



FABRE – Consorzio di ricerca per la valutazione di ponti viadotti e altre strutture

Ponti, viadotti e gallerie esistenti: ricerca, innovazione e applicazioni

2- 4 Febbraio 2022, Lucca



Alcune considerazioni sulle incertezze nella valutazione della sicurezza degli impalcati in c.a.p.



Andrea Dall'Asta

Laura Gioiella

Fabio Micozzi

Alberto Poeta

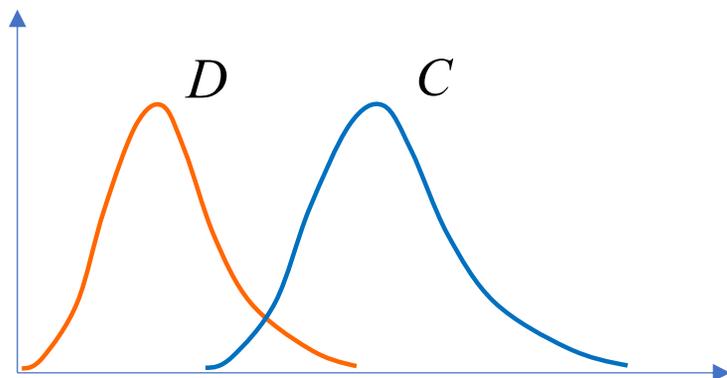


Laura Ragni

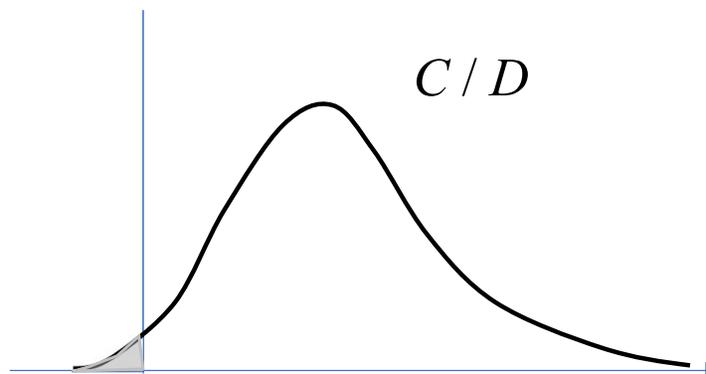
Probabilità di collasso (per anno) – Metodo generale

Capacità strutturale

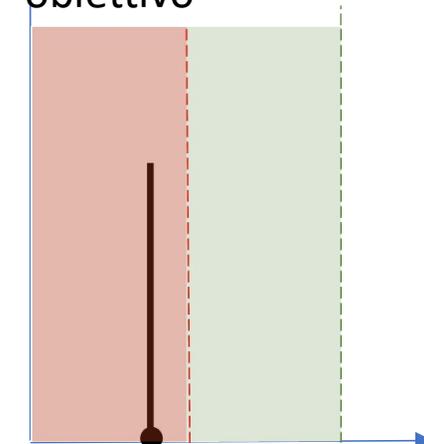
Domanda (richiesta di prestazione)



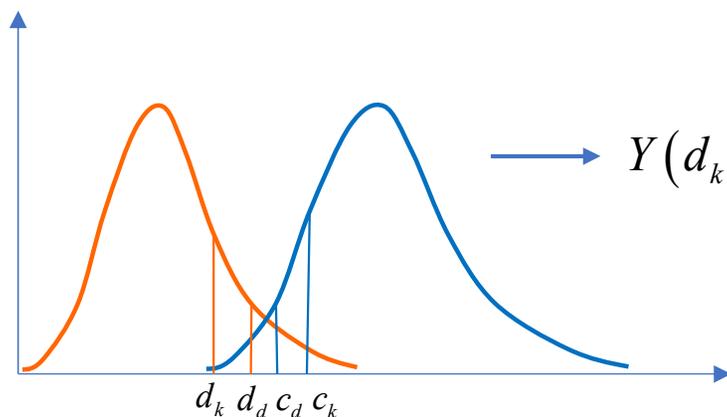
Margine rispetto al collasso



Probabilità di collasso obiettivo



Metodo convenzionale



$$Y(d_k, c_k; \gamma_d, \gamma_c) = \frac{c_d}{d_d} > 1$$

Domanda di progetto

$$d_d = \gamma_d d_k$$

Capacità di progetto

$$c_d = \gamma_c c_k$$

Verifica

$$d_d < c_d$$

Fattori γ calibrati in modo da mantenere la probabilità di collasso al di sotto delle soglie previste (studi estesi da anni 70)

Valori caratteristici premettono di considerare le diverse proprietà di dispersione di D e C

P_f
Threshold for optimal economic solution

Threshold for human safety ($2 \cdot 10^{-4}$)

