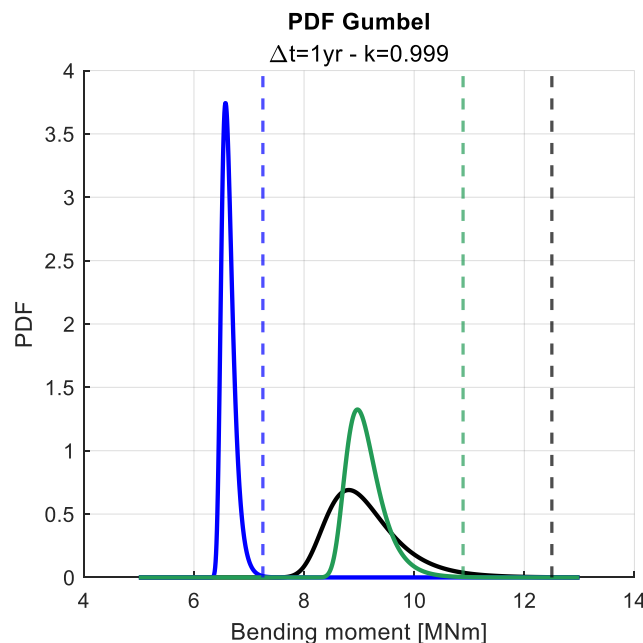
$$Q_{TL}(\Delta t) = \theta_E \cdot C_{0t} \cdot TL(\Delta t)$$

Table 13.4-1: Indicative statistical characteristics of the time-variant component of selected variable loads for various reference periods (assuming Gumbel distribution)

Variable load, load parameter	Ref. period	Probab. P_{Qk} [-]	CoV (V_Q) [-]	Bias (μ_Q / Q_k) [-]
Road traffic (T)	1 year	0.999	0.075	0.73
	5 years	0.995	0.069	0.80
	50 years	0.95	0.061	0.90

- $TL(\Delta t)$ la componente tempo-variante (massimi effetti nel periodo di riferimento);
- C_{0t} la componente tempo-invariante legata all'incertezza della posizione trasversale dei veicoli pesanti sul ponte, amplificazione dinamica, variazione della distribuzione del carico sui diversi assi in caso di accelerazione o frenata e assunzioni riguardo la combinazione del carico in diverse corsie;
- θ_E incertezza di modello nel passare da carico ad effetto;

Confronto tra i massimi effetti forniti dalla normativa (LM1) e i dati WIM



Probabilità di superamento annuale

$$Q_k^{TL-WIM} = SF \cdot Q_k^{LM1}$$

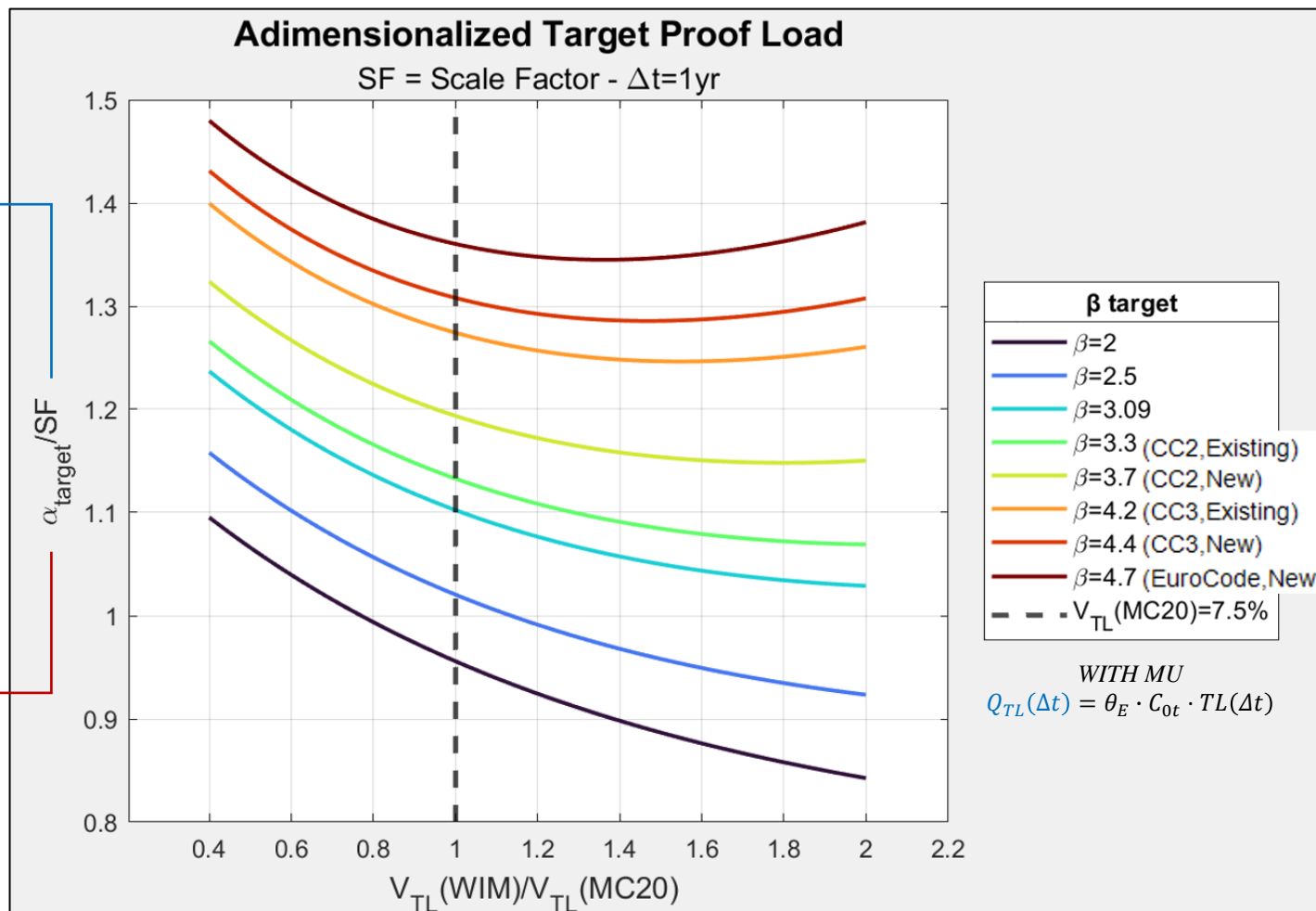
MANCANZA DI INFORMAZIONI SULLA RESISTENZA

ABACO di Progetto / Verifica

SF = Scale Factor – rapporto tra l'effetto WIM con stesso periodo di ritorno dell'effetto dell'Eurocodice e l'effetto da Eurocodice LM1

$$\frac{Q_k^{TL-WIM}}{Q_k^{LM1}} = SF$$

α_{target} = moltiplicatore degli effetti LM1 che restituisce il carico di prova (**proof load, PL**) da applicare sul ponte per dimostrare un livello di affidabilità target $\beta_{target} \rightarrow PL = \alpha_{target} \times LM1$

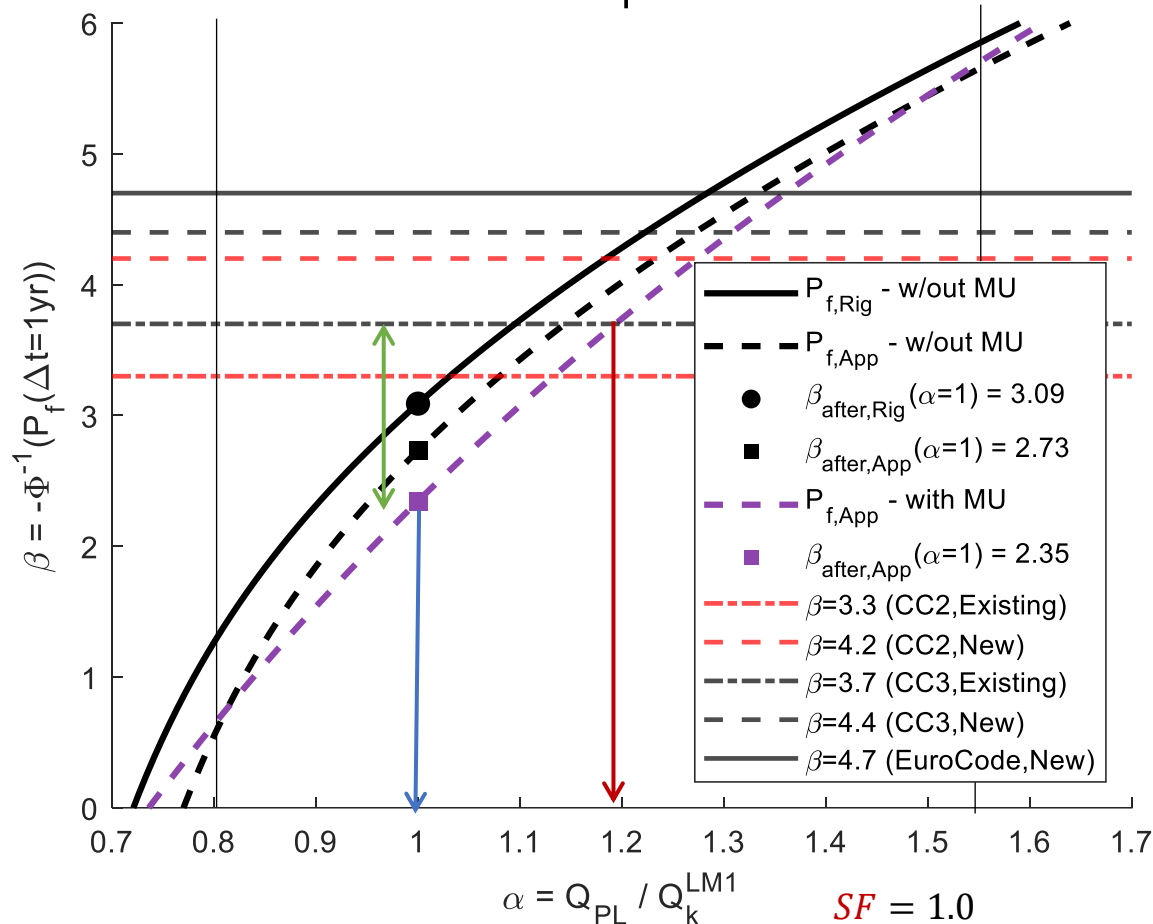


*Joint Committee on Structural Safety. (2000). JCSS Probabilistic Model Code.

