



VALUTAZIONE DELL'AFFIDABILITÀ DELLE STRUTTURE ESISTENTI

Controlli in Opera sulle
Strutture

26 Feb 2013

Daniele Zonta

(Università di Trento)

RINGRAZIAMENTI

- Università di Trento - DICAM

(C. Cappello, R. Zandonini, F. Bruschetta)

- Provincia Autonoma di Trento - SISF, SGS

(L. Martorano, S. De Vigili, G. Benedetti, P. Nicolussi Paolaz, M. Pravda)

- Intelligent Infrastructure Innovation (I³) srl

(E. Debiasi, D. Trapani)



SOMMARIO

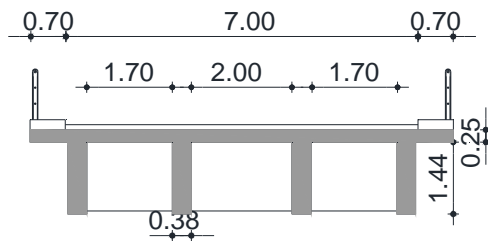
- Esempio introduttivo
- Aggiornamento della resistenza dei materiali
- Prove dirette
- Prove indirette
- Valutazione probabilistica dell'affidabilità
- Aggiornamento dei coefficienti di sicurezza
- Conclusioni

IL CASO STUDIO: PONTE “MASO” - SP 65

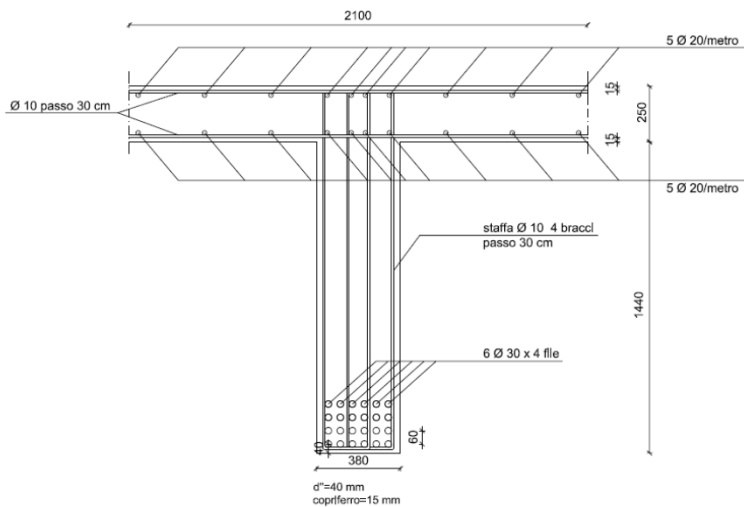
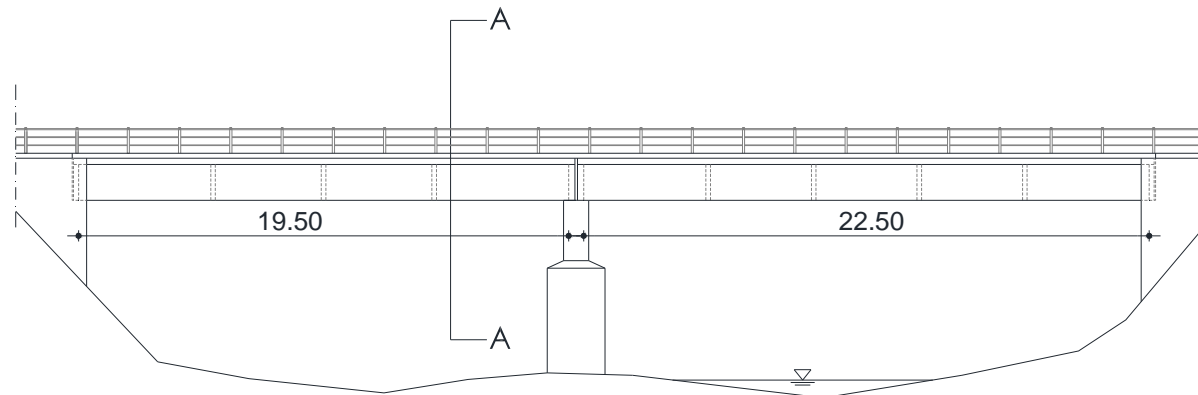


IL CASO STUDIO: PONTE “MASO” - SP 65

SEZIONE TRASVERSALE A - A

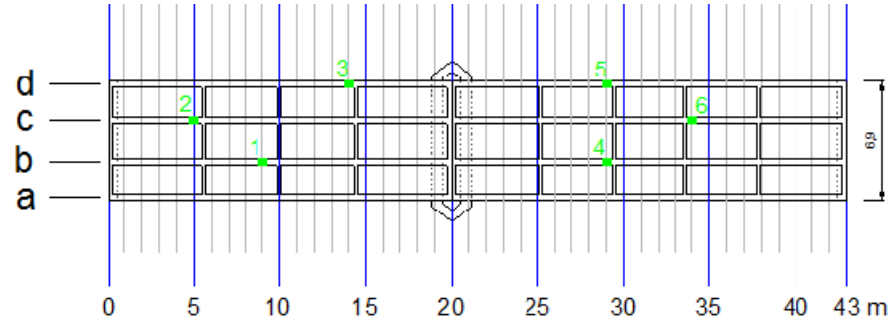


PROFILO LONGITUDINALE



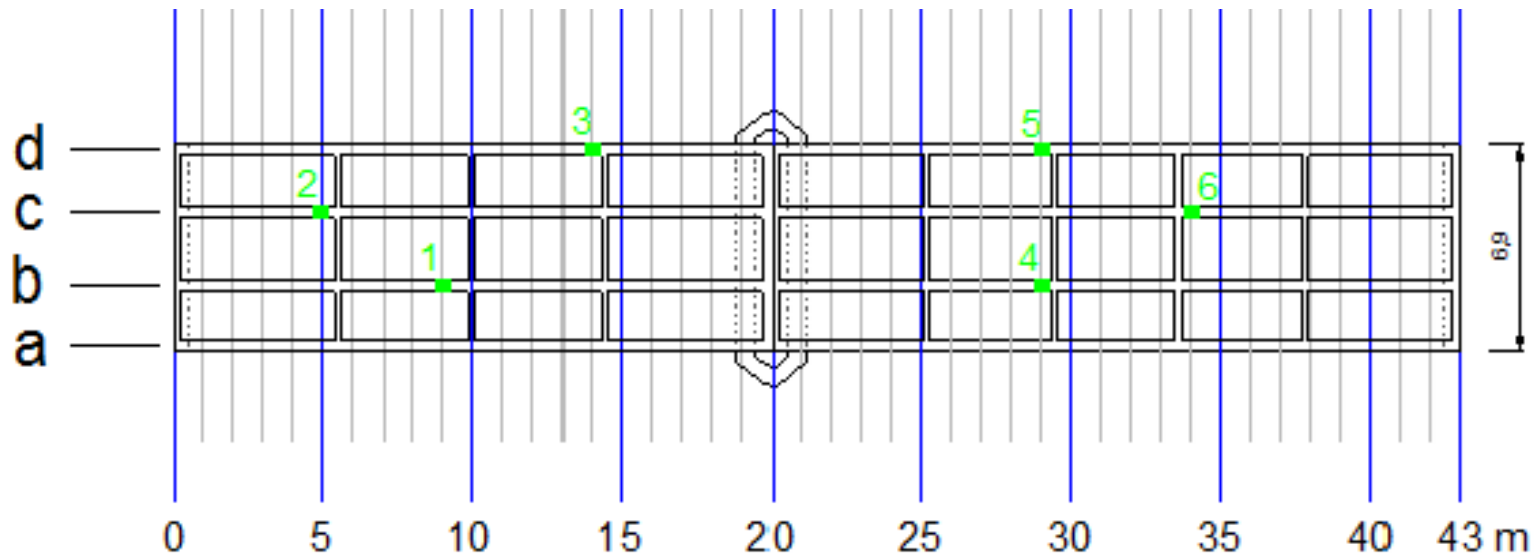
- Struttura in CA gettato in opera
- Anno di progettazione: 1962
- Ponte di I categoria
- Normativa di riferimento:
 - Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 384 del 14/02/1962
 - Regio decreto-legge n. 2229 del 16 novembre 1939

ESTRAZIONE DEI CAMPIONI



ESTRAZIONE DEI CAMPIONI (CAROTE)

N°	Posizione	Dimensioni $d \times l$ [mm]	Peso [Kg]	Carico [kN]	f_c [Mpa]	R_c [Mpa]
1	5 c	94 x 188	3.216	298.1	43.0	51.8
2	14 d	94 x 189	3.187	278.1	40.1	48.3
3	29 b	94 x 198	3.366	231.3	33.3	40.2



DM 14.01.08 E CIRCOLARE 02.02.09

- 8.5.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI
- Per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà su documentazione già disponibile, su verifiche visive in situ e su indagini sperimentali.
- Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche [...]
- I valori delle resistenze meccaniche dei materiali vengono valutati sulla base delle prove effettuate sulla struttura e prescindono dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni.
- 8.5.4: sulla base delle fasi conoscitive... saranno individuati i “livelli di conoscenza” dei parametri coinvolti nel modello, e definiti i correlati fattori di confidenza
- C8.2: I contenuti del Cap.8 delle NTC e della presente Circolare costituiscono un riferimento generale che può essere integrato, in casi particolari, da valutazioni specifiche ed anche alternative da parte del progettista, comunque basati su criteri e metodi di comprovata validità.