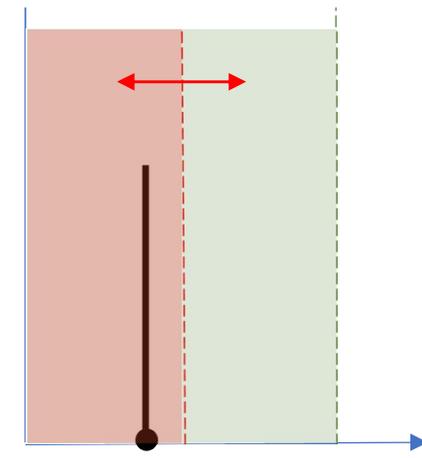
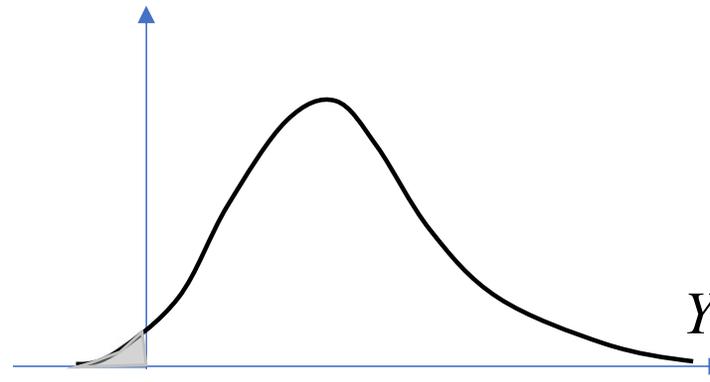
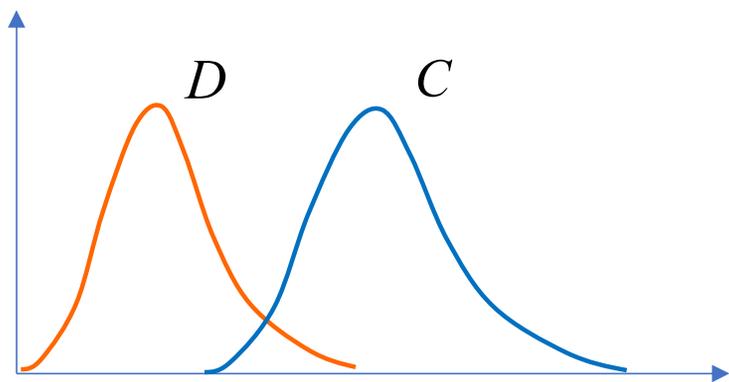
Costruzioni esistenti - Probabilità di collasso (per anno) (FIB-80)

Capacità strutturale

Domanda (richiesta di prestazione)

Margine rispetto al collasso

Probabilità di collasso



Obiettivo

La probabilità di collasso accettabile nei confronti della sicurezza per le persone non cambia

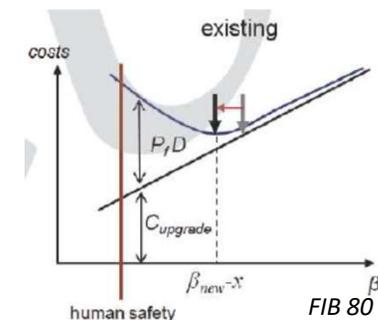
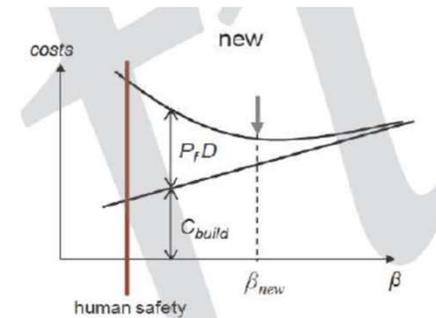
Il valore ottimale della probabilità di collasso basato su considerazioni di ottimo in termini economici cambia e dipende dalla vita di servizio della struttura

Incertezze

Non ci sono le incertezze legate al processo costruttivo (già avvenuto)

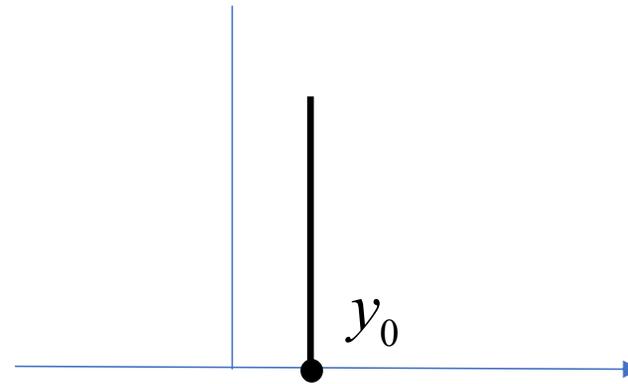
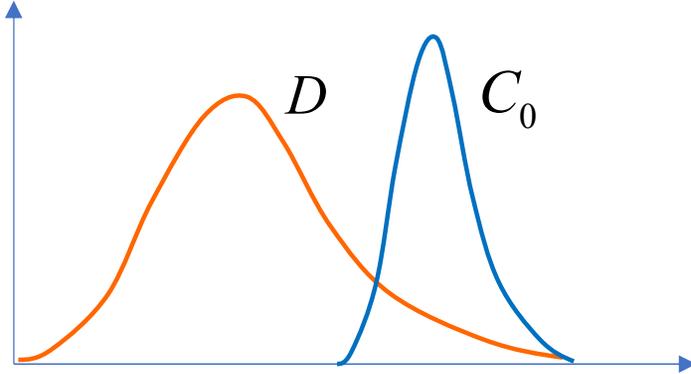
Le incertezze relative a gravi errori di progettazione e di costruzioni sono mitigate dall'esercizio