Rapporto tra CoV annuali degli effetti reali e quelli di riferimento (e.g. 7,5% in Model Code 2020)

Ipotesi di assenza di informazioni e carico da traffico Q_k^{LM1}

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f(\Delta t=1\text{yr}))$$

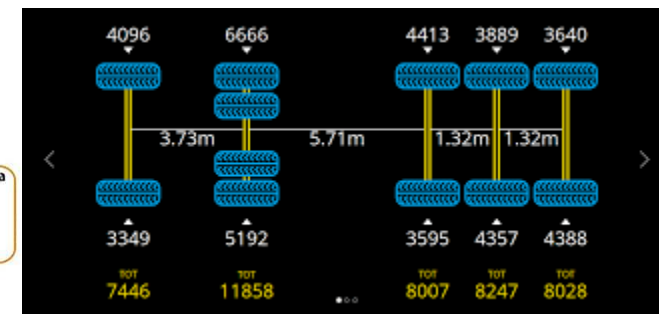
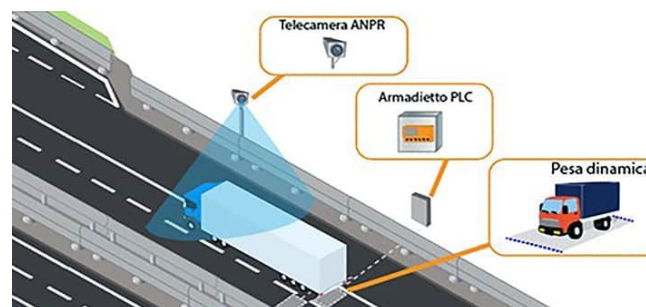


Le tre curve rappresentano tre livelli di approssimazione della variabile effetti dei carichi da traffico $Q_{TL}(\Delta t)$

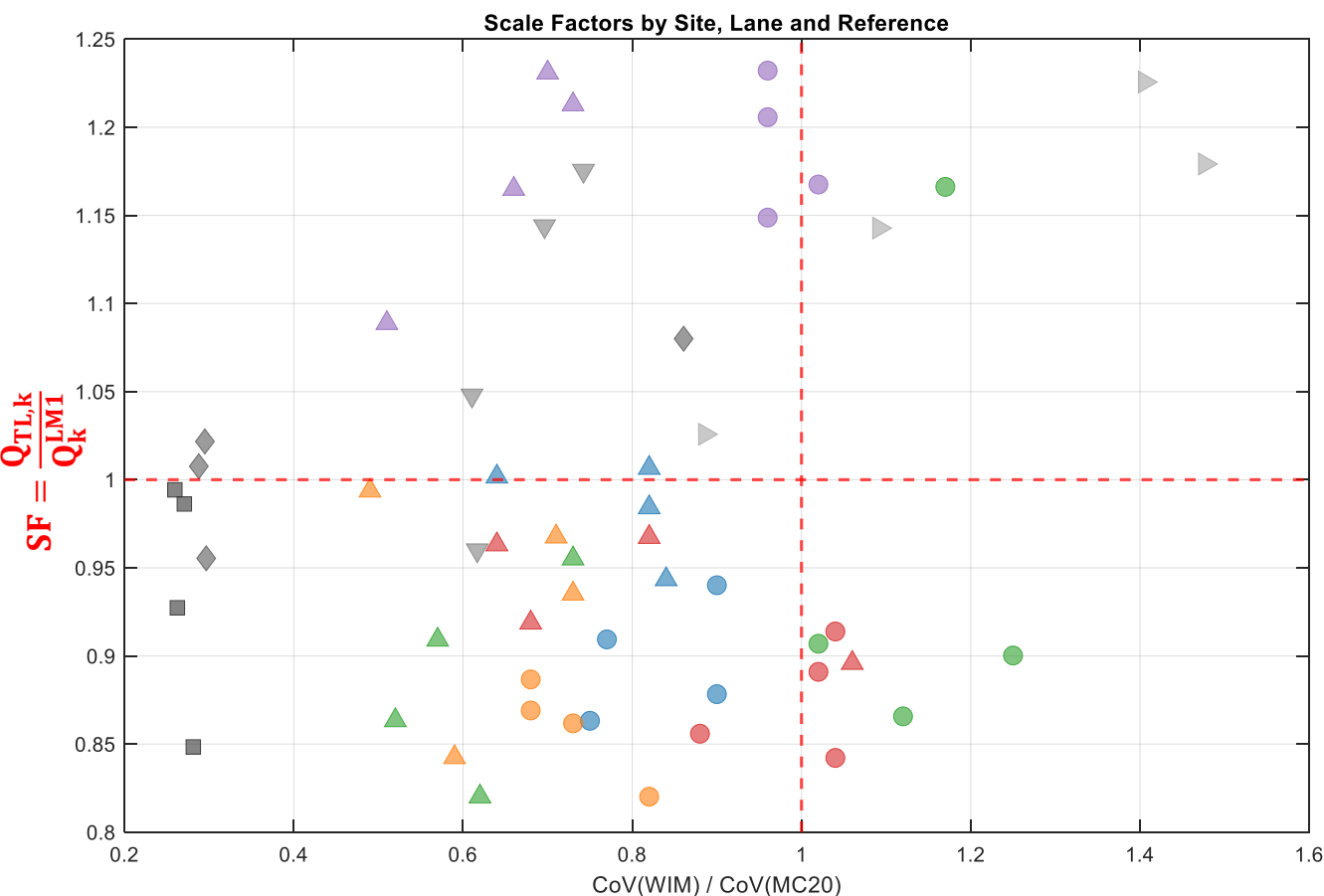
In assenza di informazioni ed utilizzando il modello di traffico LM1, la riproduzione della combinazione caratteristica ($\alpha = 1$) non è sufficiente a dimostrare un'affidabilità target annuale (CC3, Existing = 3.7) per la quale si necessita di almeno $\alpha = 1.2$

RISULTATO GENERALIZZABILE PER QUALUNQUE PONTE in assenza di informazioni

La disponibilità di dati reali può informare la valutazione della sicurezza tramite PLT



POSSIBILITÀ DI INTEGRARE MODELLI DI CARICO BASATI SU MISURE REALI DEI CARICHI DA TRAFFICO, ad esempio pese dinamiche (WIM)



RISULTATI DA SIMULAZIONI DI LETTERATURA:

- Momento Flettente
- 4 luci (15,25,35,45m)
- 2 schemi di ripartizione trasversale (High, Low)

de Vries, R., Lantsoght, E. O. L., Steenbergen, R. D. J. M., & Naaktgeboren, M. (2023). *Proof Load Testing Method by the American Association of State Highway and Transportation Officials and Suggestions for Improvement*. Transportation Research Record, 2677(11), 245-257. <https://doi.org/10.1177/03611981231165026>

Casas, J. R., & Gómez, J. D. (2013). *Load Rating of Highway Bridges by Proof-loading*. KSCE Journal of Civil Engineering, 17:556-567. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-0007-8>

Le azioni con $SF < 1$ hanno periodo di ritorno minore rispetto al modello normativo di riferimento

POTENZIALE EFFETTO BENEFICO

Q_k^{LM1} rappresenta l'effetto riprodotto dal LM1, definito come effetto con periodo di ritorno pari a 1000 anni

$Q_{TL,k}$ rappresenta l'effetto dei carichi da traffico reali avente stesso periodo di ritorno del LM1, ovvero 1000 anni

METODI DI PROVA

Prova di carico tradizionale (cfr. NTC 2018; Linee Guida Ponti)

...Oggi



Autocarri



Vasche d'acqua



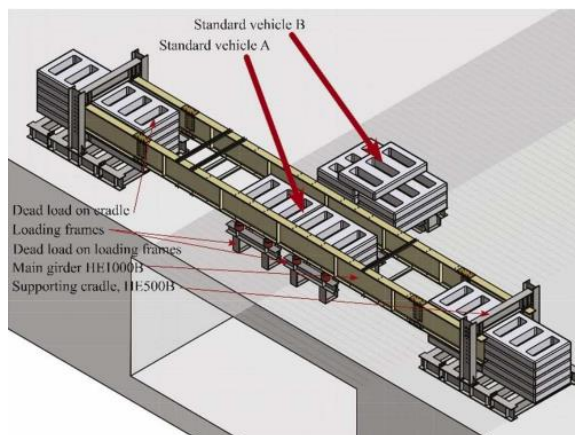
Zavorre

Domani...