FATTORI DI CONFIDENZA

Tabella C8A.1.2 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con estese prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1.00

PROBLEMA #1

Le carote di calcestruzzo estratte da elementi di opere esistenti forniscono importanti informazioni sulla resistenza del materiale.

I risultati delle prove sperimentali effettuate sulle carote possono essere usati per integrare la documentazione di progetto.

La documentazione di progetto prevede un calcestruzzo C25/30, corrispondente ad una resistenza caratteristica $f_{ck}=25$ MPa.

Una carota estratta fornisce una resistenza $f_c=43.0$ MPa.

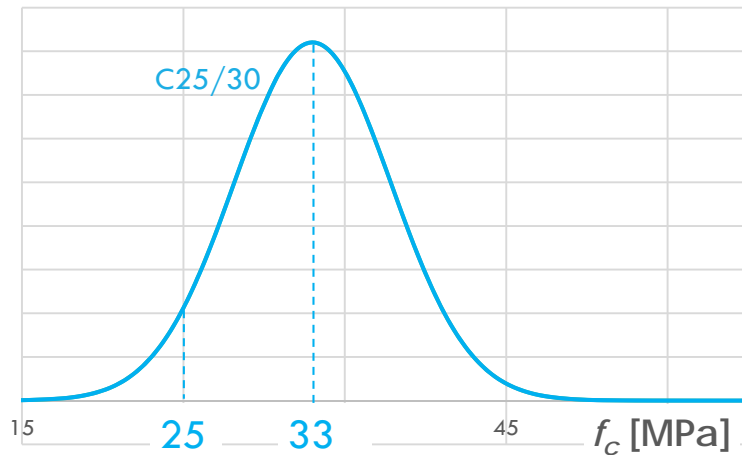
Quale resistenza posso usare nel calcolo?

IPOSTESI DI CLASSIFICAZIONE

Classi da Eurocodice 2 (UNI EN 1992-1-1)

prospetto 3.1 Caratteristiche di resistenza e di deformazione del calcestruzzo

Classi di resistenza dei calcestruzzi														Relazione analitica/Spiegazione	
f_{tk} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)



$$\mu_{f_c} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} \quad \text{valore medio}$$

$$\sigma_{f_c} = 8 / k = 4.9 \text{ MPa} \quad \text{deviazione standard}$$

$$V_{f_c} = \sigma_{f_c} / \mu_{f_c} \quad \text{coeff. di variazione}$$

$$f_{ck} \quad 95^\circ \text{ percentile}$$

$$k = 1.645$$

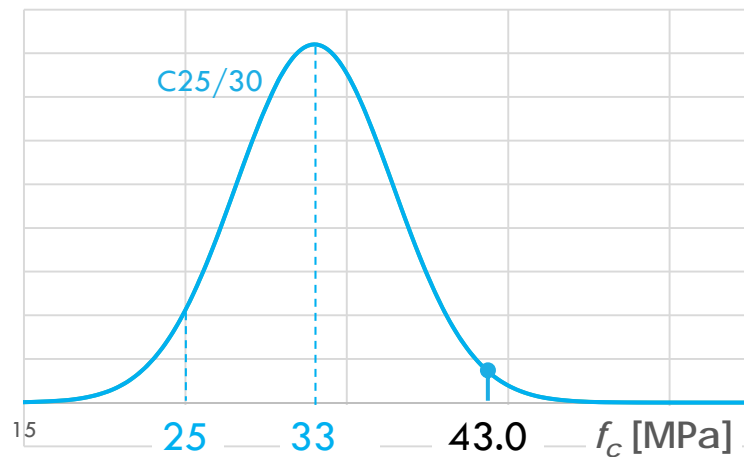
Classe	μ_{f_c} [Mpa]	σ_{f_c} [MPa]	$f_c = 43.0 \text{ MPa}$ $\text{pdf}(f_c; \mu_{f_c}, \sigma_{f_c})$
C45/55	53.00	4.86	0.010

CALCOLO DELLA VEROSIMIGLIANZA

Classi da Eurocodice 2 (UNI EN 1992-1-1)

prospetto 3.1 Caratteristiche di resistenza e di deformazione del calcestruzzo

Classi di resistenza dei calcestruzzi														Relazione analitica/Spiegazione	
f_{tk} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{tk} + 8$ (MPa)



N°	Posizione	f_c [Mpa]
1	5 c	43.0

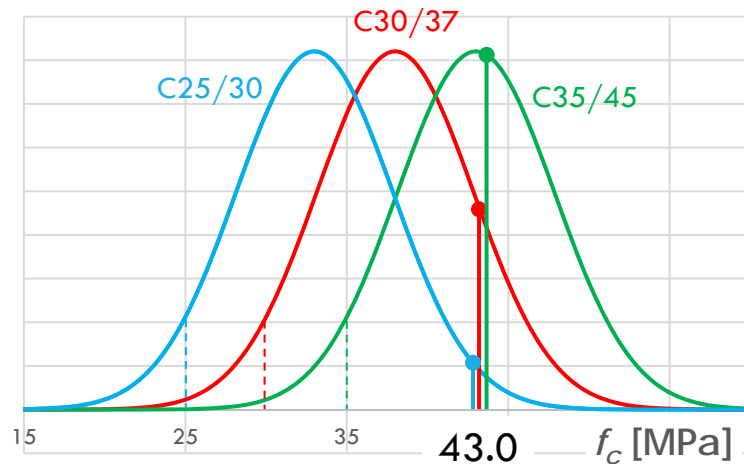
Classe	μ_{fc} [Mpa]	σ_{fc} [MPa]	$f_c = 43.0$ MPa pdf($f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc}$)
C45/55	53.00	4.86	0.010

CALCOLO DELLA VEROSIMIGLIANZA

Classi da Eurocodice 2 (UNI EN 1992-1-1)

prospetto 3.1 Caratteristiche di resistenza e di deformazione del calcestruzzo

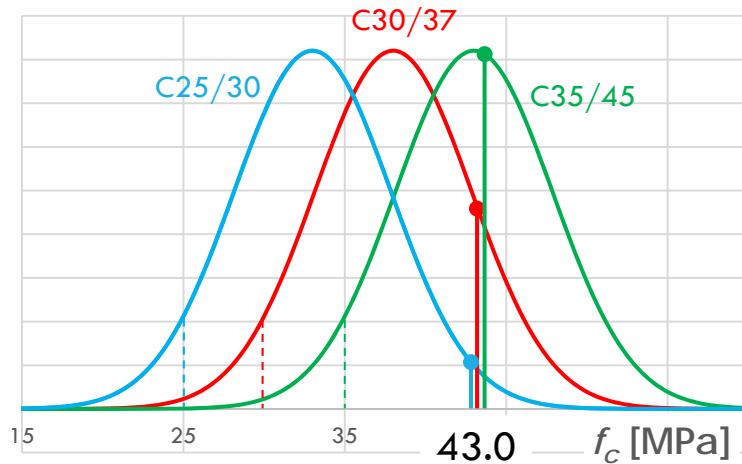
	Classi di resistenza dei calcestruzzi															Relazione analitica/Spiegazione
f_{tk} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90		
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105		
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{tk} + 8$ (MPa)	



N°	Posizione	f_c [Mpa]
1	5 c	43.0

Classe	μ_{fc} [Mpa]	σ_{fc} [Mpa]	$f_c = 43.0$ MPa pdf($f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc}$)
C45/55	53.00	4.86	0.010
C50/60	58.00	4.86	0.048
C55/67	63.00	4.86	0.082

PROBABILITÀ DI APPARTENENZA



N°	Posizione	f_c [MPa]
1	5 c	43.0

$$\text{pdf}(f_c; \mu_{f_c}, \sigma_{f_c}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{f_c}} \exp\left(-\frac{(f_c - \mu_{f_c})^2}{2\sigma_{f_c}^2}\right)$$

La probabilità di appartenenza a ciascuna classe è

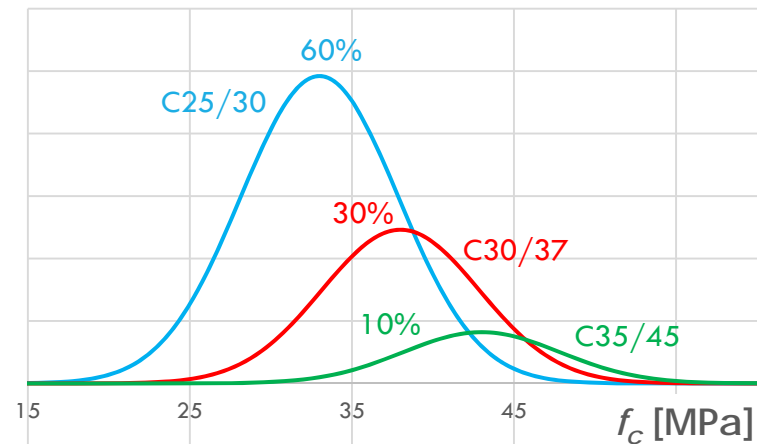
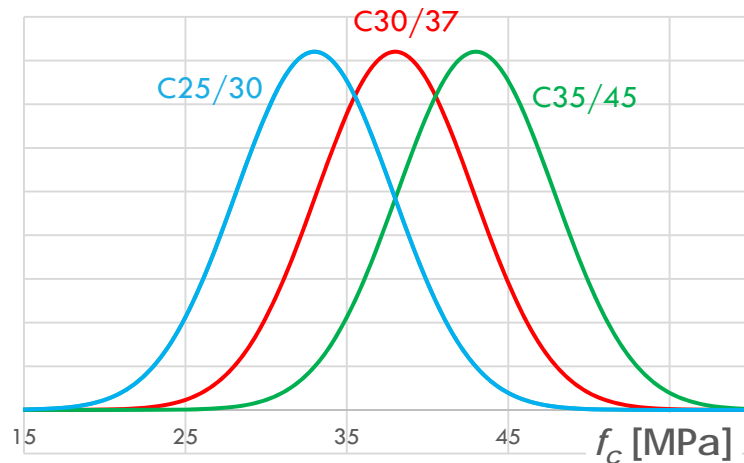
$$P(\text{Classe} = \text{C25/30}) = (0.010)/(0.010 + 0.048 + 0.082) = 7\%$$