Nascono le incertezze legate alla conoscenza

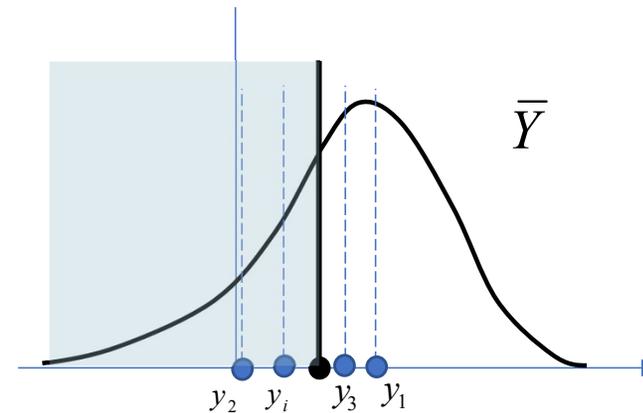
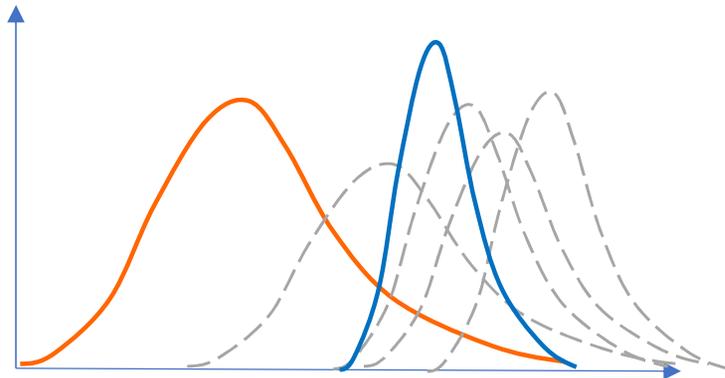


Costruzioni esistenti - Incertezze legate alla conoscenza

Probabilità di collasso effettiva



Probabilità di collasso basata sulla conoscenza parziale



La capacità stimata dalle indagini varia in base al numero e al protocollo di prova

La precisione delle misure influenza la stima della capacità

La dispersione dei risultati dipende dalle caratteristiche della costruzione

Il valore medio che si ottiene è solitamente più grande (non a favore di sicurezza, la Pf viene sottostimata) rispetto a quello effettivo (sistemi in serie)

Possibile percorso di analisi del problema per cap

Ipotesi iniziali

Parametri della struttura di interesse per la valutazione della sicurezza.

$$\theta \in R^N \quad \Theta, p(\theta)$$

H1. Si assume che non sia possibile conoscere puntualmente i valori dei parametri su un componente (o insieme di componenti) ma che possano essere descritti tramite una variabile aleatoria

H2. Si assume che le proprietà di questa variabile aleatoria siano «benigne» e la stima dei parametri che servono converga velocemente («cigni neri» esclusi tramite procedura preliminare-tavolo tecnico)

H3. Sia assume che il format di verifica sia affidabile e sia basato su parametri deterministici (no r.v.) derivati dalla distribuzione di probabilità della capacità (es. valori caratteristici della resistenza, valori medi della geometria e della precompressione).

$$p(\theta) \rightarrow f_k \quad y = \frac{D}{C(f_k)} < 1$$

Simulazione della conoscenza

0. Nota la distribuzione dei parametri è noto il valore di riferimento del coefficiente di sicurezza

$$p_0(\theta) \rightarrow f_{0k} \quad y_0 = \frac{D}{C(f_{0k})} < 1$$

1. E' fissato un percorso di conoscenza (es. posizione e numero di prove $k=1\dots Np$). Il percorso include le ipotesi sulla distribuzione di C (es. $p(\theta)$ è lognormale), l'errore e le regole per stimare le caratteristiche della pdf (es. livello di confidenza di media e cov).

2. Individuare la distribuzione di Y (r.v.) che si ottiene facendo tante simulazione

$$\theta_k \rightarrow \bar{\mu}, \bar{s} \rightarrow \bar{\mu}_l, \bar{\sigma}_l \rightarrow \bar{f}_k \rightarrow \bar{y}$$

3. Confrontare la $p(Y)$ con il valore di riferimento y_0

$$\bar{y} \rightarrow p(\bar{Y})$$

Analisi dei risultati

Analizzare i parametri che influenzano la distribuzione di Y (dispersione ed i parametri, effetto delle misure)

Valutare le relazioni tra livello di confidenza assunto per i parametri e livello di confidenza risultante per Y

Analizzare differenze tra Y delle singole verifiche ed effetto nella verifica complessiva

Problemi ricorrenti cap

Lunghezza 224 m, 7 campate appoggiate, luci 31.075-32.15 m

Anno di progettazione: 1970.

Norma di progettazione:

- Circ. n.1398 del 23/01/1965 per le strutture in c.a.p.
- Circ. n. 384 del 14/02/1962 per i carichi dei ponti stradali

Caratteristiche impalcato

Larghezza 16m, 5 travi in c.a.p. con cavi post tesi collegate da 5 traversi per ogni campata.

Precompressione ottenuta mediante la tesatura di 6 cavi da 32 trefoli $\phi 7$ durante due fasi differenti.

L'altezza della soletta 23 cm.