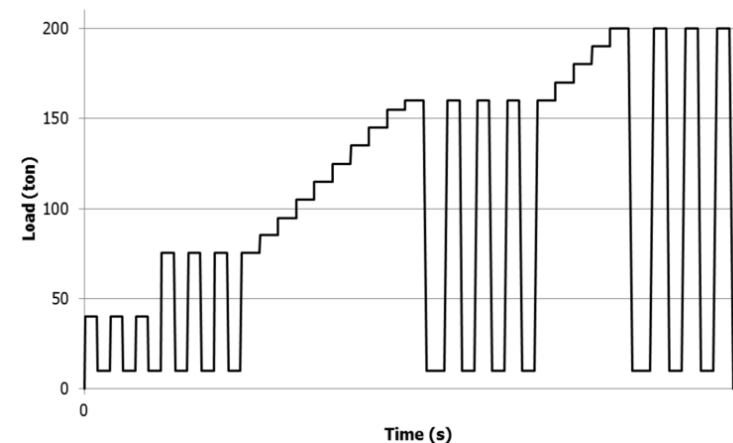
Prova di carico innovativa



Telaio di contrasto con martinetti

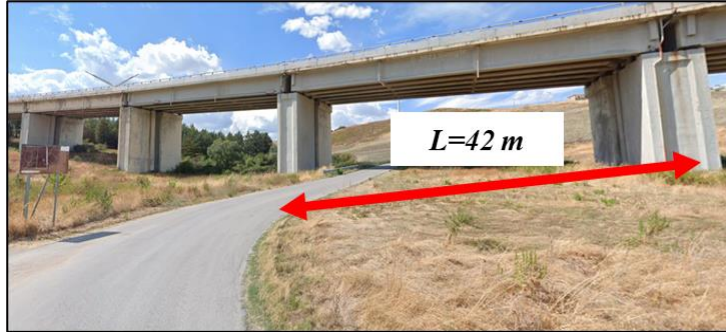


Telaio di contrasto con martinetti



Protocollo di carico

CASO STUDIO

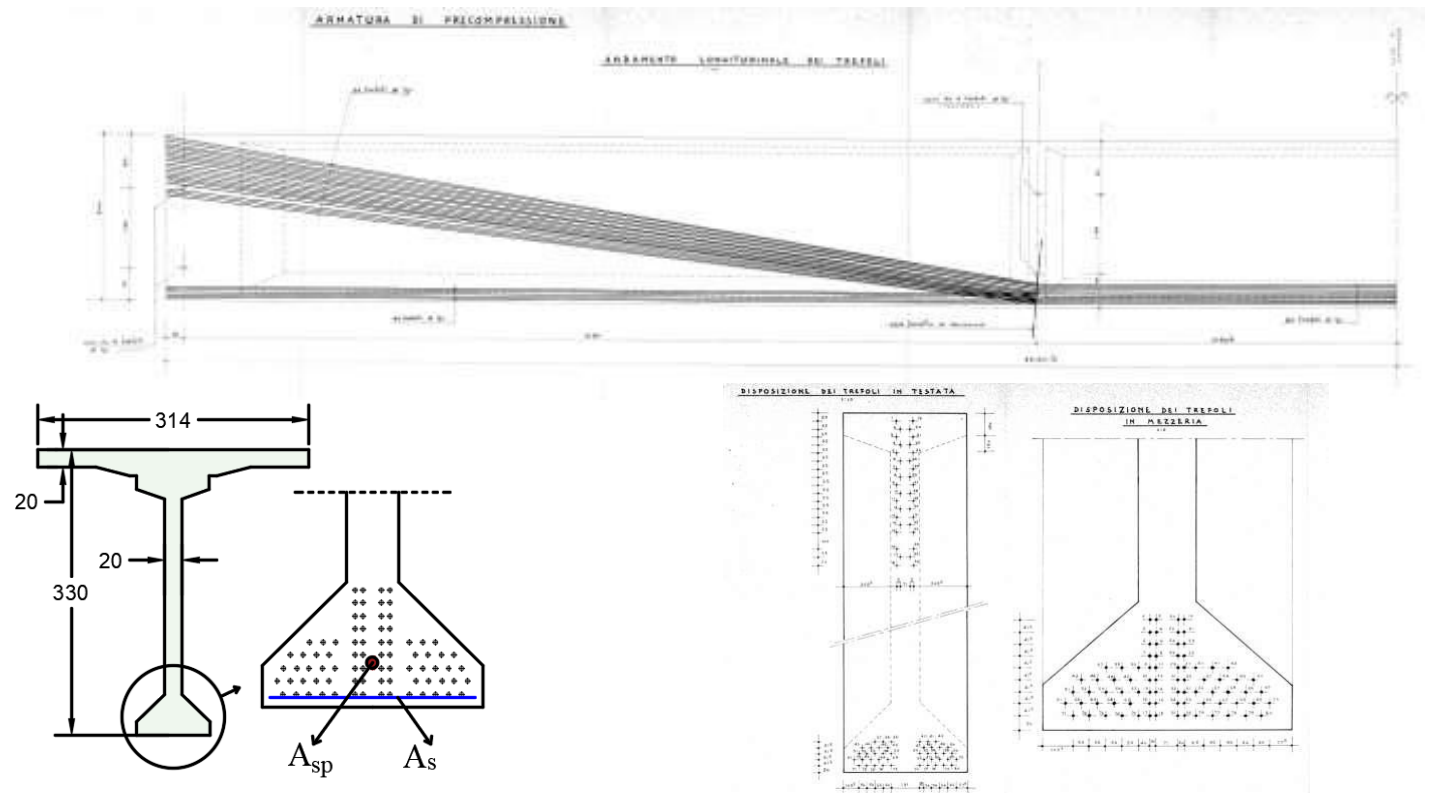
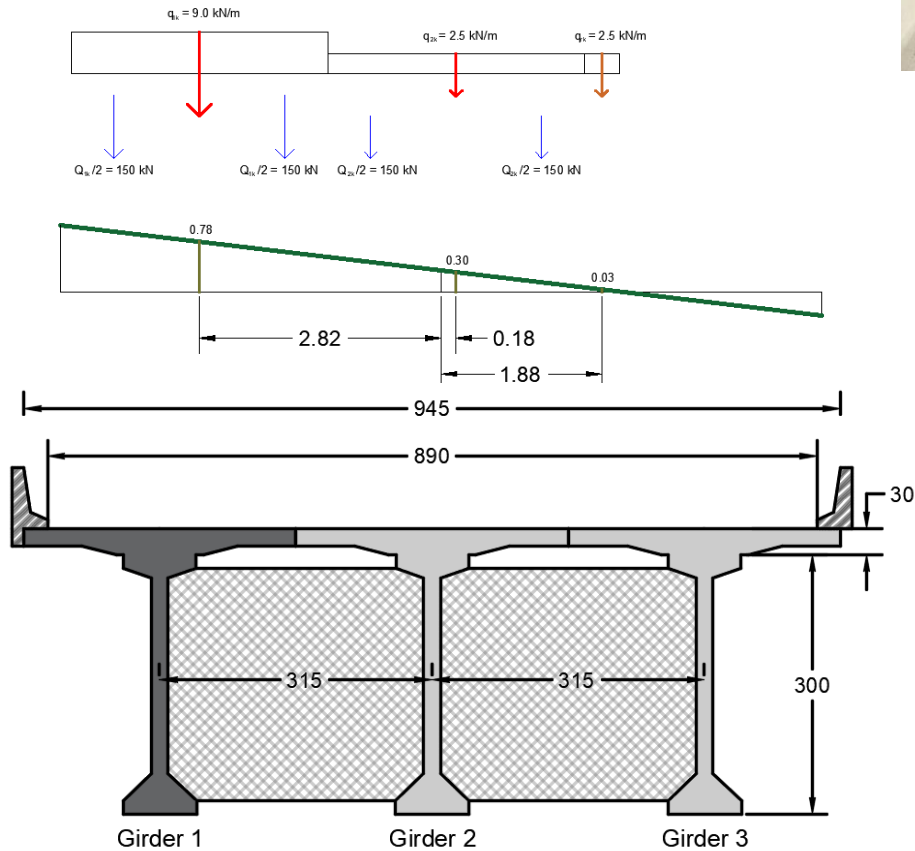


Dati:

- Ponte a travata esistente in c.a.p. (21 campate x 6 travi)
- Prove di carico a seguito di interventi di manutenzione straordinaria
- Prova di carico a ponte chiuso (combo rara) effettuata con successo

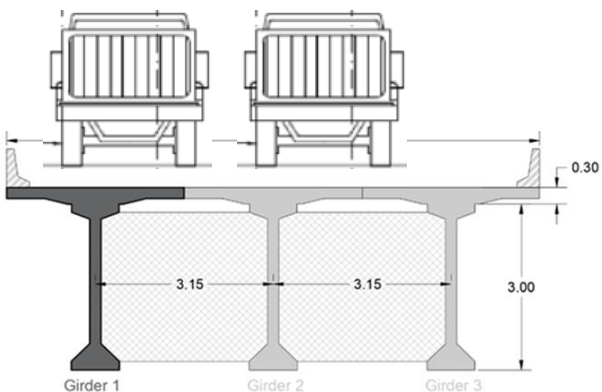
Hp:

- Analisi sezionale della trave di bordo
- Analisi tempo-invariante



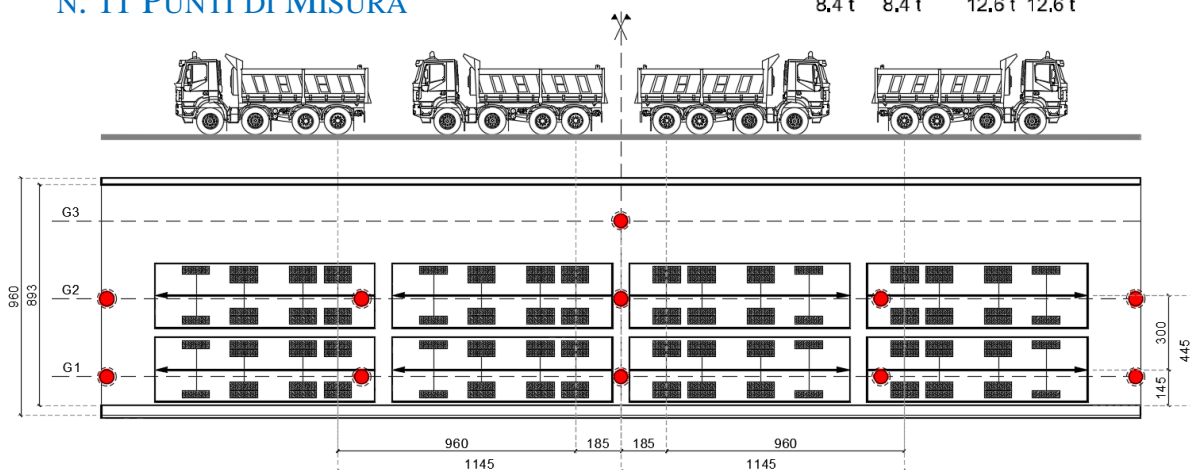
ESECUZIONE DELLA PROVA DI CARICO

$$PL_{\alpha} = 1,0 \cdot LM1$$

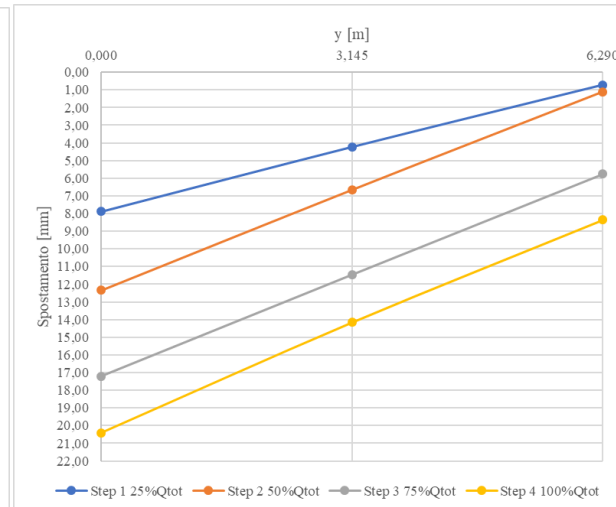
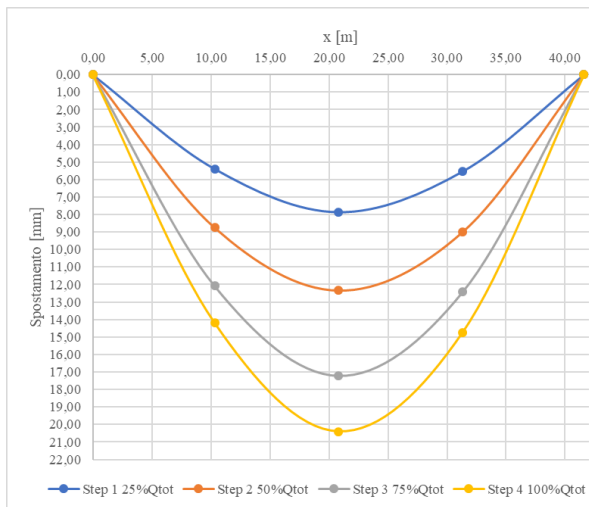


N. 8 MEZZI D'OPERA

N. 11 PUNTI DI MISURA



COMPORTAMENTO FORZA - SPOSTAMENTO



L'esito della prova ha consentito di verificare che:

- ☐ Le deformazioni aumentano in maniera pressoché proporzionale ai carichi;
- ☐ nel corso della prova non si siano prodotte fratture, fessurazioni, deformazioni o dissesti che compromettono la sicurezza o la conservazione dell'opera;
- ☐ la deformazione misurata è non maggiore di quella calcolata.
- ☐ la deformazione residua allo scarico risulta non superiore al 5% di quella massima misurata.