$$P(\text{Classe} = \text{C30/37}) = (0.048)/(0.010 + 0.048 + 0.082) = 34\%$$

$$P(\text{Classe} = \text{C35/45}) = (0.082)/(0.010 + 0.048 + 0.082) = 58\%$$

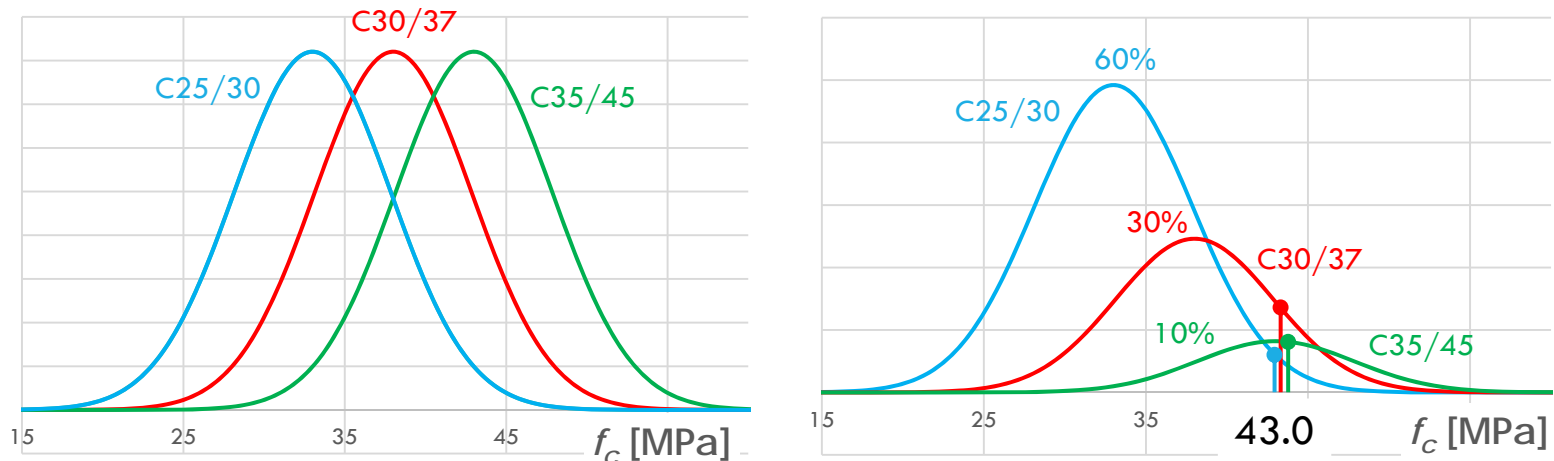
Classe	μ_{f_c} [MPa]	σ_{f_c} [MPa]	$f_c = 43.0$ MPa
			pdf($f_c; \mu_{f_c}, \sigma_{f_c}$)
C45/55	53.00	4.86	0.010
C50/60	58.00	4.86	0.048
C55/67	63.00	4.86	0.082

PROBABILITÀ A PRIORI



Classe	μ_{f_c} [Mpa]	σ_{f_c} [MPa]	Probabilità a priori
C45/55	53.00	4.86	60%
C50/60	58.00	4.86	30%
C55/67	63.00	4.86	10%

PROBABILITÀ A POSTERIORI



La probabilità di appartenenza a ciascuna classe è

$$P(\text{Classe} = \text{C25/30}) = (0.010 \times 60\%) / 0.0287 = 21\%$$

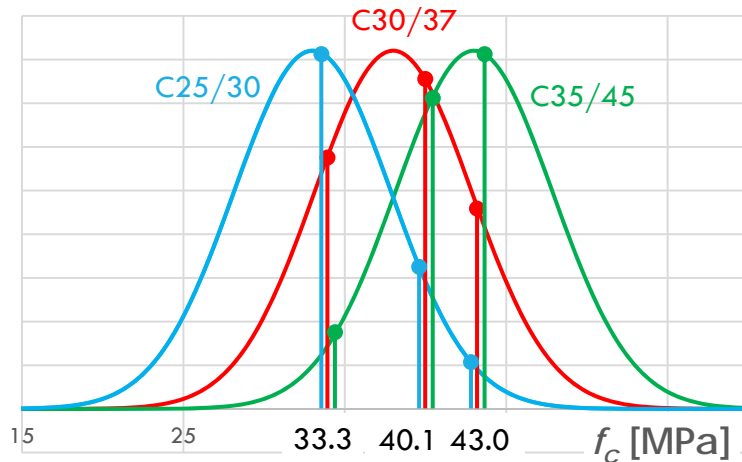
$$P(\text{Classe} = \text{C30/37}) = (0.048 \times 30\%) / 0.0287 = 51\%$$

$$P(\text{Classe} = \text{C35/45}) = (0.082 \times 10\%) / 0.0287 = 29\%$$

$$0.0287 = 0.010 \times 60\% + 0.048 \times 30\% + 0.082 \times 10\%$$

Classe	μ_{f_c} [Mpa]	σ_{f_c} [MPa]	Probabilità a priori	$f_c = 43.0$ MPa pdf($f_c; \mu_{f_c}, \sigma_{f_c}$)
C45/55	53.00	4.86	60%	0.010
C50/60	58.00	4.86	30%	0.048
C55/67	63.00	4.86	10%	0.082

CLASSIFICAZIONE DI 3 CAMPIONI



N°	Posizione	f_c [Mpa]
1	5 c	43.0
2	14 d	40.1
3	29 b	33.3

La probabilità di appartenenza a ciascuna classe è

$$P(\text{Classe} = \text{C25/30}) = (0.010 \times 0.028 \times 0.082) / 0.00027 = 8\%$$

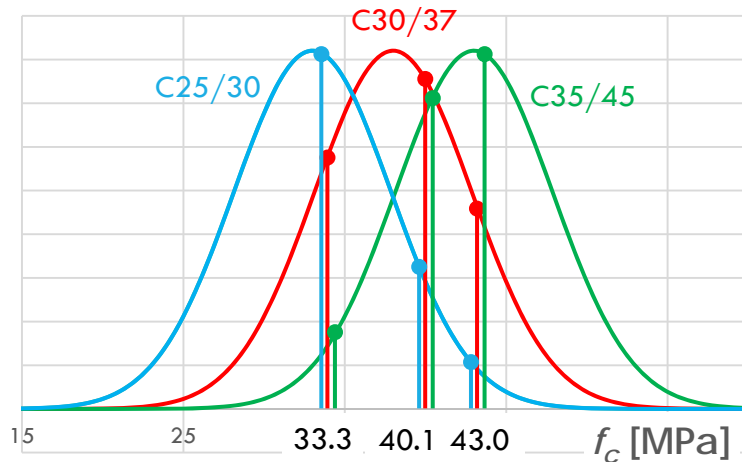
$$P(\text{Classe} = \text{C30/37}) = (0.048 \times 0.075 \times 0.051) / 0.00027 = 68\%$$

$$P(\text{Classe} = \text{C35/45}) = (0.082 \times 0.069 \times 0.011) / 0.00027 = 23\%$$

$$0.00027 = 0.010 \times 0.028 \times 0.082 + 0.048 \times 0.075 \times 0.051 + 0.082 \times 0.069 \times 0.011$$

Classe	μ_{fc} [Mpa]	σ_{fc} [MPa]	$f_c = 43.0$ MPa $\text{pdf}(f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc})$	$f_c = 40.1$ MPa $\text{pdf}(f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc})$	$f_c = 33.3$ MPa $\text{pdf}(f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc})$
C45/55	53.00	4.86	0.010	0.028	0.082
C50/60	58.00	4.86	0.048	0.075	0.051
C55/67	63.00	4.86	0.082	0.069	0.011

CLASSIFICAZIONE DI 3 CAMPIONI



N°	Posizione	f_c [Mpa]
1	5 c	43.0
2	14 d	40.1
3	29 b	33.3

La probabilità di appartenenza a ciascuna classe è

$$P(\text{Classe} = \text{C25/30}) = (0.010 \times 0.028 \times 0.082 \times 60\%) / 7.58 \times 10^{-5} = 18\%$$

$$P(\text{Classe} = \text{C30/37}) = (0.048 \times 0.075 \times 0.051 \times 30\%) / 7.58 \times 10^{-5} = 74\%$$

$$P(\text{Classe} = \text{C35/45}) = (0.082 \times 0.069 \times 0.011 \times 10\%) / 7.58 \times 10^{-5} = 8\%$$

$$7.58 \times 10^{-5} = 0.010 \times 0.028 \times 0.082 \times 60\% + 0.048 \times 0.075 \times 0.051 \times 30\% + \text{etc.}$$