Caratteristiche dei materiali

CLS Trave:

$R_{ck} = 45 \text{ N/mm}^2$, $f_{cd} = 22.40 \text{ N/mm}^2$, $f_{ctd} = 1.66 \text{ N/mm}^2$

CLS soletta e traversi:

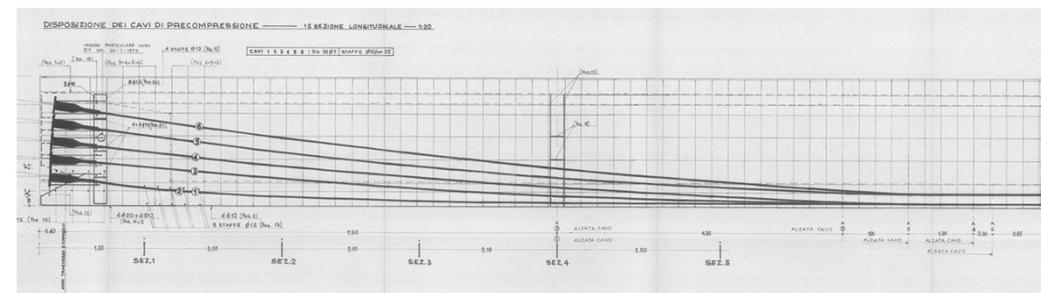
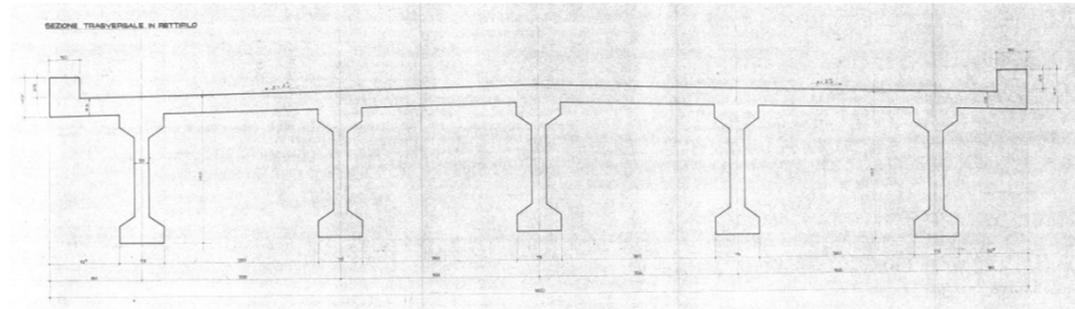
$R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$, $f_{cd} = 20.35 \text{ N/mm}^2$, $f_{ctd} = 1.53 \text{ N/mm}^2$

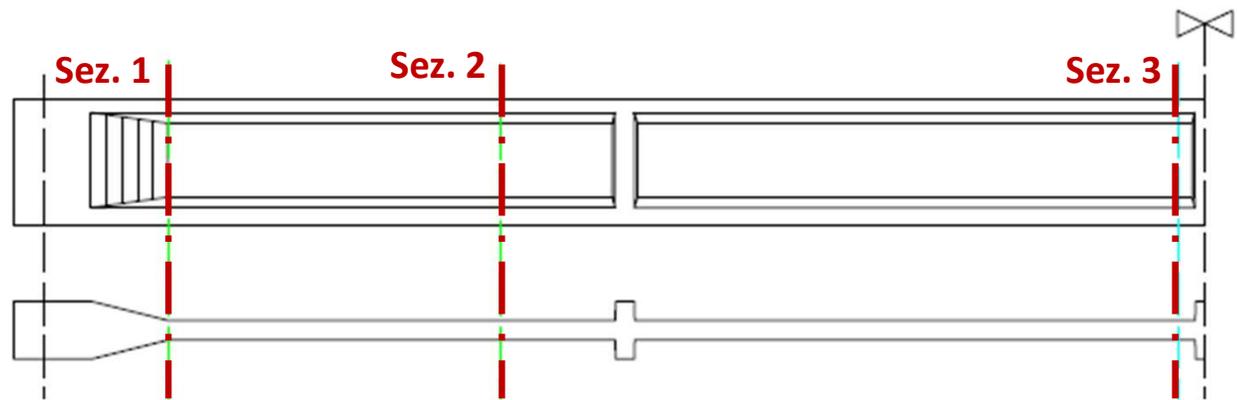
Armatura lenta FeB44k:

$f_{yk} = 430 \text{ N/mm}^2$, $f_{yd} = 318.52 \text{ N/mm}^2$

Trefoli:

$f_{yk} = 1400 \text{ N/mm}^2$, $f_{yd} = 1037.04 \text{ N/mm}^2$





Sez. 1 - Verifica a taglio (sezione non fessurata)

Sezione corrente a 1.60 m dall'appoggio

Vcavo = 612.06 kN
 Vrd,c = 1429.09 kN
 Ved = 1996.75 kN
 D/C = 0.97

EC2 1-1 (6.4)

$$V_{Rd,c} = \frac{l \cdot b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}}$$

Sez. 2 - Verifica a taglio (sezione fessurata)

Sezione a 5.90 m dall'appoggio

Vcavo = 486.68 kN
 Vrd = 824.40 kN
 Ved = 1410.50 kN
 D/C = 1.1

NTC2018 [4.1.27]

$$V_{Rd} = \max \left\{ \left[0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d; (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right\}$$

Vcavo = 486.68 kN
 Vrd = 597.15 kN
 Ved = 1410.50 kN
 D/C = 1.32

NTC2018 [4.1.23]