Task 4.7.2 Validazione sperimentale

Geometria

Geometrical property	Symbol	Unit	Value	Notes
Span Length	L	m	42	Simply supported beam
Carriageway Width	w	m	8.9	
Total Deck Height	H	m	3.3	
Effective Depth of Reinforcing Steel	d_s	mm	3260	$H - c_s$
Effective Depth of Prestressing Steel	d_{sp}	mm	3135	$H - c_{sp}$
Design Prestressing Steel Area	A_{sp}	mm ²	7740	80 strands of 7 wires 1/2"
ETD† from the Bottom at Mid-Span	c_{sp}	mm	165	
ETD† from the Bottom at the Shear-Critical Section	c_{spc}	mm	1100	
Equivalent Strand Inclination at Support	ψ	°	3.8	
Undamaged (Design) Reinforcing Steel Area	A_s	mm ²	2670	6Φ10+7Φ20
Mid-Span Centroid Cover of Reinforcing Steel	c_s	mm	40	
Stirrups Area	A_{sw}	mm ²	100	
Stirrups Distance	s	mm	290	2x1Φ8

† Equivalent Strand Distance

Table 1 - Geometrical properties

Variabili meccaniche

Material	Variables	Symbol	Unit	Mean	CoV	RV Model
PS	Conventional Yielding Strength	$f_{p,01}$	MPa	1645 ^{a,b,c}	2.5% ^{b,c}	Normal ^b
PS	Initial Stress	σ_{0p}	MPa	1355 ^a	3.0%	Normal
PS	Percentage of Prestressing Losses (t=∞)	Δl	-	0.25 ^a	10.0%	Normal
RS	Yield Strength	f_y	MPa	500 ^{a,b}	6.0% ^b	Normal ^b
C	Compressive Strength	f_c	MPa	35.6 ^d	20%	LogNormal
C	Tensile Strength	f_{ct}	MPa	2.7 ^e	20%	LogNormal

Table 1 – Mechanical random variables

a - Original plans

b - (Joint Committee on Structural Safety, 2000)

c - (Federation Internationale de la Précontrainte, 1976)

d - Laboratory experimental tests

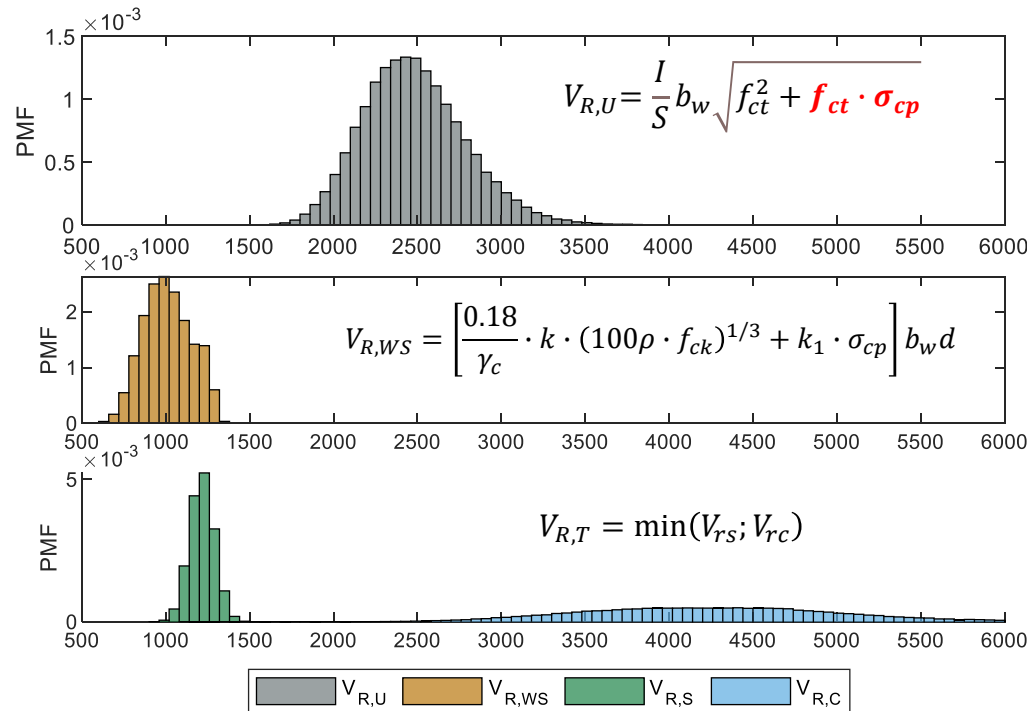
e - Analytical relationships with f_{cm} based on (Italian Ministry of Infrastructures and Transportation, 2018) and (EN 1991-1-1 - Comité Européen de Normalisation, 2004)

Inceteezze di modello

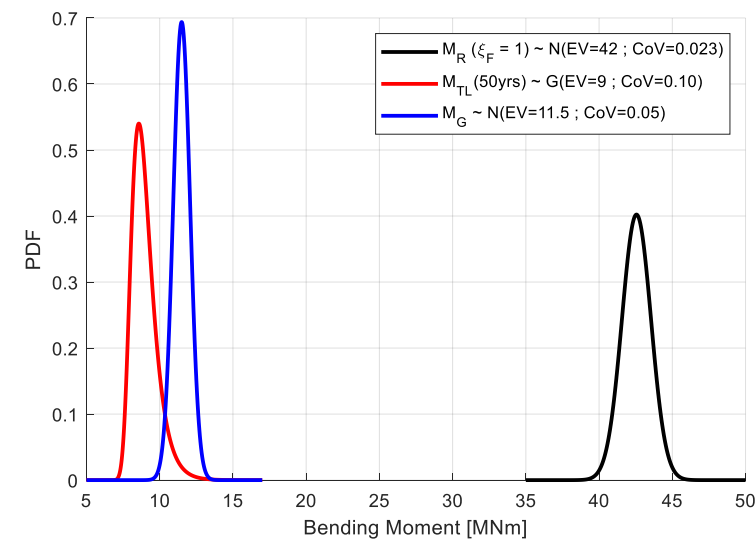
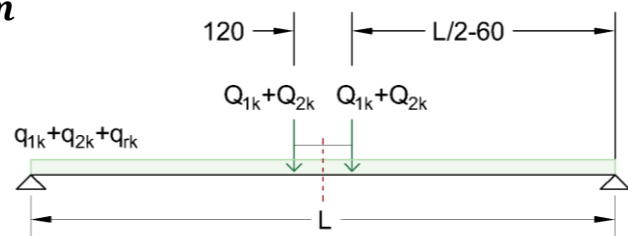
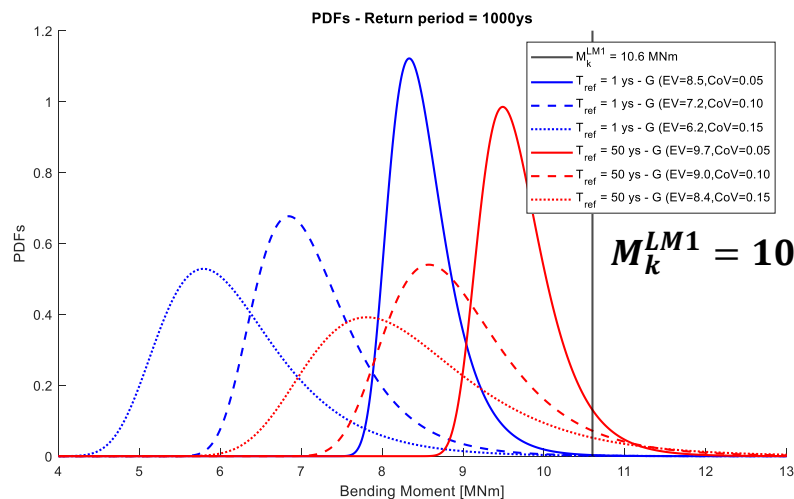
Random Variables	Symbol	Unit	Mean	CoV	RV Model
Flexural Resistance Model Uncertainty	$\theta_{R,F}$	-	1.00	5%	LogNormal
Shear Resistance Model Uncertainty	$\theta_{R,S}$	-	1.00	10%	LogNormal
Load Effect Uncertainty	θ_E	-	1.00	10%	LogNormal
Proof Load Model Uncertainty	θ_{PL}	-	1.00	5%	LogNormal

Table 1 – Model Uncertainties

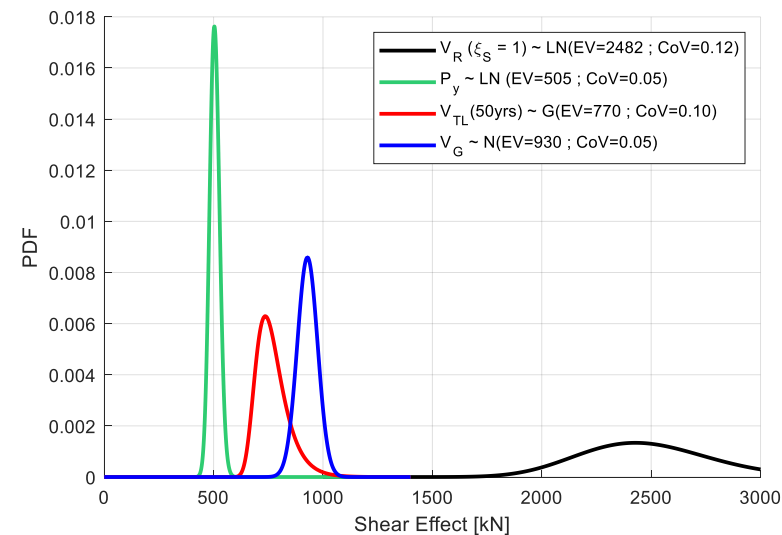
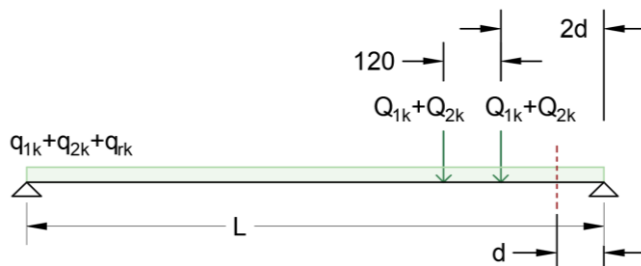
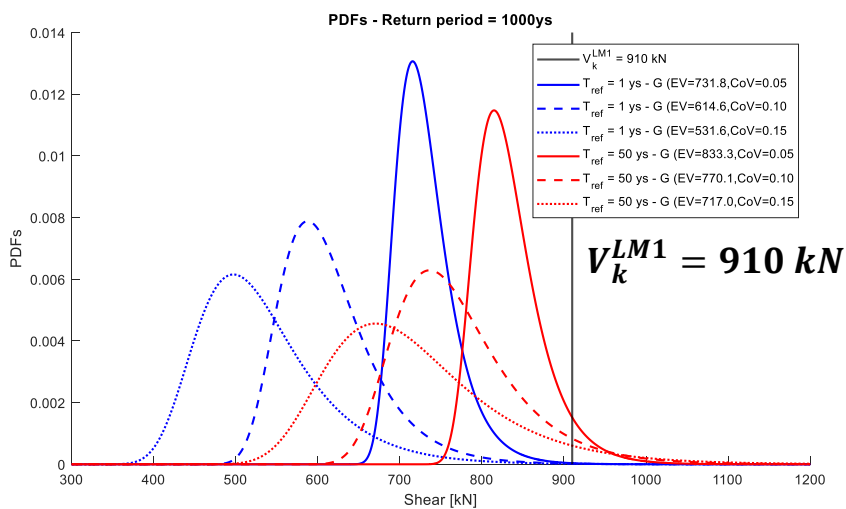
Variabilità della resistenza a Taglio



FLESSIONE (SLU)