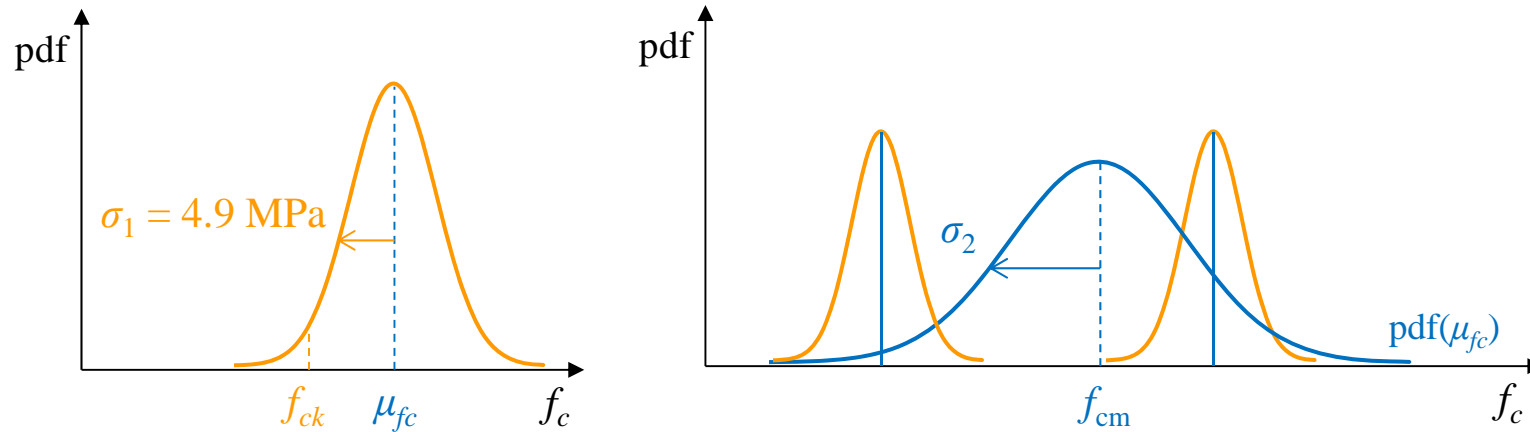
Classe	μ_{fc} [Mpa]	σ_{fc} [MPa]	Probabilità a priori	$f_c = 43.0$ MPa $\text{pdf}(f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc})$	$f_c = 40.1$ MPa $\text{pdf}(f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc})$	$f_c = 33.3$ MPa $\text{pdf}(f_c; \mu_{fc}, \sigma_{fc})$
C45/55	53.00	4.86	60%	0.010	0.028	0.082
C50/60	58.00	4.86	30%	0.048	0.075	0.051
C55/67	63.00	4.86	10%	0.082	0.069	0.011

PROVE DIRETTE

- sono quelle che forniscono direttamente i valori di proprietà meccanica utilizzati nella valutazione
- Es:
 - prove di compressione su carote di calcestruzzo
 - prove di trazione su spezzoni di armatura
- Incertezza del valore atteso dovuta a:
 1. variabilità della resistenza nota la classe
 2. Non conoscenza della classe di resistenza



INCERTEZZE SUL VALORE ATTESO



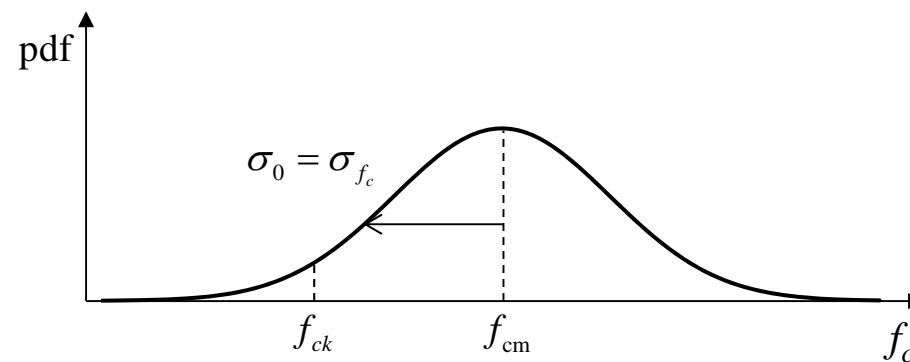
Si hanno due tipi di incertezze:

- incertezza noto il valore medio (variabilità del materiale) $\sigma_1 = (\mu_{fc} - f_{ck}) / k = 4.9 \text{ MPa}$
- incertezza sulla qualità del materiale (variabilità del valore medio) σ_2

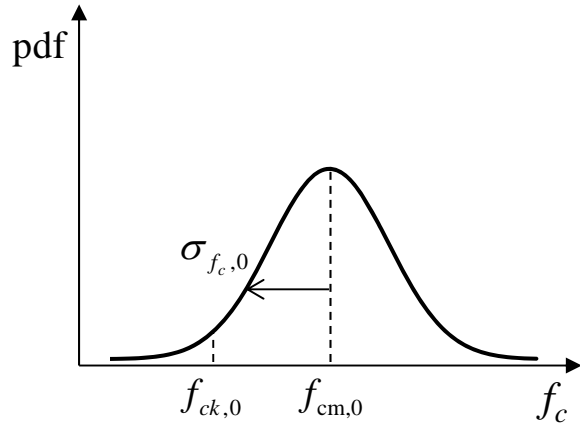
L'incertezza totale è

$$\sigma_0 = \sigma_{f_c} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

$$\sigma_{f_c} = \frac{f_{cm} - f_{ck}}{k}$$



VALORE CARATTERISTICO A POSTERIORI



Valori di prima ipotesi

$$\sigma_{f_c,0} = \frac{f_{cm,0} - f_{ck,0}}{k}$$

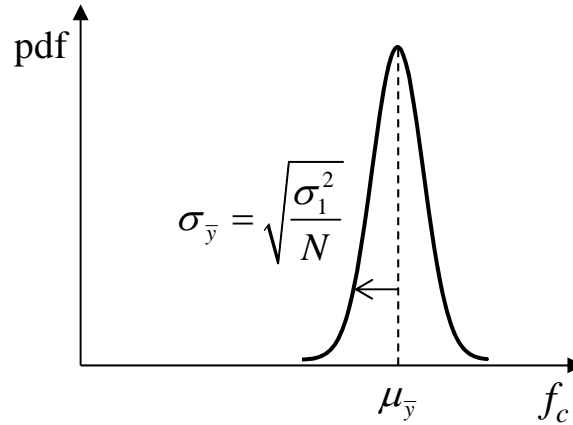
$$\sigma_{2,0} = \sqrt{\sigma_{f_c,0}^2 - \sigma_1^2}$$

$f_{cm,0}$ resistenza media «a priori»

$f_{ck,0}$ res. caratteristica «a priori»

$\sigma_{2,0}$ dev. std. «a priori» della res. media

σ_1 dev. std. rispetto al valore medio



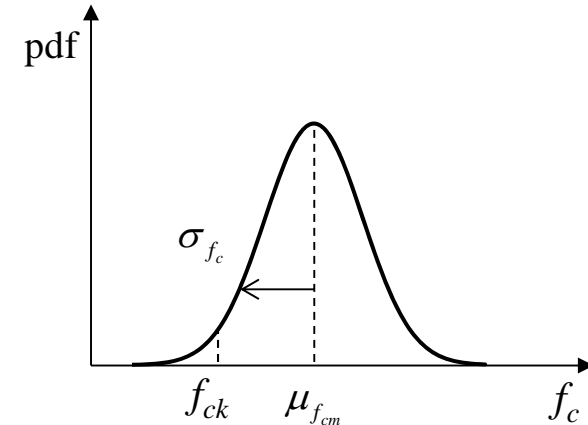
Verosimiglianza dei campioni

$$\mu_{\bar{y}} = \frac{\sum y_i}{N}$$

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N}}$$

N numero di campioni

y_i res. del campione i -esimo



Parametri «a posteriori»