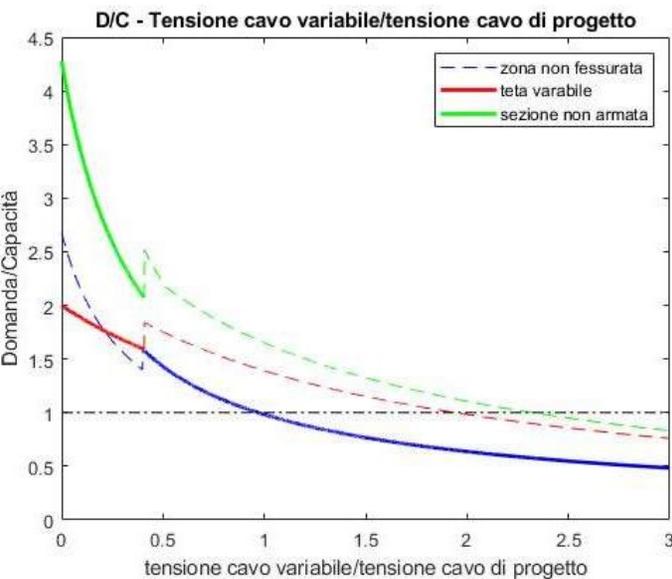
$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha$$

Sez. 3 - Verifica a flessione

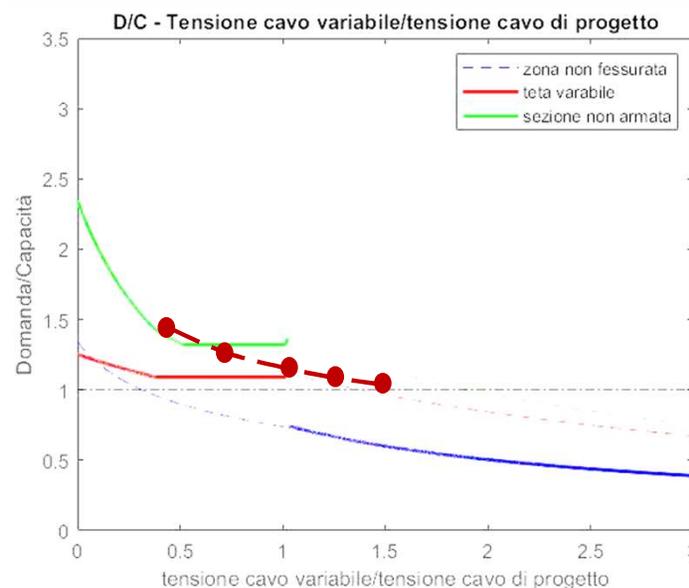
Acavo equivalente = 73.92 cm²
 Med = 14338.18 kN*m
 Mrd = 13141.22 kN*m
 D/C = 1.09

Influenza forza precompressione

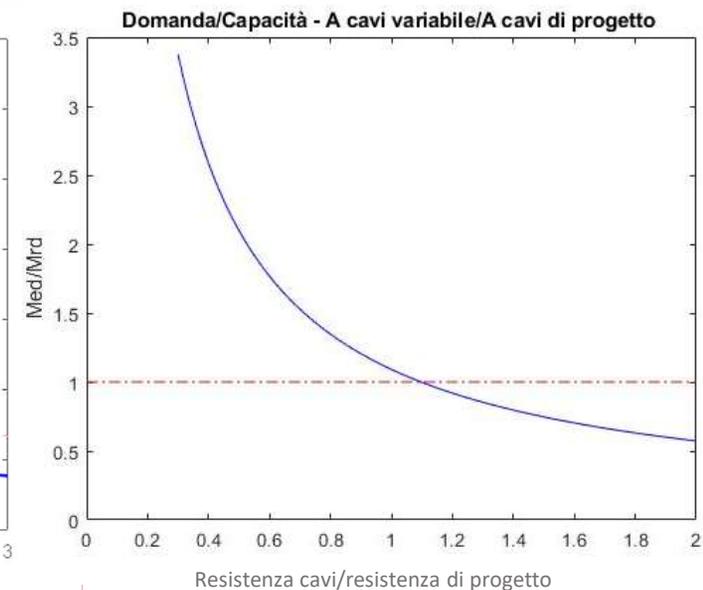
Sez. 1 - Verifica a taglio (sezione non fessurata)



Sez. 2 - Verifica a taglio (sezione fessurata)



Sez. 3 - Verifica a flessione



Esempio valutazione incertezze legate alla precompressione

Trave precompressa cavi post-tesi

L=30m	g=19.55kN/m	q=19.05kN/m	Ng=2460kN
Permanenti (sez. taglio)		Vsg= kN	Mvsg
Max (sez. taglio)		Vs= kN	Mvs
Max (sez. flessione)		Ms	

Parametri assunti noti con certezza

Geometria sezione, posizione armature e posizione cavo risultante

Resistenza cls, acciaio armature

Parametri da identificare mediante prove

Area del cavo	(distribuzione lognormale)
Tensione nel cavo in presenza dei permanenti	(distribuzione lognormale)
Tensione max del cavo	(distribuzione lognormale)

Parametri richiesti dal format di verifica

fck frk fsk fpk Ng

Yo=Ck/Dk – valore di riferimento (NTC-EC)

Taglio (sezione non fessurata)	Yov=2.93
Flessione	Yom=2.82
Combinata Y=min(Yov,Yom)	Yo=2.82

Caso 0

Simulazione conoscenza (2000 simulazioni)

Numero di test per i 3 parametri **400**

	media	cov	cov err.
Acavo	0.00475	0.05	0.10
Tens. Perm.	517	0.05	0.15
Tens. resistente	1900	0.05	0.05