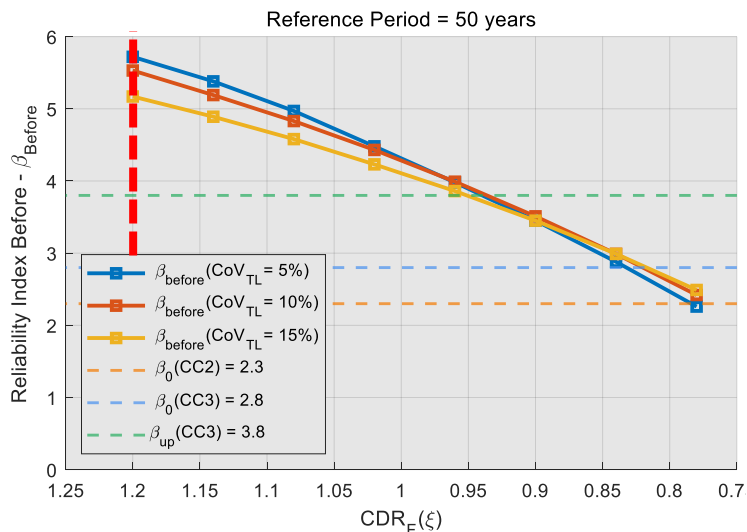
TAGLIO (SLU)



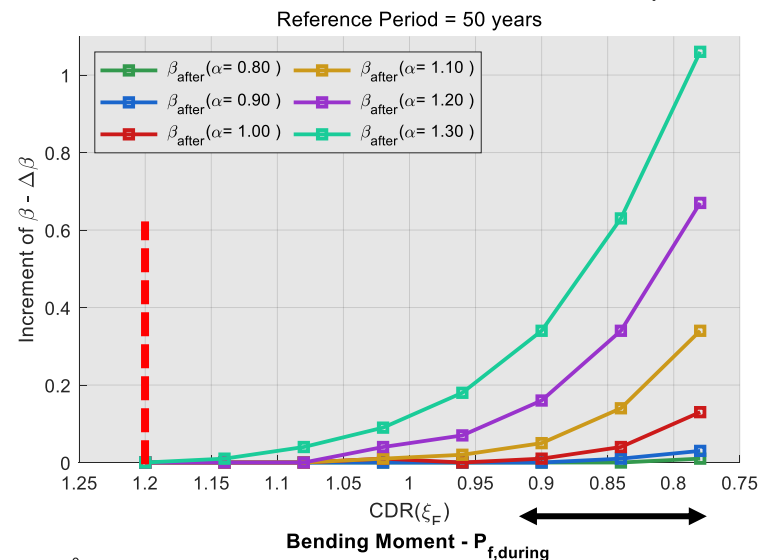
Task 4.7.2 Validazione sperimentale
FLESSIONE (SLU)

ξ_F	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
$CDR(\xi_F)$	1.20	1.14	1.08	1.02	0.96	0.90	0.84	0.78

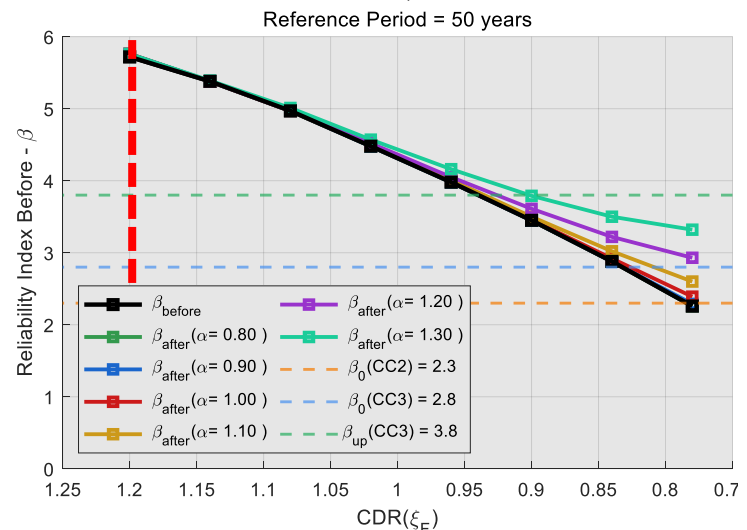
Prima della prova



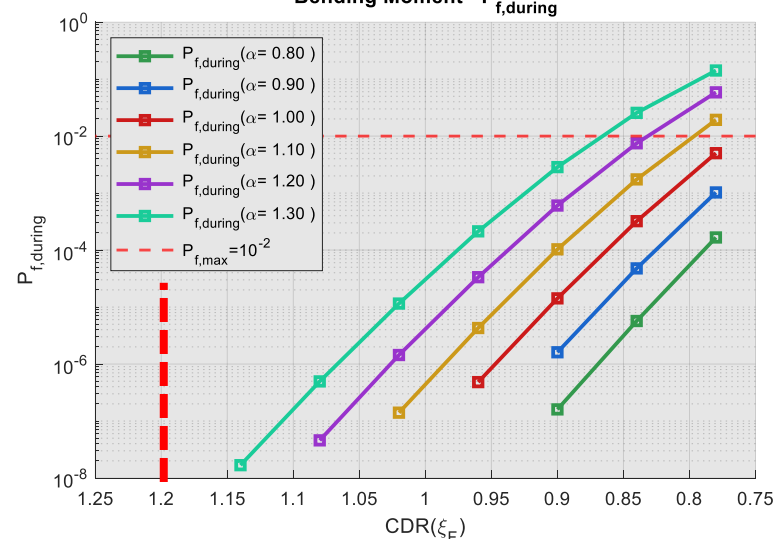
Beneficio



Dopo la prova



Collasso durante

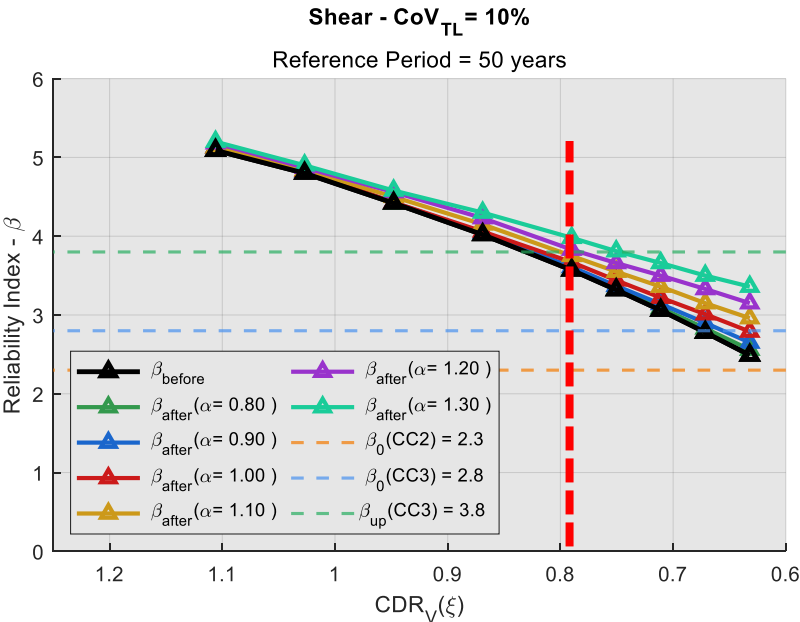


Task 4.7.2 Validazione sperimentale

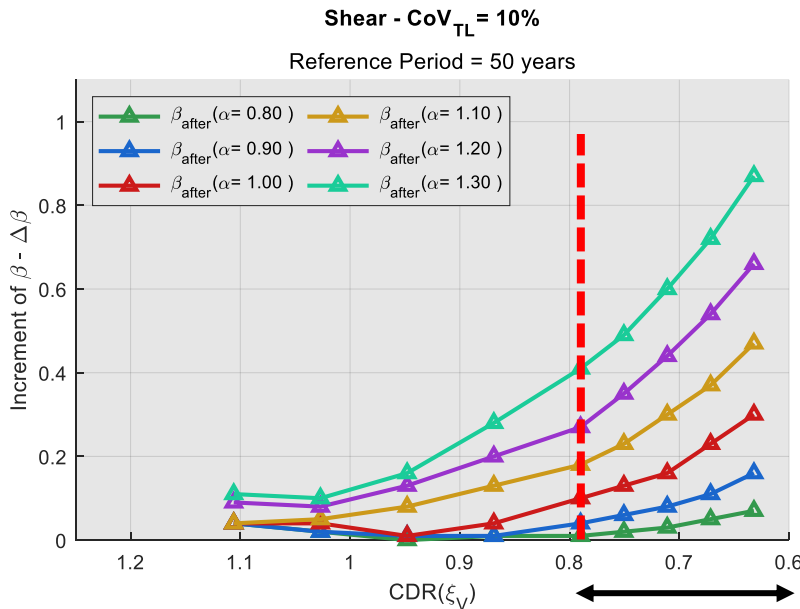
TAGLIO (SLU)

ξ_V	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80
$CDR(\xi_V)$	1.10	1.03	0.95	0.87	0.79	0.75	0.71	0.67	0.63

Dopo la prova



Beneficio



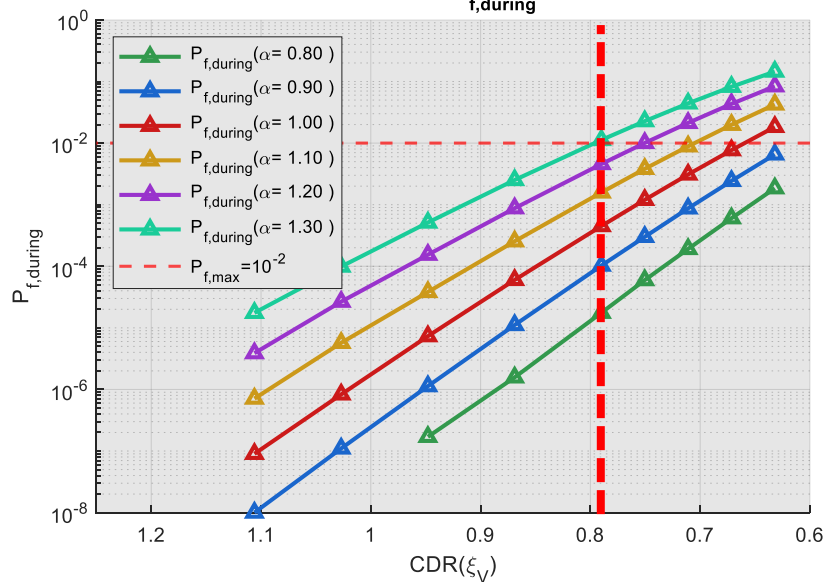
AFFIDABILITA' POST PROVA

MECHANISM	CDR ($\xi_i = 1$)	CoV_{TL}	β_{before}	β_{after} ($\alpha=1$)	$\frac{\Delta\beta}{\beta_{before}}$ [%]	$P_{f,during}$ ($\alpha=1$)
SHEAR	0.79	5%	3.48	3.60	3%	$4 * 10^{-4}$
		10%	3.57	3.67	3%	
		15%	3.54	3.60	2%	