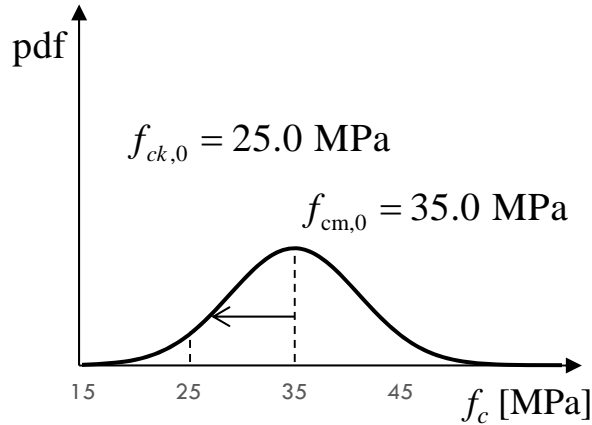
$$\mu_{f_{cm}} = \frac{f_{cm,0}\sigma_1^2 + N\mu_{\bar{y}}\sigma_{2,0}^2}{\sigma_1^2 + N\sigma_{2,0}^2}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2\sigma_{2,0}^2}{\sigma_1^2 + N\sigma_{2,0}^2}}$$

$$\sigma_{f_c} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

$$f_{ck} = \mu_{f_{cm}} - k\sigma_{f_c}$$

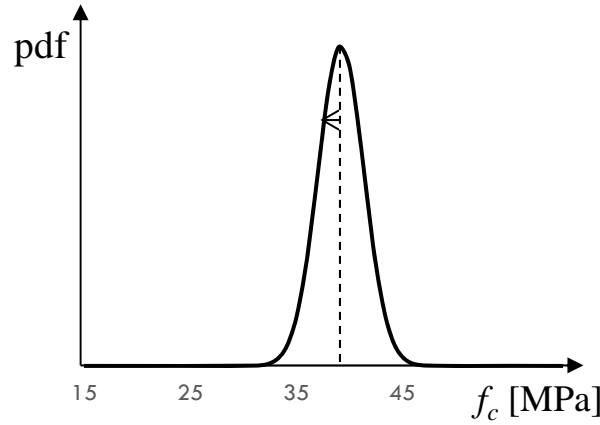
VALORE CARATTERISTICO A POSTERIORI



Valori di prima ipotesi

$$\sigma_{f_c,0} = \frac{f_{cm,0} - f_{ck,0}}{k} = 6.1 \text{ MPa}$$

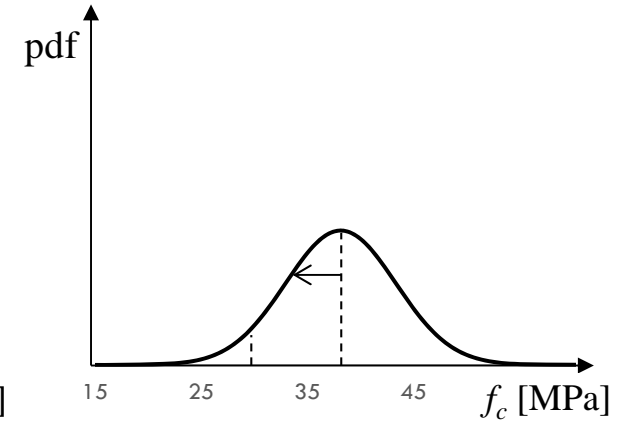
$$\sigma_{2,0} = \sqrt{\sigma_{f_c,0}^2 - \sigma_1^2} = 3.7 \text{ MPa}$$



Verosimiglianza dei campioni

$$\mu_{\bar{y}} = \frac{\sum y_i}{N} = 39.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N}} = 2.2 \text{ MPa}$$



Parametri «a posteriori»

$$\mu_{f_{cm}} = \frac{f_{cm,0}\sigma_1^2 + N\mu_{\bar{y}}\sigma_{2,0}^2}{\sigma_1^2 + N\sigma_{2,0}^2} = 38.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2\sigma_{2,0}^2}{\sigma_1^2 + N\sigma_{2,0}^2}} = 1.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f_c} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 5.2 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = \mu_{f_{cm}} - k\sigma_{f_c} = 29.6 \text{ MPa}$$

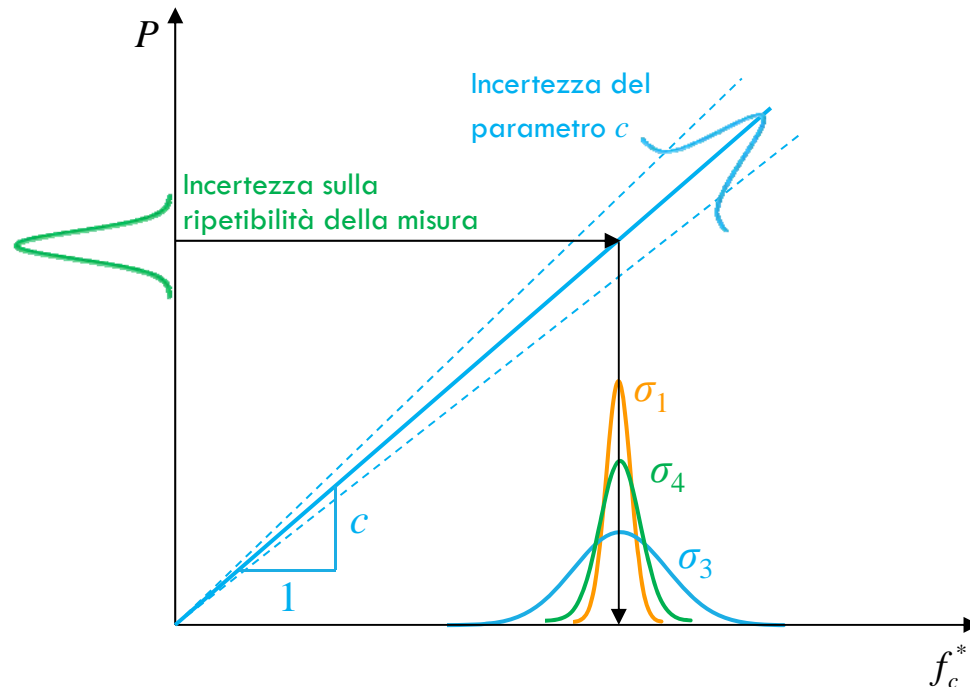
N°	Posizione	f_c [Mpa]
1	5 c	43.0
2	14 d	40.1
3	29 b	33.3
4	34 c	42.2
5	29 d	37.5

PROVE INDIRETTE

- non forniscono direttamente i valori di proprietà meccanica utilizzati nella valutazione
- Es:
 - pull-out, prove sclerometriche per valutare la resistenza del calcestruzzo
 - prove di durezza per valutare la resistenza dell'acciaio
 - prove dinamiche + FEM per stimare il modulo di elasticità del materiale
- Incertezza del valore atteso dovuta a:
 1. Variabilità della resistenza nota la classe
 2. Non conoscenza della classe di resistenza
 3. Incertezza nei parametri di calibrazione
 4. Dispersione dei risultati rispetto al valore atteso



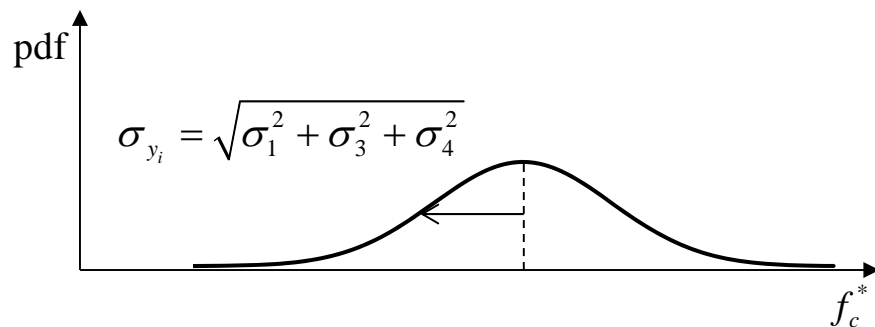
PROVE INDIRECTE DI PULL-OUT



P resistenza al pull-out
 c parametro di calibrazione
 f_c^* resistenza del calcestruzzo misurata attraverso l'estrazione

Incertezza sul singolo campione

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}$$

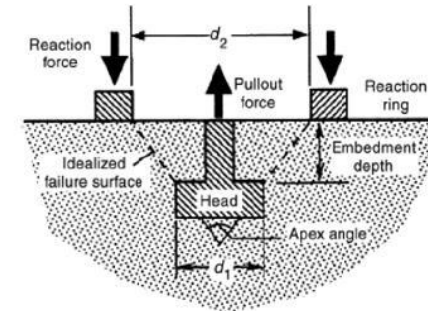
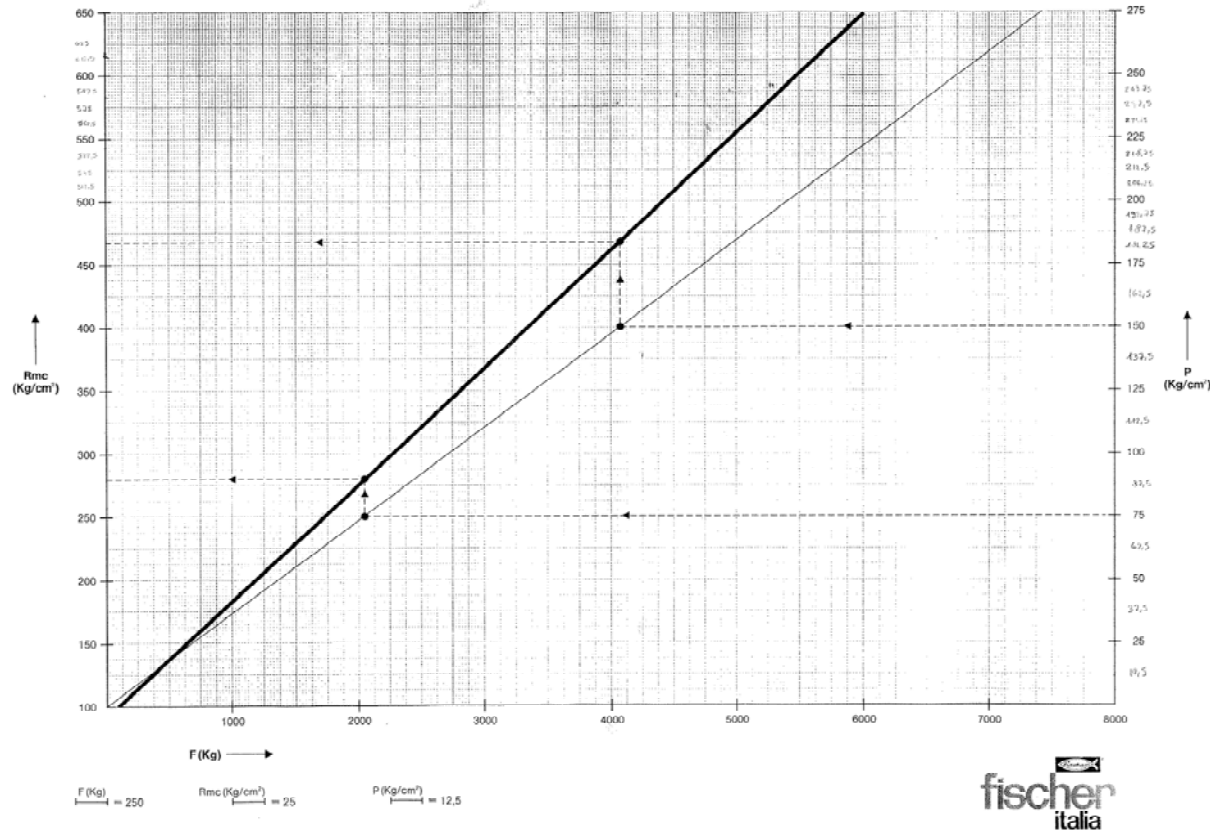