- Con 400 test le distribuzioni di frequenza sono affini alle pdf
- La valutazione di Y è deterministica e basata su parametri dedotti dalle pdf quindi questi parametri sono praticamente certi (A_p , σ , f_{yp})
- Il livello di confidenza per il taglio è il 50%, come atteso, visto che l'area è quella nominale. (stima da definire)
- Per il momento si è adottata la stima delle LG di f_k . Si stima la f_k delle misure, non della resistenza. Questo produce un livello di confidenza più grande
- Y di M è minore di Y di V e le dispersioni sono trascurabili per cui nella verifica combinata conta solo quella a flessione

Statistica dei tests

Area of prestressing cable

Real distribution mean=0.00475, std_log=0.05000
 properties of test means mean=0.00475 std=0.00003 COV=0.00565
 properties of test COV mean=0.11195 std=0.00412 COV=0.03680

stress under gravity loads

real distribution mean=517400, std_log=0.05000
 properties of test means mean=517208 std=4111 COV=0.00795
 properties of test COV mean=0.15903 std=0.00579 COV=0.0363

Prestressing steel max stress

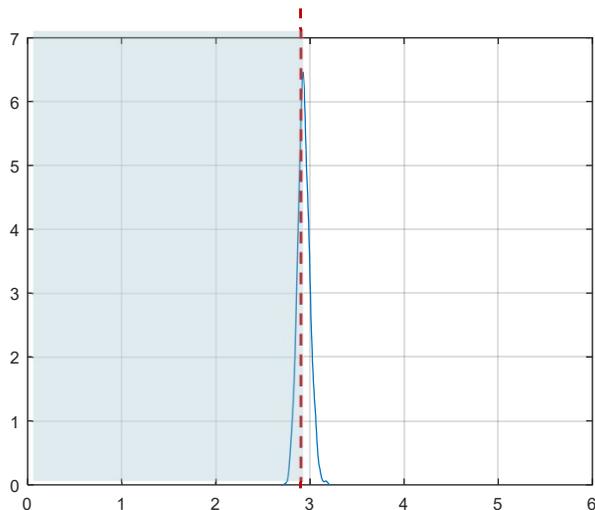
real distribution mean=1900000, std_log=0.05000
 properties of test means mean=1899656 std=6826 COV=0.00359
 properties of test cov mean=0.07077 std=0.0026 COV=0.0371

Stime $Y=Ck/Dk$

Taglio (riferimento $Y_{ov}=2.93$)

Y_V _mean= 2.928 Y_V _std= 0.065

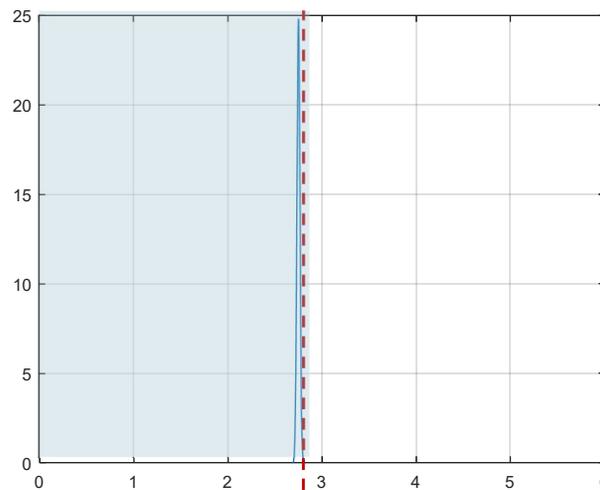
Y_V _cov= 0.022 Confidence= 0.516



Flessione (riferimento $Y_{ov}=2.82$)

Y_M _mean= 2.747 Y_M _std= 0.016

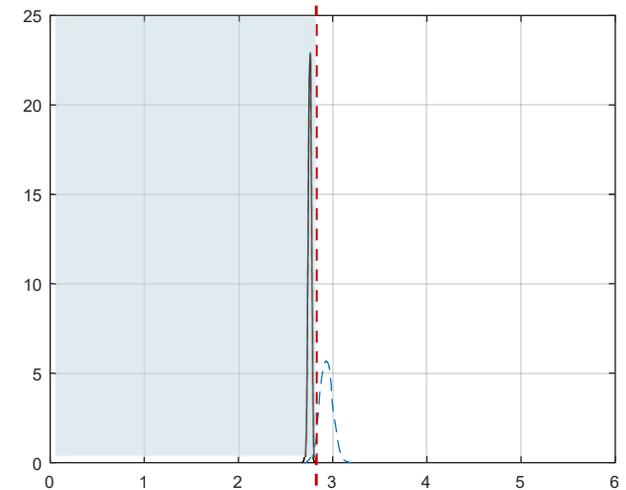
Y_M _cov= 0.006 Confidence= 1.000



Combinata (valore di riferimento $Y_o=2.82$)

Y _mean= 2.747 Y _std= 0.016

Y _cov= 0.006 Confidence= 1.000



Caso 1

Simulazione conoscenza (2000 simulazioni)

Numero di test per i 3 parametri **10**

- Con 10 test i parametri (stimati) che servono per Y variano da test a test e Y diventa incerto. Si osserva come i cov dei parametri stimati (media e cov) sono cresciuti di un ordine di grandezza
- Y del taglio è decisamente più grande di quello del momento. Le distribuzioni non sono normali
- Il livello di confidenza del taglio è sempre 50%, quello del momento (dove si usa la f_k stimata) è circa 84%.
- La verifica combinata dà valori intermedi, significa che, anche se Y medio del taglio è maggiore di Y medio del momento, nelle single simulazioni si possono invertire.