FALLIMENTO DURANTE LA PROVA DI CARICO

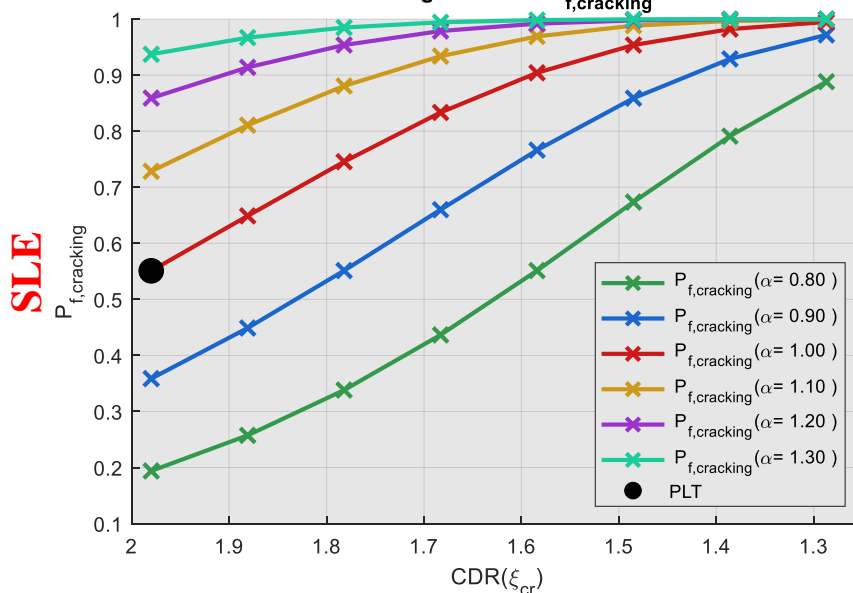
COLLASSO

Shear - $P_{f,during}$

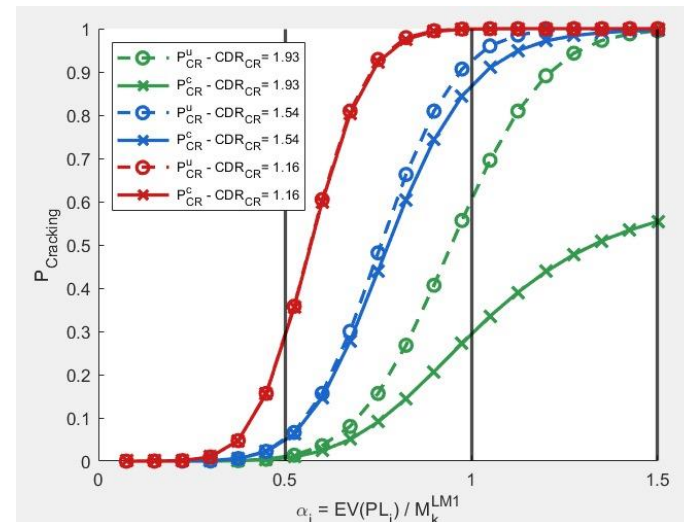


FESSURAZIONE

Bending Moment - $P_{f,cracking}$



APPLICAZIONE DEL CARICO PROVA PER STEP

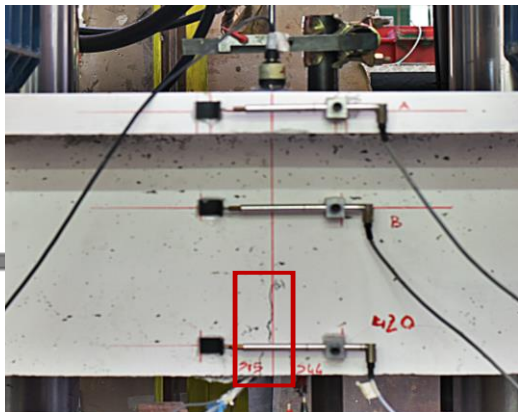


$$P_{f_i,during}^c(LS_j, PL_{\alpha,i}) = P[LS_{PL_i} \leq 0 \mid LS_{PL_{i-1}} > 0]$$

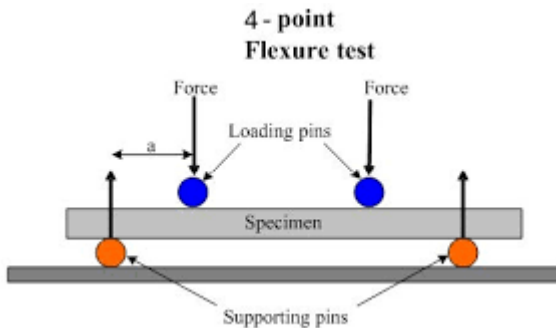
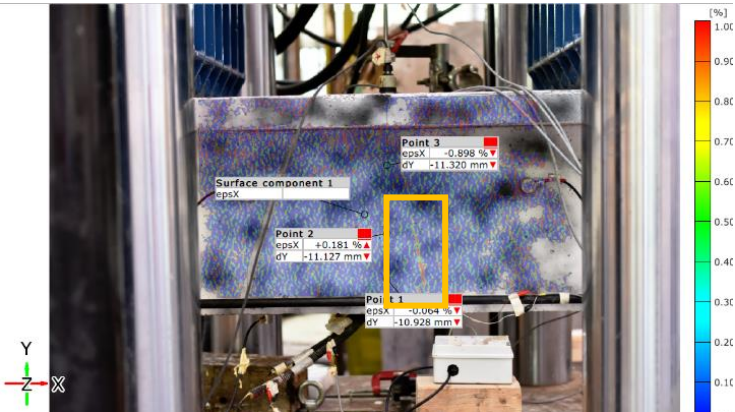
Task 4.7.2 Validazione sperimentale

MONITORAGGIO AVANZATO DURANTE LA PROVA

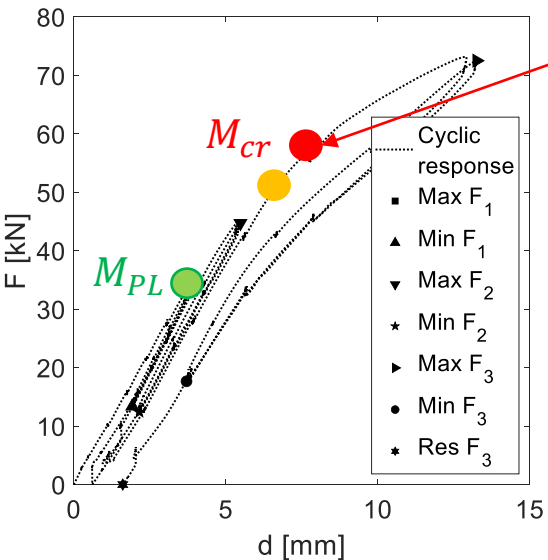
Ispezione visiva



DIC (Digital Image Correlation)



Risposta globale F - d



Prima Fessurazione ●

Incipiente fessurazione ●



TABLE 1 | Recommendations for stop criteria for proof load testing (Lantsoght et al., 2018).

Soglie di arresto

Failure mode	Cracked in bending or not	
	Not cracked in bending	Cracked in bending
Bending moment	$\epsilon_c < \epsilon_{c,lim} - \epsilon_{c0}$	$\epsilon_c < \epsilon_{c,lim} - \epsilon_{c0}$
	$w_{max} \leq 0.5 \text{ mm}$	$w_{max} \leq 0.5 \text{ mm}$
	$w_{res} \leq 0.3 w_{max}$, min 0.05 mm	$w_{res} \leq 0.2 w_{max}$, min 0.05 mm
	25% reduction in stiffness	25% reduction in stiffness
	Deformation profiles	Deformation profiles
	Load-deflection diagram	Load-deflection diagram
Shear	$\epsilon_c < \epsilon_{c,lim} - \epsilon_{c0}$	$\epsilon_c < \epsilon_{c,lim} - \epsilon_{c0}$
	$w_{max} \leq 0.3 \text{ mm}$	25% reduction in stiffness
	25% reduction in stiffness	Deformation profiles
	Deformation profiles	Load-deflection diagram
	Load-deflection diagram	

Prevenzione del danneggiamento $M_{PL} < M_{cr}$

Indici di risposta

ACI 437.1R-07

$$I_R = \text{repeatability index} = \frac{\Delta_{max}^B - \Delta_r^B}{\Delta_{max}^A - \Delta_r^A} \times 100\%$$

$$I_P = \text{permanency index} = \frac{\Delta_r^B}{\Delta_{max}^B} \times 100\%$$

$$\text{Linearity}_i = \frac{\tan(\alpha_i)}{\tan(\alpha_{ref})} \times 100\%$$

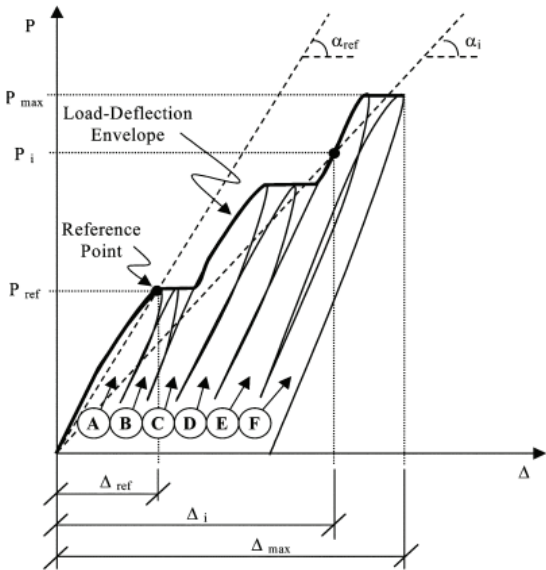
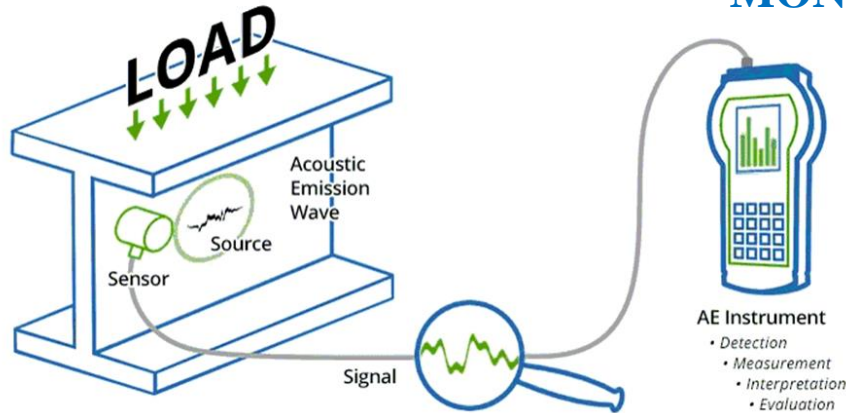


Fig. 6.2—Schematic load-versus-deflection curve for six cycles.

*Losanno D, Galano S, Parisi F, Pecce MR, Cosenza E (2024). Experimental Investigation on Nonlinear Flexural Behavior of Post-Tensioned Concrete Bridge Girders with Different Grouting Conditions and Prestress Levels. ASCE Journal of Bridge Engineering, 29: 3

Task 4.7.2 Validazione sperimentale

MONITORAGGIO AVANZATO DURANTE LA PROVA



Acoustic Emissions (AE): Onde elastiche transitorie generate all'interno di un materiale quando esso subisce un rilascio di energia localizzato e rapido dovuto a processi di danneggiamento/degrado.