Incertezza sul set di campioni

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N} + \sigma_3^2 + \frac{\sigma_4^2}{N}}$$

PROVE INDIRETTE DI PULL-OUT

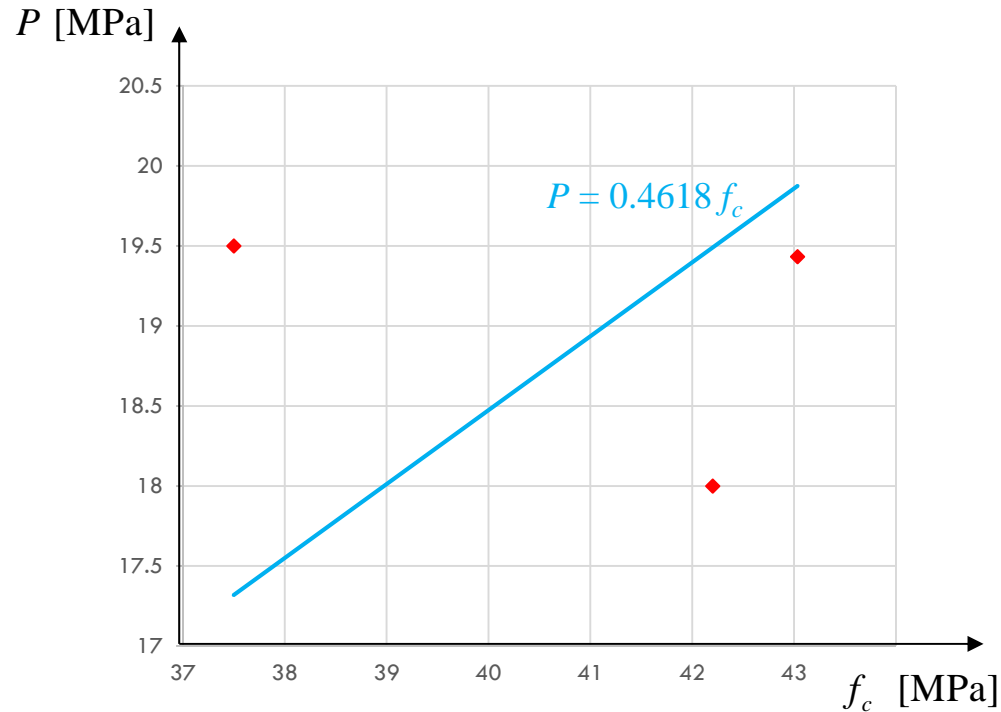
Metodo pull-out, curva di taratura, per tasselli Fischer Zykon M 10 TCP.



www.diagnosticadegliedifici.org



PROVE INDIRETTE DI PULL-OUT



Calibrazione e calcolo delle incertezze

N°	Posizione	Prelievo	P [MPa]	f_c [MPa]
3	33 c	5	19.5	37.5
4	29 d	4	18.0	42.2
9	9 b	2	19.4	43.1

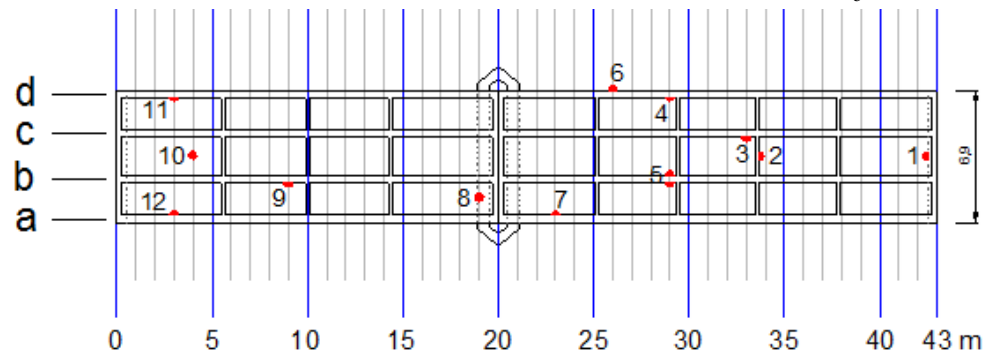
costante di calibrazione $c = 0.4618$

incertezza sulla costante $\sigma_3 = 40.7$ MPa

incertezza sulla misura $\sigma_4 = 4.78$ MPa

Analisi delle prove

N°	Posizione	P [MPa]	f_c [MPa]
6	26 d	18.0	38.6
11	3 d	19.5	41.8
12	3 a	22.0	47.2



Incetenza sul set di campioni

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N} + \sigma_3^2 + \frac{\sigma_4^2}{N}} = 40.9 \text{ MPa}$$

DM 14.01.08

- 2.3: per la valutazione della sicurezza delle costruzioni si adotteranno criteri probabilistici scientificamente comprovati
- per opere di particolare importanza si potranno adottare metodi di livello superiore [a quello semiprobabilistico] tratti da documentazione tecnica di comprovata validità
- 8.5: il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere stabilito dal Progettista, caso per caso
- 8.5.5: per i carichi permanenti, un accurato rilievo... potrà consentire di adottare coefficienti parziali modificati

- Vedi anche EC0 - Basis of Structural Design

PROBLEMA #2

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (§2.5.3) prevedono, per le verifiche allo SLU, l'uso di un coefficiente parziale che amplifica i carichi permanenti

$$\gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}\psi_{02}Q_{k2} + \gamma_{Q3}\psi_{03}Q_{k3} + \dots$$

γ_{G1} coefficiente parziale per i carichi permanenti strutturali

γ_{G2} coefficiente parziale per i carichi permanenti non strutturali

γ_{Qj} coefficiente parziale per i carichi variabili

γ_P coefficiente parziale per il carico da precompressione

ψ_{0k} coefficiente di combinazione

G_1 carico permanente strutturale

G_2 carico permanente non strutturale

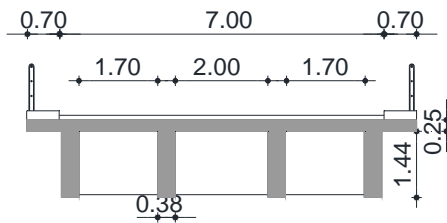
Q_{kj} carico variabile

Posso assumere $\gamma_{G1} = 1.00$ o $\gamma_{G2} = 1.00$ se conosco esattamente la geometria dell'elemento considerato?

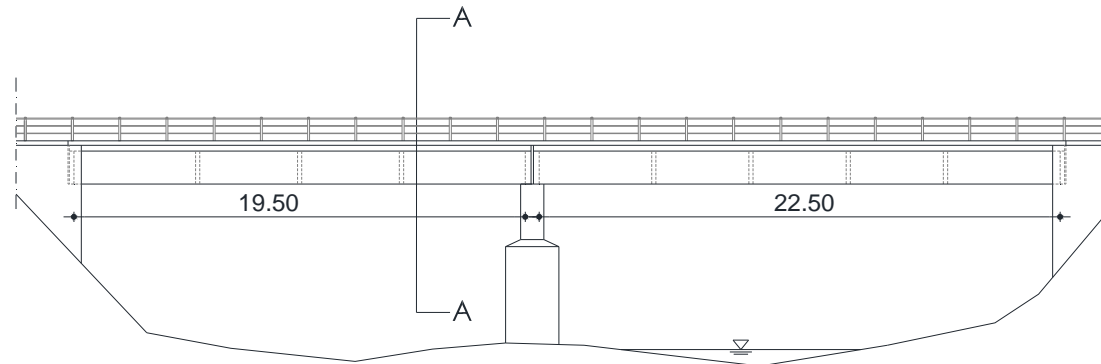
IL CASO STUDIO: PONTE “MASO” - SP 65

Analisi dei carichi permanenti

SEZIONE TRASVERSALE A - A



PROFILO LONGITUDINALE



$$g_1 = n_t \cdot \gamma_{cls} \cdot b \cdot h + \gamma_{cls} \cdot s \cdot l = 107.22 \text{ kN/m}$$

$$g_2 = \gamma_{man} \cdot s_{man} \cdot l_{man} + 2 \cdot \gamma_{mar} \cdot s_{mar} \cdot l_{mar} = 29.75 \text{ kN/m}$$