Statistica dei tests

Area of prestressing cable

Real distribution mean= 0.00475, std_log= 0.05000
 properties of test means mean= 0.00475 std= 0.00017 COV= 0.03488
 properties of test COV mean= 0.10890 std= 0.02692 COV= 0.24718

stress under gravity loads

real distribution mean=517400, std_log= 0.05000
 properties of test means mean=517208 std=25414 COV= 0.04912
 properties of test COV mean= 0.15211 std= 0.036 COV= 0.24030

Prestressing steel max stress

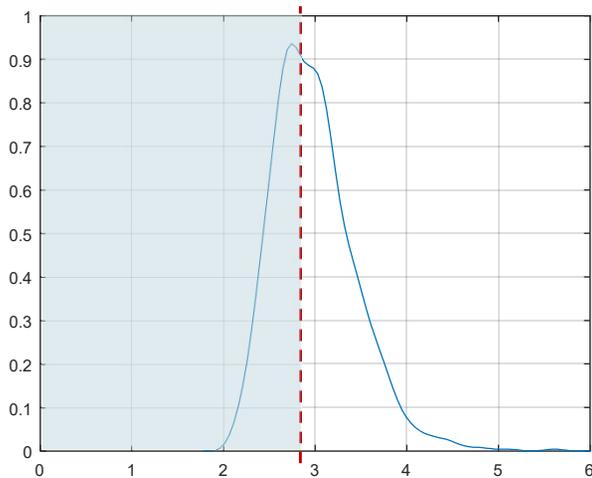
real distribution mean=1900000, std_log= 0.05000
 properties of test means mean=1898782 std=43478 COV= 0.0229
 properties of test cov mean= 0.06902 std= 0.01628 COV= 0.2358

Stime $Y=Ck/Dk$

Taglio (riferimento $Y_{ov}=2.93$)

$Y_{V_mean}= 2.975$ $Y_{V_std}= 0.443$

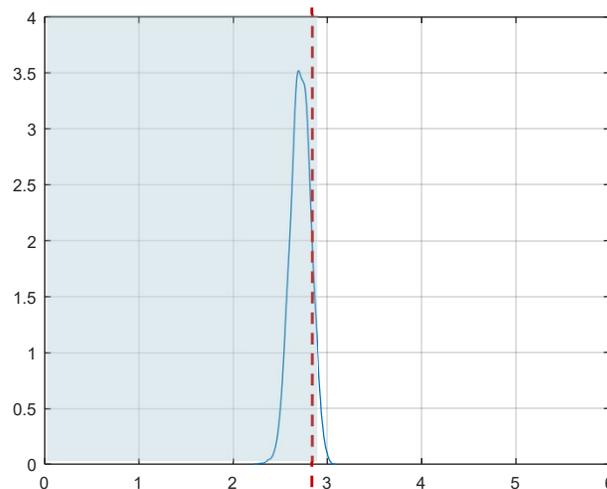
$Y_{V_cov}= 0.149$ Confidence= 0.520



Flessione (riferimento $Y_{ov}=2.82$)

$Y_{M_mean}= 2.713$ $Y_{M_std}= 0.106$

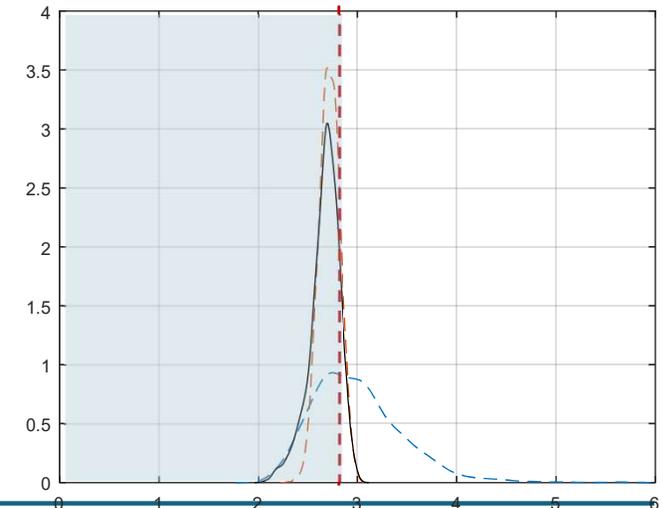
$Y_{M_cov}= 0.039$ Confidence= 0.844



Combinata (valore di riferimento $Y_o=2.82$)

$Y_{mean}= 2.664$ $Y_{std}= 0.152$

$Y_{cov}= 0.057$ Confidence= 0.873



Caso 2

Simulazione conoscenza (2000 simulazioni)

Numero di test per i 3 parametri 4

- Con 4 test valgono le stesse considerazioni qualitative di prima ma le incertezze su Y sono tutte più accentuate
- I cov di Y aumentano e il livello di confidenza del momento peggiora
- Le distribuzioni non sono normali

Statistica dei tests

Area of prestressing cable

Real distribution mean= 0.00475, std_log= 0.0500
 properties of test means mean= 0.00475 std= 0.00028 COV= 0.05843
 properties of test COV mean= 0.10271 std= 0.04347 COV= 0.42328

stress under gravity loads

real distribution mean=517400, std_log= 0.0500
 properties of test means mean=518061 std=40678 COV= 0.07852
 properties of test COV mean= 0.1462 std= 0.0625 COV= 0.43039