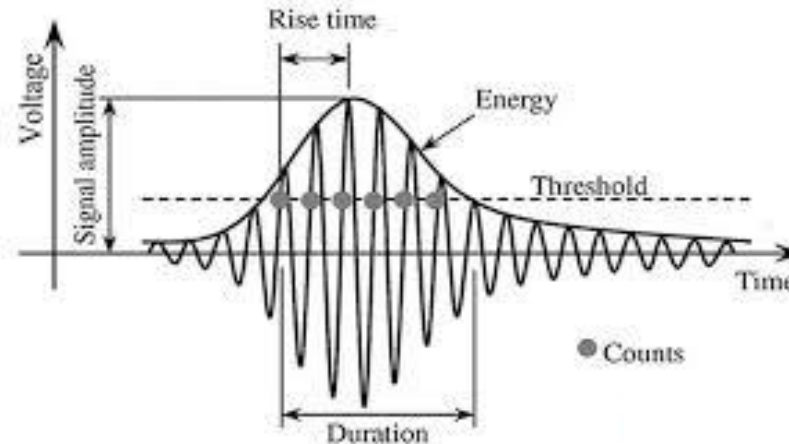
AE testing: Tecnica non distruttiva passiva per il monitoraggio dello stato di salute dei sistemi ingegneristici (in tempo reale).

Entropia acustica: Misura del grado di disordine o complessità nei segnali AE

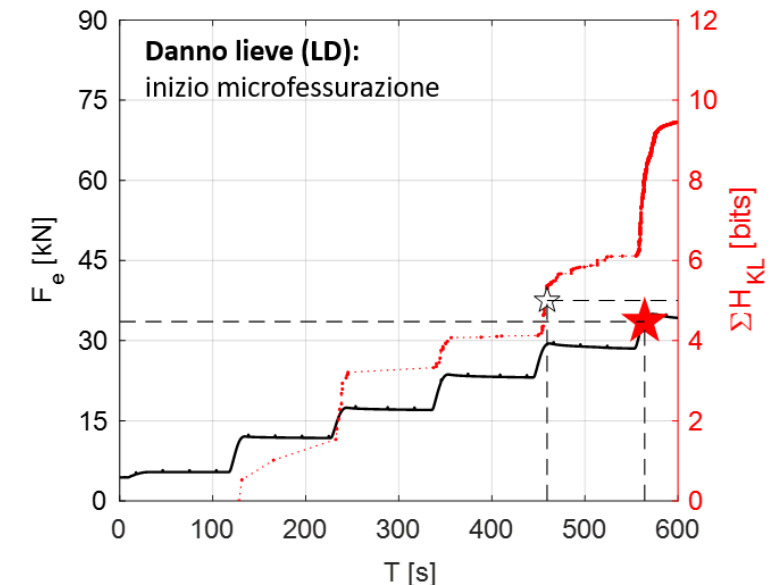
L'analisi in tempo reale permette l'identificazione delle fonti dell'AEs, ovvero fenomeni di danneggiamento e degrado.



AE FEATURES



ENTROPIA



* D'Angela D, Magliulo G, Losanno D, Parisi F, Prota A (2025). Development and validation of acoustic emission criteria for cracking assessment of prestressed RC girders., *Structural Health Monitoring*

Attività in corso e sviluppi futuri

PERDITE ATTESE

ANALISI DELLE PERDITE ATTESE

$$EL = E[C] = \sum P(E_n) \cdot C(E_n)$$

Con $P(E_n)$ e $C(E_n)$ rispettivamente la probabilità e il costo dell'evento E_n

$$EL_{PLT} \sim C_{fissi,PLT} + \sum_{SL_i}^{During} P(SL_i|pl) \cdot C(SL_i) + C_{i,PLT} = C_{d,PLT} + C_{i,PLT}$$

$$EL_{VAL4} \sim C_{fissi,VAL4} + P(CDR < 1|VAL4) \cdot C(Intervento) + C_{i,VAL4} = C_{d,VAL4} + C_{i,VAL4}$$

- C_d e C_i costi diretti e indiretti, rispettivamente
- SL_i lo stato limite i -esimo
- $C(Intervento)$ è il costo dell'intervento di adeguamento con $\beta > \beta_{target}$
- $C_{i,PLT}$: costi indiretti associati a limitazioni del traffico durante PLT (es. CDA Alta)
- $C_{i,VAL4}$: costi indiretti associati a limitazioni del traffico durante VAL4 (es. CDA Alta)

NB: Nel caso in cui si disponga di un carico già transitato i $C_{fissi,PLT}$ si riducono significativamente

Stima dei COSTI INDIRETTI (sismica):

circa 2-5 volte i costi diretti

$$C_i = k \cdot C_d$$

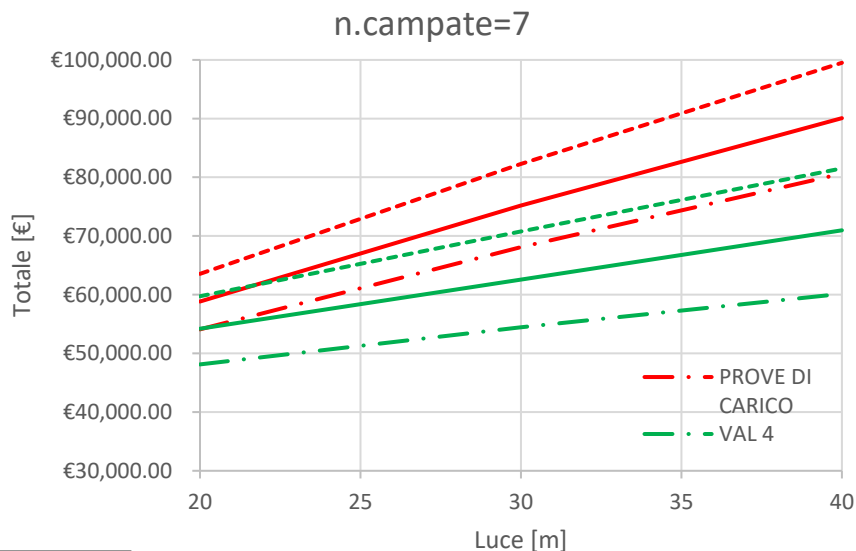
$$\frac{L_{IM(bridge)}}{C_R} = \frac{N_v \cdot D_d \cdot C_{km} \cdot T_{rc}}{C_R}$$

Calvi GM, O'Reilly GJ, Andreotti G. Towards a practical loss-based design approach and procedure. Earthquake Eng Struct Dyn. 2021;1–13. <https://doi.org/10.1002/eqe.3530>

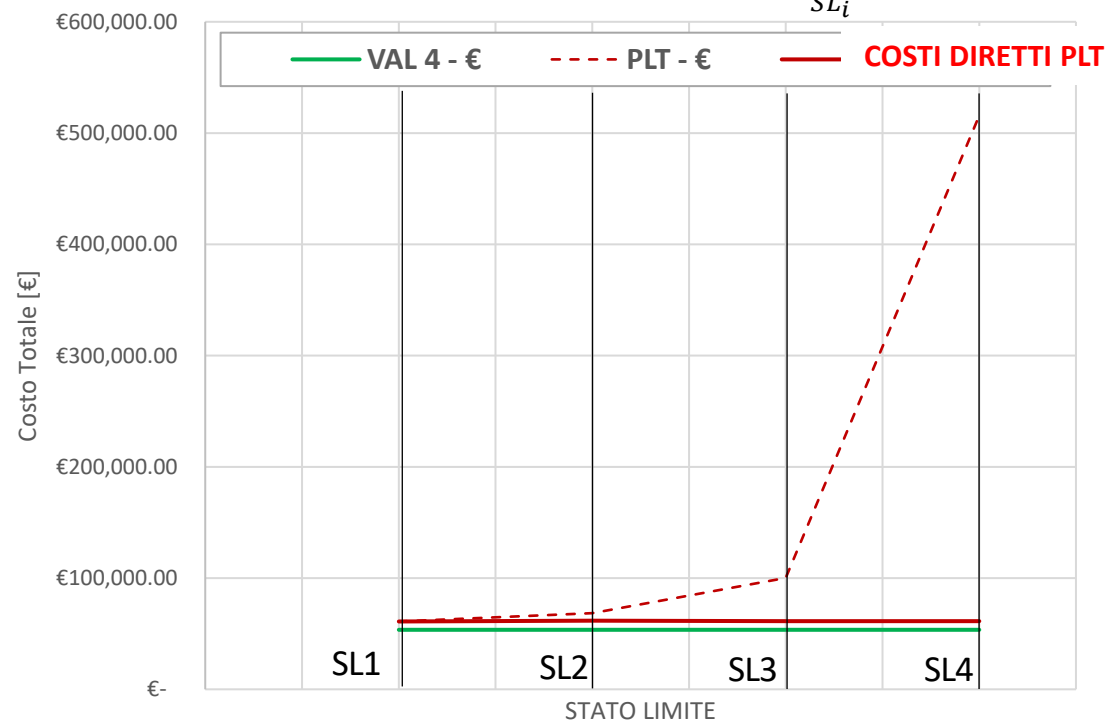
COSTI DIRETTI E PERDITE ATTESE PLT

$$\sum_{SL_i} \text{During } P(SL_i) \cdot C(SL_i)$$

COSTI FISSI DIRETTI VAL4 vs PLT



COSTI CONDIZIONATI PLT



COSTI DIRETTI VAL4 vs PLT

STATO LIMITE		PROVE DI CARICO	VAL 4	PERDITA ATTESA PLT	
Stato limite	Costo Intervento	Totale	Totale	P[-]	PxC
Operatività	0	60.971.69 €	53.510.90 €	-	60.971.69 €
Fessurazione	7.595.22 €	68.566.91 €	53.510.90 €	0.1	61.731.21 €
Snervamento	31.656.52 €	100.223.43 €	53.510.90 €	0.01	61.288.26 €
Collasso	415.709.81 €	515.933.24 €	53.510.90 €	0.001	61.387.40 €

COSTI DIRETTI FUNZIONE DI

- Categoria stradale (Autostradale, Provinciale e Comunale)
- l larghezza impalcato;
- L luce singola campata;
- n numero di campate.