$$n_t = 4$$

n° di travi

$$s_{man} = 0.15 \text{ m}$$

spessore del manto stradale

$$b = 0.38 \text{ m}$$

larghezza delle travi

$$s_{mar} = 0.25 \text{ m}$$

spessore del marciapiede

$$h = 1.44 \text{ m}$$

altezza delle travi

$$l_{man} = 7.00 \text{ m}$$

larghezza del manto stradale

$$s = 0.25 \text{ m}$$

spessore della soletta

$$l_{mar} = 0.70 \text{ m}$$

larghezza del marciapiede

$$l = 8.40 \text{ m}$$

larghezza della soletta

$$\gamma_{man} = 20 \text{ kN/m}^3$$

peso del manto stradale

$$\gamma_{cls} = 25 \text{ kN/m}^3$$

peso del calcestruzzo

$$\gamma_{mar} = 25 \text{ kN/m}^3$$

peso del marciapiede

IL CASO STUDIO: PONTE “MASO” - SP 65

Analisi dei carichi variabili in accordo con il DM 14 gennaio 2008

Si ipotizza che l'analisi dei carichi in accordo con il DM 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) permetta di pervenire ad un momento caratteristico agente sulla trave più sollecitata di

$$M_{qk} = 2000.00 \text{ kNm}$$

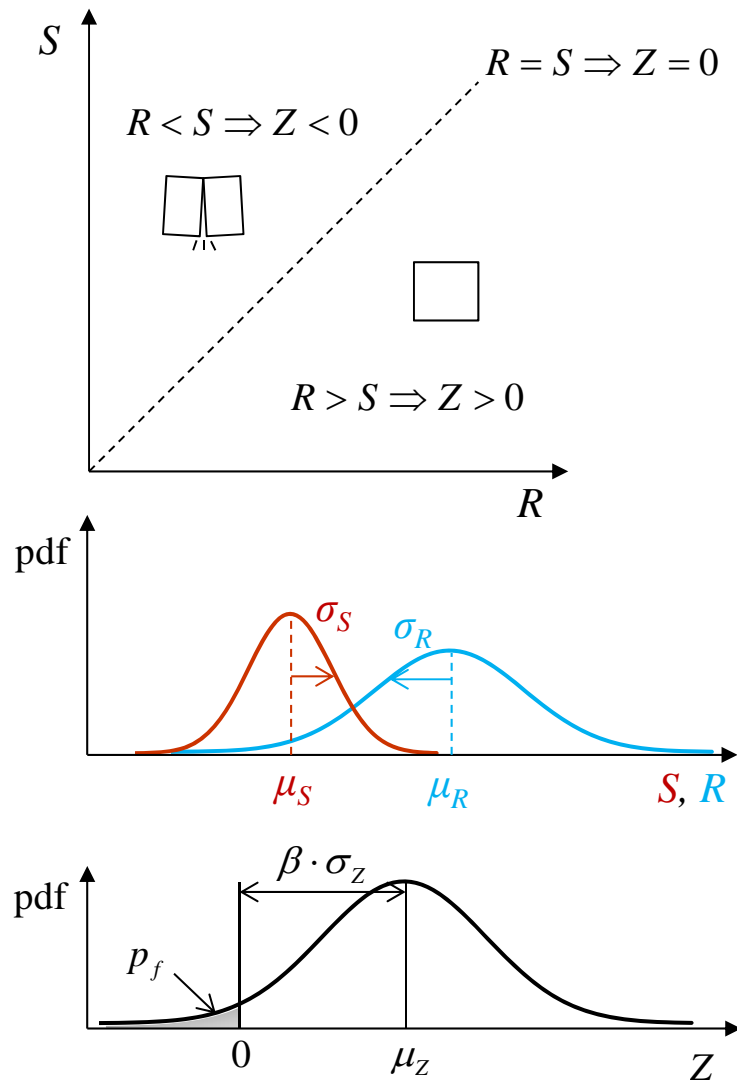
Analisi dei carichi permanenti in accordo con il DM 14 gennaio 2008

L'analisi dei carichi in accordo con il DM 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) permette di porre il carico permanente caratteristico pari al carico permanente medio.

Da ciò si ricava il momento permanente agente sulla trave più sollecitata

$$M_{gm} = 2166.91 \text{ kNm}$$

AFFIDABILITÀ IN SENSO PROBABILISTICO



Funzione di stato limite Z

$$Z = R - S \quad \begin{cases} Z < 0 & \text{collasso} \\ Z \geq 0 & \text{sicurezza} \end{cases}$$

R resistenza (per es., il momento resistente)

S sollecitazione (per es., il momento sollecitante)

Probabilità di collasso p_f ed indice di sicurezza β

$$p_f = \Pr(Z < 0) \approx \Phi(-\beta) \quad \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

σ_Z media di Z

μ_Z deviazione standard di Z

σ_R media di R

μ_R deviazione standard di R

σ_S media di S

μ_S deviazione standard di S

Φ funzione normale (gaussiana) di ripartizione

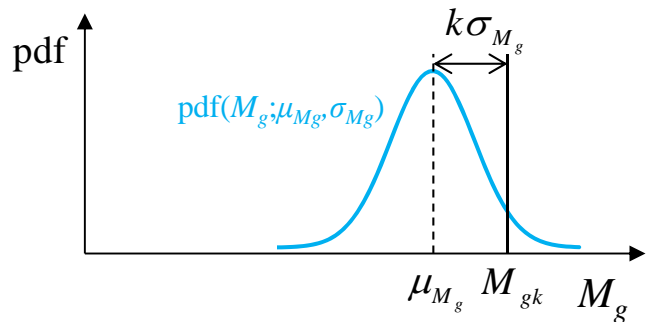
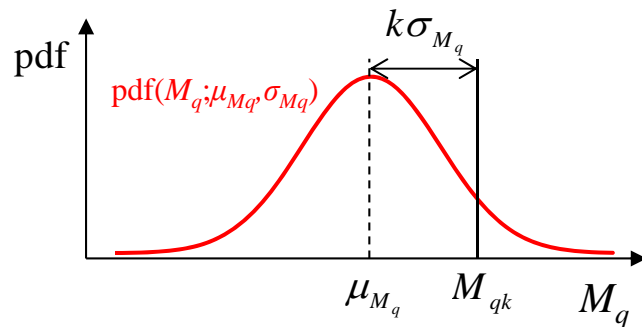
ANALISI DELLA SICUREZZA

Per il caso studio era stato ricavato momento variabile caratteristico agente sulla trave più sollecitata di

$$M_{qk} = 2000.00 \text{ kNm}$$

e il momento permanente agente sulla trave più sollecitata

$$M_{gm} = 2166.91 \text{ kNm}$$



Per il momento variabile si ipotizza un coefficiente di variazione

$$V_{M_q} = \frac{\sigma_{M_q}}{\mu_{M_q}} = 12\%$$

con cui è possibile ricavare il valore medio del momento e la deviazione standard

$$\mu_{M_q} = \frac{M_{qk}}{1 + kV_{M_q}} = 1670.29 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{M_q} = V_{M_q} \cdot \mu_{M_q} = 200.43 \text{ kNm}$$

Per il momento permanente si ha invece

$$V_{M_g} = \frac{\sigma_{M_g}}{\mu_{M_g}} = 5\%$$

$$\mu_{M_g} = 2166.91 \text{ kNm} \quad \sigma_{M_g} = 108.35 \text{ kNm}$$

VALUTAZIONE DELL'AFFIDABILITÀ

Il momento resistente caratteristico della trave più sollecitata è risultato

$$M_{Rk} = 9312.19 \text{ kNm}$$

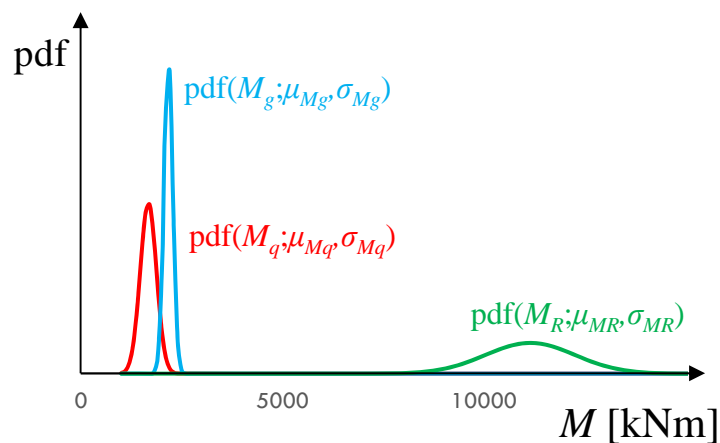
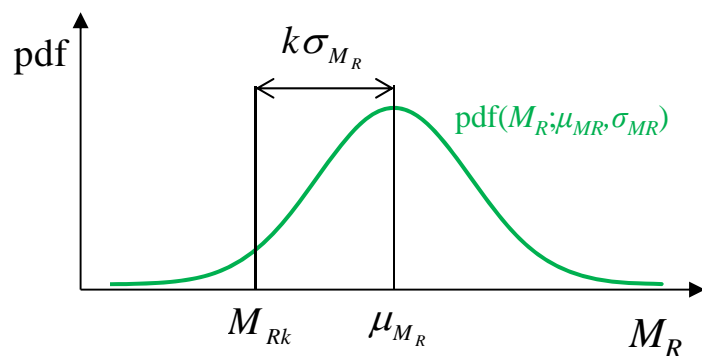
al quale viene attribuito un coefficiente di variazione

$$V_{MR} = 10\%$$

da cui

$$\mu_{M_R} = \frac{M_{Rk}}{1 - kV_{M_R}} = 11145.64 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{M_R} = V_{M_R} \cdot \mu_{M_R} = 1114.56 \text{ kNm}$$



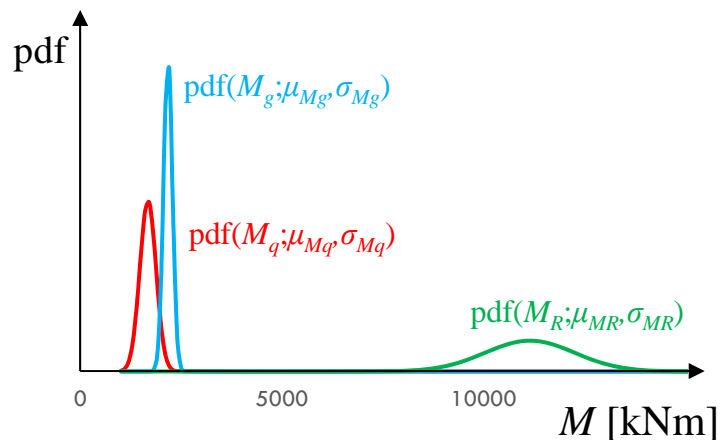
Momento	Media μ [kNm]	Dev. standard σ [kNm]	Coeff. di variazione V
Variabile M_q	1670.28	196.50	12%
Permanente M_g	2166.91	108.35	5%
Resistente M_R	11145.64	1114.56	10%

PRINCIPIO LOGICO

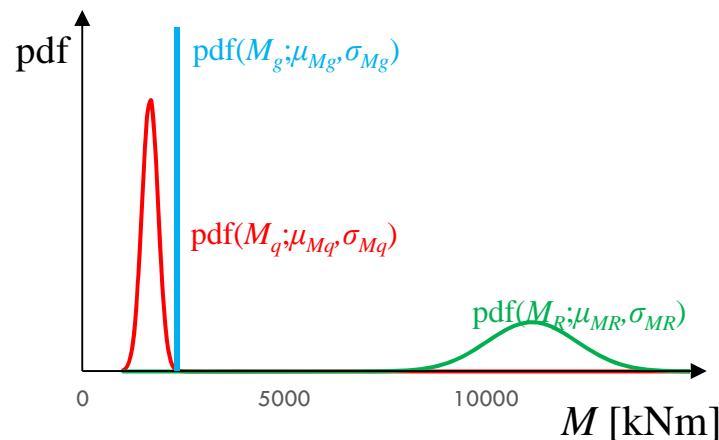
- Il valutatore può ridurre i coefficienti di sicurezza parziali γ per tenere conte dell'effettivo livello di conoscenza delle informazioni
- $\gamma^* = \gamma/\alpha$
- $\alpha > 1$ fattore di riduzione del coefficiente di sicurezza
- In ogni caso, il valutatore deve dimostrare formalmente che: il livello di sicurezza della struttura ottenuto con i coefficienti modificati γ^* e le **informazioni a posteriori** è non minore del livello di sicurezza ottenibile a livello di progetto con i coefficienti da normativa γ e le **informazioni a priori**.
- In pratica, di solito deve essere fatta un'analisi probabilistica per validare una modifica del coefficiente di sicurezza.

VALUTAZIONE DELL'AFFIDABILITÀ

Analisi con momento permanente incerto



Analisi con momento permanente certo



Momento	Media μ [kNm]	Dev. standard σ [kNm]	Coeff. di variazione V
Variabile M_q	1670.28	196.50	12%
Permanente M_g	2166.91	108.35	5%
Resistente M_R	11145.64	1114.56	10%

$$\beta_1 = \frac{\mu_{M_R} - \mu_{M_q} - \mu_{M_g}}{\sqrt{\sigma_{M_R}^2 + \sigma_{M_q}^2 + \sigma_{M_g}^2}}$$

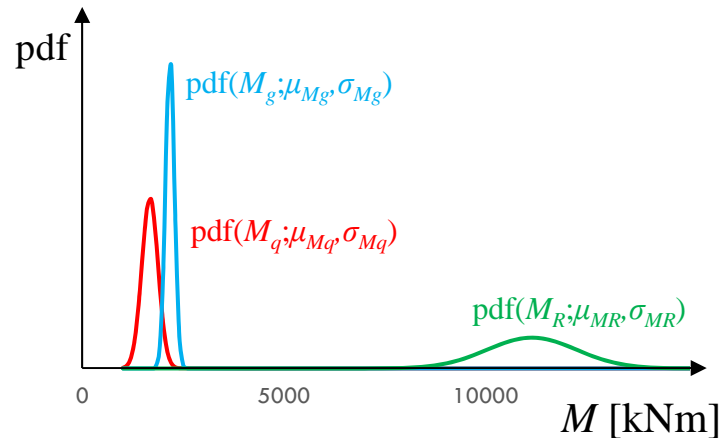
$$\beta_1 = \frac{11145.64 - 1670.28 - 2166.91}{\sqrt{(1114.56)^2 + (196.50)^2 + (108.35)^2}} = 6.4 \Rightarrow p_f = 6.6 \cdot 10^{-11}$$

$$\beta_2 = \frac{\mu_{M_R} - \mu_{M_q} - \mu_{M_g}}{\sqrt{\sigma_{M_R}^2 + \sigma_{M_q}^2}}$$

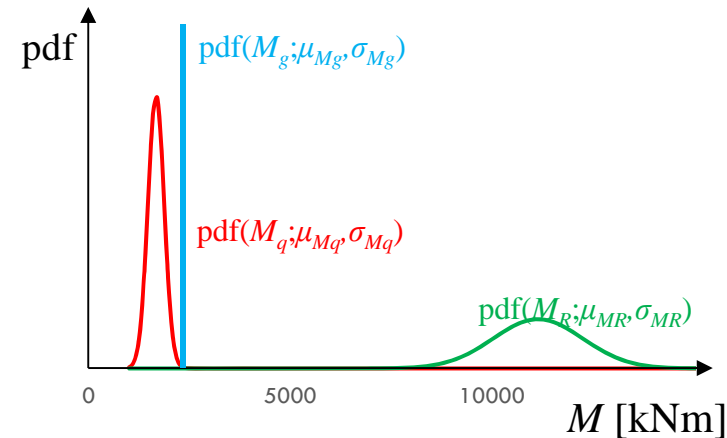
$$\beta_2 = \frac{11145.64 - 1670.28 - 2166.91}{\sqrt{(1114.56)^2 + (196.50)^2}} = 6.5 \Rightarrow p_f = 5.5 \cdot 10^{-11}$$

ANALISI DELLA SICUREZZA

Analisi con momento permanente incerto



Analisi con momento permanente certo



Momento	Media μ [kNm]	Dev. standard σ [kNm]	Coeff. di variazione V
Variabile M_q	1670.28	196.50	12%
Permanente M_g	2166.91	108.35	5%
Resistente M_R	11145.64	1114.56	10%

$$\frac{\mu_{M_R} - \mu_{M_q} - M_g^*}{\sqrt{\sigma_{M_R}^2 + \sigma_{M_q}^2}} = \beta_1 = 6.4 \quad M_g^* = 11145.64 - 1670.28 - 6.4 \sqrt{(1114.56)^2 + (196.50)^2} = 2200.13 \text{ kNm} \neq 2166.91 \text{ kNm}$$

$$\alpha = \frac{M_g^*}{\mu_{M_g}} = \frac{2200.13 \text{ kNm}}{2166.91 \text{ kNm}} = 1.02$$

$$\gamma_g \frac{M_{gk}}{\alpha} + \gamma_q M_{qk} \leq \frac{M_{Rk}}{\gamma_R} \Rightarrow \frac{\gamma_g}{\alpha} = \gamma_g^*$$

$$\frac{1.30}{1.02} = \gamma_g^* = 1.28$$

CONCLUSIONI

- La valutazione della sicurezza è un processo formale attraverso cui calcoliamo la nostra confidenza nelle prestazioni della struttura
- La valutazione dell'esistente è radicalmente diverso dal progetto, perchè utilizza informazioni con livello di conoscenza diverso
- Nell'aggiornamento dei parametri di resistenza dei materiali, è fondamentale valutare tutte le incertezze intrinseche nel metodo di prova
- Vanno in particolare distinte prove dirette e prove indirette
- La modifica dei fattori parziali è possibile, ma richiede la consapevolezza della natura probabilistica della valutazione dell'affidabilità
- Il calcolo corretto può portare a risultati contro-intuitivi!

PER SAPERNE DI PIÙ...

Riferimenti

CEN (2001), prEN 1990: Eurocode 0: Basis of Structural Design.

Jaynes ET (2003), Probability Theory: The Logic of Science, Cambridge (UK), Cambridge University Press.

Melchers RE (1999) Structural Reliability Analysis and Prediction, 2nd Ed., Chichester (UK), Wiley..

Sivia DS (2006), 'Data Analysis: a Bayesian Tutorial', Oxford, Oxford University Press.



Contatti

Daniele Zonta, Università di Trento

<http://www.ing.unitn.it/~dzonta/>

daniele.zonta@unitn.it

Intelligent Infrastructure Innovation

<http://www.i-kubed.com/>