Prestressing steel max stress

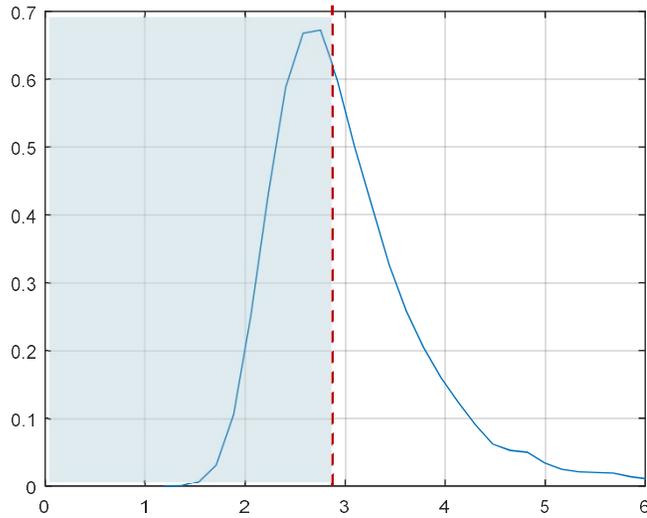
real distribution mean=1900000, std_log= 0.0500
 properties of test means mean=1903116 std=68118 COV= 0.03579
 properties of test cov mean= 0.06524 std= 0.0275 COV= 0.42255

Stime $Y=Ck/Dk$

Taglio (riferimento $Y_{ov}=2.93$)

$Y_V_mean= 3.071$ $Y_V_std= 0.842$

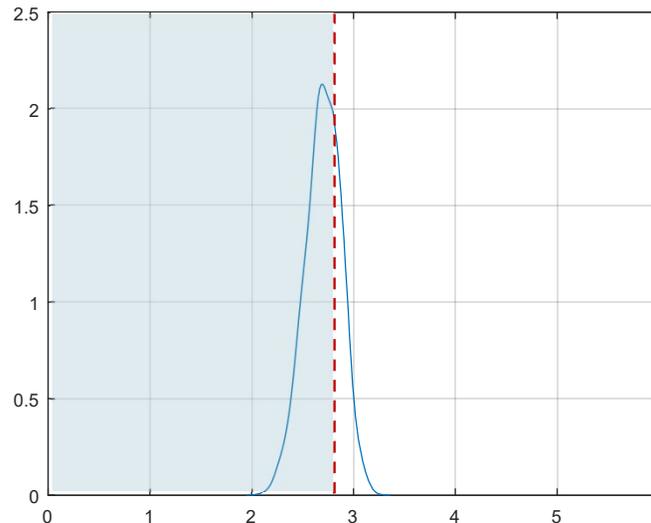
$Y_V_cov= 0.274$ Confidence= 0.510



Flessione (riferimento $Y_{ov}=2.82$)

$Y_M_mean= 2.703$ $Y_M_std= 0.187$

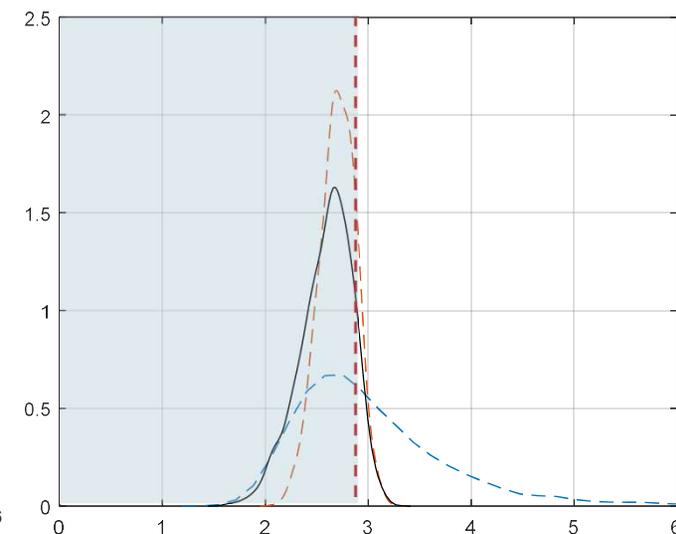
$Y_M_cov= 0.069$ Confidence= 0.726



Combinata (valore di riferimento $Y_o=2.82$)

$Y_mean= 2.601$ $Y_std= 0.270$

$Y_cov= 0.104$ Confidence= 0.786



Problemi aperti nella valutazione della sicurezza di travi in cap

- Propagazione delle incertezze dei parametri e influenza su Y
- Calibrazione dei criteri di stima dei parametri di verifica
- Misure sperimentali: valutazione e modellazione delle incertezze
- Modelli per azioni nel caso di traffico ridotto
- Fatica e danneggiamento diffuso
- ...



FABRE – Consorzio di ricerca per la valutazione di ponti viadotti e altre strutture

Ponti, viadotti e gallerie esistenti: ricerca, innovazione e applicazioni

2- 4 Febbraio 2022, Lucca



Alcune considerazioni sulle incertezze nella valutazione della sicurezza degli impalcati in c.a.p.



Andrea Dall'Asta

Laura Gioiella

Fabio Micozzi

Alberto Poeta



Laura Ragni