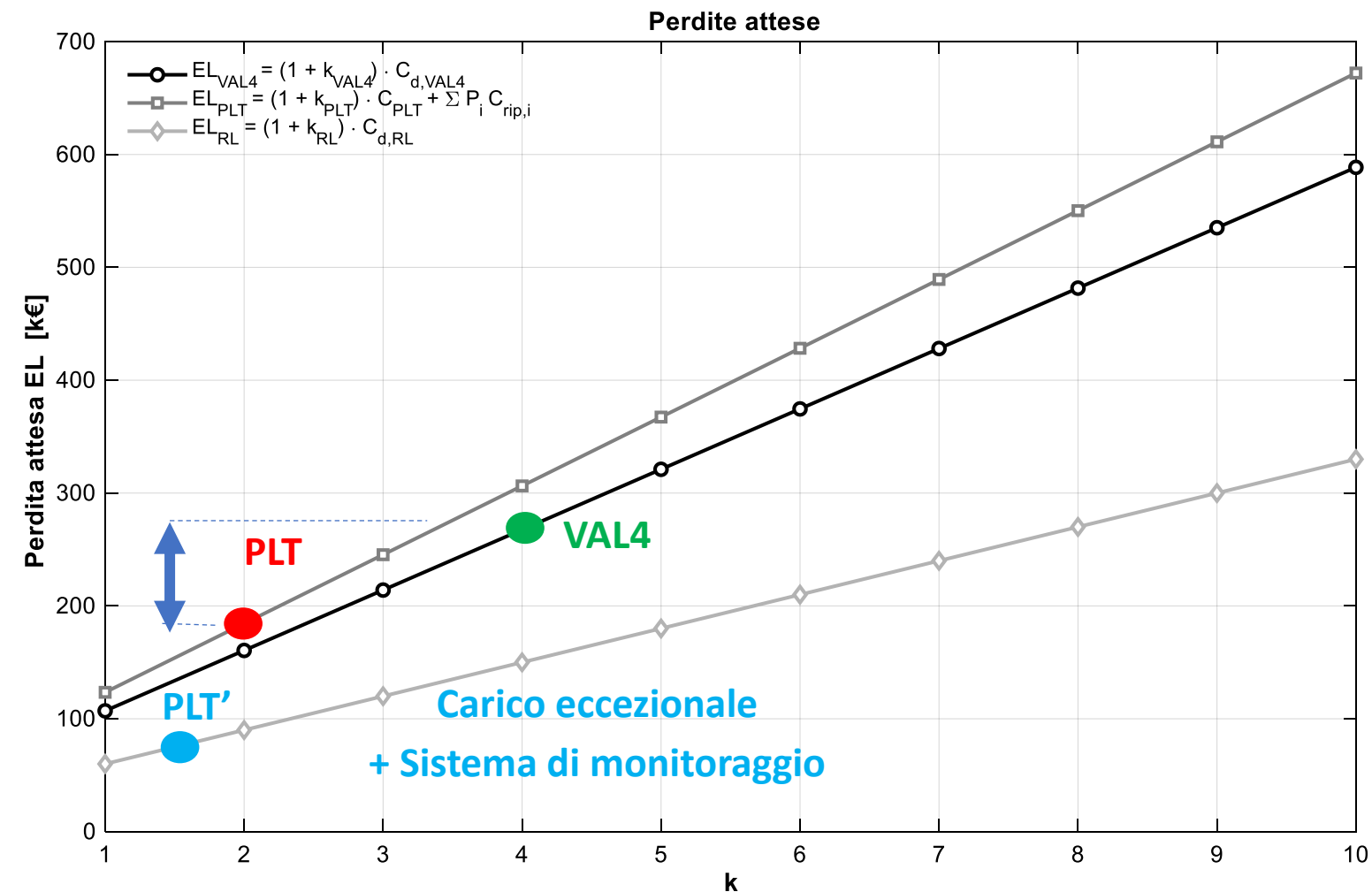
Costi fissi VAL4

- **Ispezioni e rilievi** (visiva, difetti, geometrico)
- **Indagini materiali** (carotaggi + compressione, barre + trazione, tomografia, georadar, sclerometriche, ultrasoniche)
- **Analisi strutturale** (modellazione FEM, verifiche)
- **Prova di carico** (classica)
- **Oneri sicurezza** (piattaforme + quota variabile per categoria stradale)

Costi fissi PLT

- **Progettazione della prova** (rilievo, oneri professionali)
- **Esecuzione PLT** (estensimetri, topografia, **monitoraggio avanzato**, mezzi pesanti, supervisione)
- **Oneri sicurezza** (piattaforme + quota variabile per categoria stradale)

PERDITE ATTESE INCLUDENDO I COSTI INDIRETTI



$$C_{i,VAL4} = k_{VAL4} \cdot C_{d,VAL4} \text{ ----- } C_{i,PLT} = k_{PLT} \cdot C_{d,PLT}$$

A parità di moltiplicatore dei costi indiretti ($k_{VAL4} = k_{PLT}$), la **prova di carico** risulta fornire una perdita attesa confrontabile o lievemente superiore alla **VAL4**, perché ha costi leggermente superiori dati soprattutto dalla particolarità dei sistemi di monitoraggio durante il test.

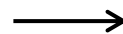
Tuttavia, i costi indiretti di una VAL4 possono essere significativamente maggiori (es. tempi maggiori per l'esecuzione della verifica).

Ad esempio, assumendo che $k_{VAL4} > k_{PLT} + 2$, per il caso presentato la perdita attesa di una PLT risulta sempre maggiore o uguale a quella di una VAL4

Categorie	Valori	Unità
Costo diretto PLT	60971.69	EUR
Costo diretto VAL4	53510.9	EUR
Costo diretto RL	30000	EUR
P fessurazione	0.1	-
P snervamento	0.01	-
P collasso	0.001	-
C ripristino fessurazione	7595.22	EUR
C ripristino snervamento	31656.52	EUR
C ripristino collasso	415709.81	EUR

LIMITAZIONE DEL TRAFFICO TRAMITE PROVA DI CARICO

La **limitazione al traffico** (es. *WIM*) influenza la sicurezza del ponte:
 noto il **condizionamento** introdotto dalla limitazione è possibile tarare il
 carico di prova **PLT** per un certo β_{target}



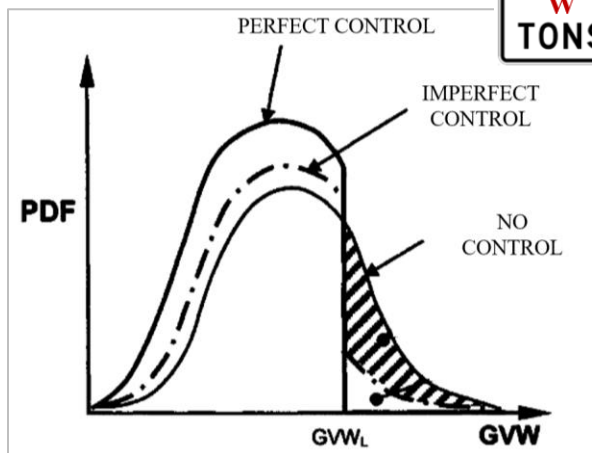
AFFIDABILITÀ strutturale

$P[\text{Fallimento in } (t, t + \Delta t)]$

MODELLO SEMPLIFICATO R-S: condizionamento distribuzione dei carichi da traffico

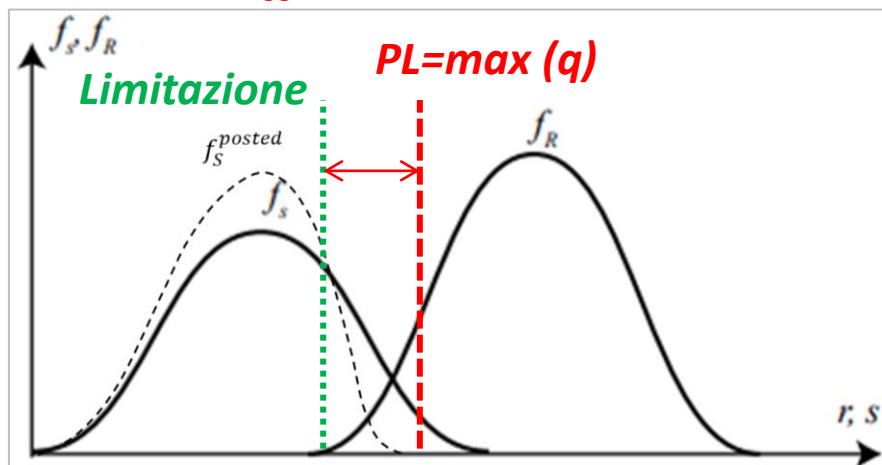
Effetto della limitazione

WEIGHT
LIMIT
W
TONS



S

Effetto sulla sicurezza



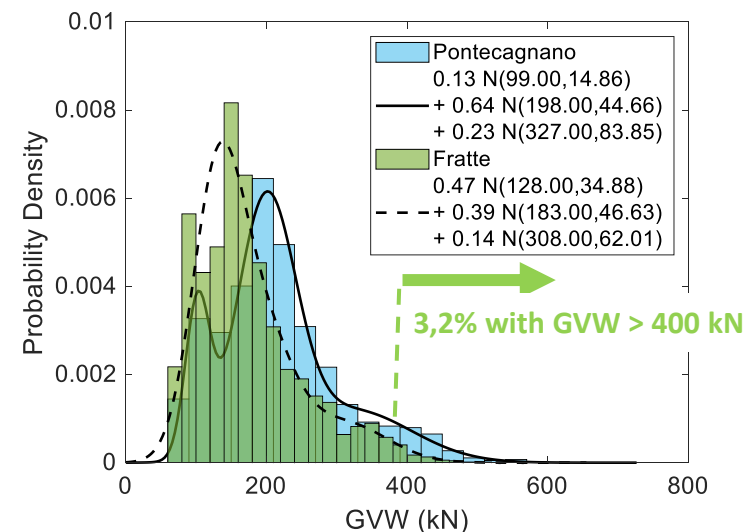
$$P_{f_before} = P_f(R - S < 0)$$

$$P_{f_after} = P_f(R - S^{\text{posted}} < 0)$$

Distribuzione dei carichi da traffico in funzione
 della severità del sistema di controllo del limite
 imposto con la segnaletica stradale (ottica LG20)

*** Asantey and Bartlett (2005). Impact of Posted Load Limits on Highway Bridge Reliability, *J. Bridge Engineering*

Pese dinamiche con sanzionamento [Autostrada A3 SPN]



*Nagavinothini R, Losanno D, Pecce MR, Parisi F (2024). Site-specific traffic modelling and simulation for a major Italian highway based on weigh-in-motion systems accounting for gross vehicle weight limitations. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*

RISULTATI AL 28/12/2025

PROPOSTE DI MODIFICA DELLE LINEE GUIDA

- **Cfr. 6.3.5.5** **BENEFICIO DELLA PROVA DI CARICO:** beneficio tangibile per ponti esistenti (**C/D < 1.0**)
Impatto LLGG: *Transitabilità temporanea > 60 giorni*

- **Cfr. 7.5.1** **EFFETTO DI CARICHI DA TRAFFICO «ECCEZIONALI»**
Beneficio della **storia documentata di carichi** (dati WIM, eccezionali, prove di carico) già applicati sul ponte per stimare affidabilità anche in assenza di informazioni sulla Resistenza
Impatto LLGG: *In assenza di fenomeni di degrado l'opera ha già visto/vede condizioni di carico rappresentative di PLT*

- **Cfr. 7.5.1** **RIDUZIONE DEL RISCHIO DURANTE LA PROVA DI CARICO:** indicazioni circa l'**applicazione progressiva del carico** e l'implementazione di **sistemi di monitoraggio innovativi**
Impatto LLGG: - *Applicare il carico per step (es. 25% del carico target)*
 - *Monitoraggio con tecniche innovative (Acoustic Emissions, Digital Image Correlation, etc)*

IMPATTO A LIVELLO INTERNAZIONALE

Technical Committee on *Bridge Load Testing* → **Linee Guida sulle prove di carico** (31/12/2026)



*Bertola N, Bhowmickb A, Casas JR, Chacon R, Cousins D, Grimson J, Lantsoght EOL, Losanno D, Olaszek P, Sas G, Shmidt JW, Valenzuela MA, Žnidarič A (2025, in press). Bridge load testing for assessment: Recent advances in application, collaboration, codes, and research. *Structure and Infrastructure Engineering*.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE