



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Stima dei fattori di confidenza nelle strutture esistenti in CA

Giorgio Monti
21/10/2015



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Parte I: L'impostazione NTC-08

Parte II: Una metodologia per la stima

Parte III: Un esempio



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Parte I

L'impostazione NTC-08

Livelli di conoscenza (LC)

- Per la scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza si distinguono tre LC:
- LC1: Conoscenza **Limitata**
- LC2: Conoscenza **Adeguata**
- LC3: Conoscenza **Accurata**

Livelli di conoscenza (LC)

Gli aspetti che definiscono i LC sono:

- ***Geometria***

Caratteristiche geometriche del sistema strutturale

- ***Dettagli strutturali***

Quantità e disposizione armature

- ***Materiali***

Proprietà meccaniche dei materiali
(acciaio, calcestruzzo, laterizio, malta)

Importanza del LC

COSTO

▣ intervento
┆

▣ acquisizione dati
┆

┆

▣
CONOSCENZA

Dai livelli di conoscenza (LC) ai fattori di confidenza (FC)

| 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 <i>estese</i> verifiche in situ | Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in situ oppure <i>estese</i> prove in situ | Tutti | 1.20 |
| LC3 | | Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esaustive</i> verifiche in situ | Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ oppure <i>esaustive</i> prove in situ | Tutti | 1.00 |

Definizione dei termini

- La definizione dei termini:
 - “visivo”
 - “completo”, “limitato”
 - “estensivo”, “esaustivo”

è quantitativamente definita.

Definizione dei termini

Tabella 11.2a – Definizione dei livelli di rilievo e prove per edifici in c.a.

5:

Rilievo (dei *dettagli costruttivi*)

Prove (sui materiali)

Per ogni tipo di elemento “primario” (trave, pilastro...)

| | | |
|----------------------------|---|---|
| Verifiche limitate | La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi | 1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per 300 m² di piano dell'edificio |
| Verifiche estese | La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi | 2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per 300 m² di piano dell'edificio |
| Verifiche esaustive | La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi | 3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per 300 m² di piano dell'edificio |

Misura delle caratteristiche meccaniche dei materiali in situ

- *Metodi di prova non distruttivi*
 - Non possono essere impiegati in sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione
 - Però, ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive con un più ampio numero di prove non distruttive combinate, tarate su quelle distruttive

Ruolo dei FC

- I fattori di confidenza hanno un *duplice scopo*:
 - a) definire le resistenze dei materiali per il calcolo della **capacità** degli elementi duttili e fragili
 - Le resistenze **medie**, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono **divise** per i fattori di confidenza
 - b) definire le **sollecitazioni** trasmesse dagli elementi duttili a quelli fragili
 - Le resistenze **medie** degli elementi duttili, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono **moltiplicate** per i fattori di confidenza.

Limiti dell'impostazione NTC-08

- LC «discreti»
- FC sono determinati in base a geometria, dettagli e materiali, ma si applicano solo su materiali
- FC applicato indistintamente, con un unico valore, alle resistenze di tutti i materiali esistenti
- Non è chiaro che i valori ottenuti dividendo per i FC sono limiti inferiori degli IC sulle medie
- FC a volte sono applicati sulle resistenze dei singoli meccanismi a volte sulla capacità globale



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Parte II

Una metodologia per la stima



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Parte II: Una metodologia per la stima

1. Introduzione
2. Formulazione analitica
3. Analisi di sensitività
4. Momento e curvatura (snervamento e ultimi)
5. Ottimizzazione degli esperimenti
6. Valutazione delle strutture esistenti in CA

1. Introduzione

- **Attenzione ai tre concetti di:**
 - Livello di conoscenza (LC)
 - Fattore di confidenza (FC)
 - **Livello di confidenza (α)**
 - Riguarda la confidenza che abbiamo nella stima di un parametro (ad es. il valore medio di una variabile incerta).
 - Stimare il valore medio di una variabile incerta con livello di confidenza $\alpha = 0.75$ vuol dire confidare che il valore stimato sia **non maggiore** del vero valore medio, con una probabilità del 75%.
 - Aumentare il livello di confidenza vuol dire ridurre l'incertezza sulla stima.
 - Questo però implica un numero di campioni maggiore.



2. Formulazione analitica

- **Ipotesi sulle variabili di base:**

- La valutazione è eseguita usando i valori medi delle variabili incerte

$$\mathbf{X} = \{ \dots X_i \dots \} \quad \text{con: } \mathbf{X} \sim N(\mathbf{m}, \mathbf{S}),$$

- Poiché la valutazione dei valori medi è incerta, si ha che:

$$m_i \sim N(\mu_{mi}, \sigma_{mi}) \quad \text{con: } \mu_{mi} = m_i, \sigma_{mi} = s_i / \sqrt{n_i}$$

dove n_i è il numero di campioni

(nota: i valori medi sono variabili indipendenti).



2. Formulazione analitica

- **Ipotesi sulla funzione di capacità:**
 - La capacità è $y = G(\mathbf{x})$, con G di classe C^1 (non ha spigoli).
- **Media e varianza del valore medio della capacità Y (cioè, m_Y) sono le seguenti:**

$$\mu_{m_Y} = G(\boldsymbol{\mu}_m) \quad \sigma_{m_Y}^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_{\boldsymbol{\mu}_m}^2 \sigma_{m_i}^2$$



2. Formulazione analitica

- Il Fattore di Confidenza (FC) si definisce allora partendo dalla sua definizione:

$$\frac{\mu_{m_Y}}{FC} = m_Y^\alpha = \mu_{m_Y} - k_{n_i=1,\dots}^\alpha \sigma_{m_Y}$$

- da cui si ottiene:

$$FC = \left(1 - k_{n_i=1,\dots}^\alpha V_{m_Y} \right)^{-1}$$

dove: $V_{m_Y} = \sigma_{m_Y} / \mu_{m_Y}$



3. Analisi di sensitività

3.1 La definizione di k

- Il parametro k dipende:
 - dal livello di confidenza α
 - dal numero di campioni n_i disponibili per ogni variabile incerta X_i .
- Se $n_i = n$ è lo stesso per ogni X_i , allora si può stimare come:

$$b_n \approx 1 - \frac{1}{4n-5}$$

$$k_{\alpha, n-1, p} \approx k_{MP1, \alpha, n-1, p} = \frac{z_p}{A} \frac{4n-6}{4n-5} + z_\alpha \sqrt{\frac{1}{n-1} + \frac{1}{2(n-1)} \left(\frac{z_p}{A} \right)^2}$$

$$\text{with } A = 1 - \frac{1}{2(n-1)} \left(1 + z_\alpha^2 \right)$$



3. Analisi di sensitività

3.2 Numero equivalente di campioni

- In genere, si ha un numero di campioni diverso per ogni variabile (cioè si esegue un numero di prove diverso).
- Si introduce allora il **numero equivalente di campioni** n_e al posto di n , che dipende dalle sensitività s_i delle X_i .

$$n_e = \frac{\sum_{i=1}^N |s_i| n_i}{\sum_{i=1}^N |s_i|}$$



4. Ottimizzazione dell'estrazione dei campioni

- Da un punto di vista pratico, il nostro obiettivo è quello di ottenere il minimo FC compatibilmente con i vincoli di budget.
- Questo pone dei limiti al numero massimo di campioni n_i che possono essere estratti per ogni variabile incerta.
- Considerando la definizione di n_e , ciò equivale a risolvere il seguente problema di ottimizzazione.

$$\max_{n_i > 0} \left\{ \sum_{i=1}^N |s_i| n_i \right\}$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N c_i n_i - C_{MAX} = 0$$

c_i è il costo di estrazione di un campione della i -esima variabile incerta e C_{max} è il budget disponibile

- Si noti che questo è un **problema di programmazione lineare** (sia la funzione obiettivo sia il vincolo sono lineari).





SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Parte III

Un esempio



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Parte III: Un esempio

1. Curvatura ultima di una sezione in CA
2. Validazione dell'approssimazione FOSM
3. Validazione del numero equivalente di campioni

1. Curvatura ultima di una sezione in CA

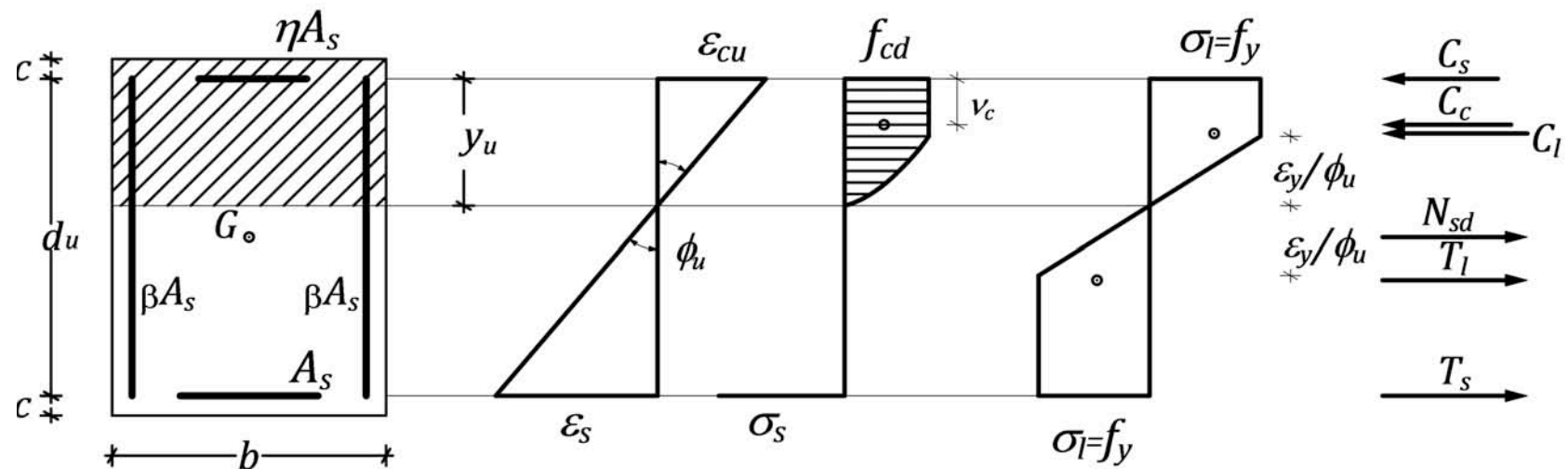
- L'approccio proposto viene adoperato per calibrare il FC della curvatura ultima di un pilastro in CA.

| | |
|------------------------------|---|
| Curvatura snervamento | $\phi_y = \frac{\varepsilon_{yd}}{d_y} \frac{1}{1-\xi_y}$ |
| Momento snervamento | $m_{yd} = \frac{1}{2} \left\{ \mu_{sy} \left(1 + \eta \frac{\xi_y}{1-\xi_y} \right) + \bar{\varepsilon}^2 \xi_y \left(\frac{\xi_y}{1-\xi_y} \right)^2 (1 - 2\nu_c \xi_y) + \frac{1}{3} \beta \mu_{sy} \left(\frac{1}{1-\xi_y} \right) \right\}$ |
| Curvatura ultima | $\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{d_u} \frac{0.8 + 4\beta\mu_{su}}{n_{Sdu} + \mu_{su,tot}}$ |
| Momento ultimo | $m_{Rd} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{l} n_{Sdu} + 2\mu_{su} (1 + \beta) + \\ - \left[0.8^2 + 4\beta\mu_{su} \left(1 + \frac{1}{3} \bar{\varepsilon}^2 \right) \right] \left(\frac{n_{Sdu} + \mu_{su,tot}}{0.8 + 4\beta\mu_{su}} \right)^2 \end{array} \right\}$ |



1. Curvatura ultima di una sezione in CA

- L'approccio proposto viene adoperato per calibrare il FC della curvatura ultima di un pilastro in CA.

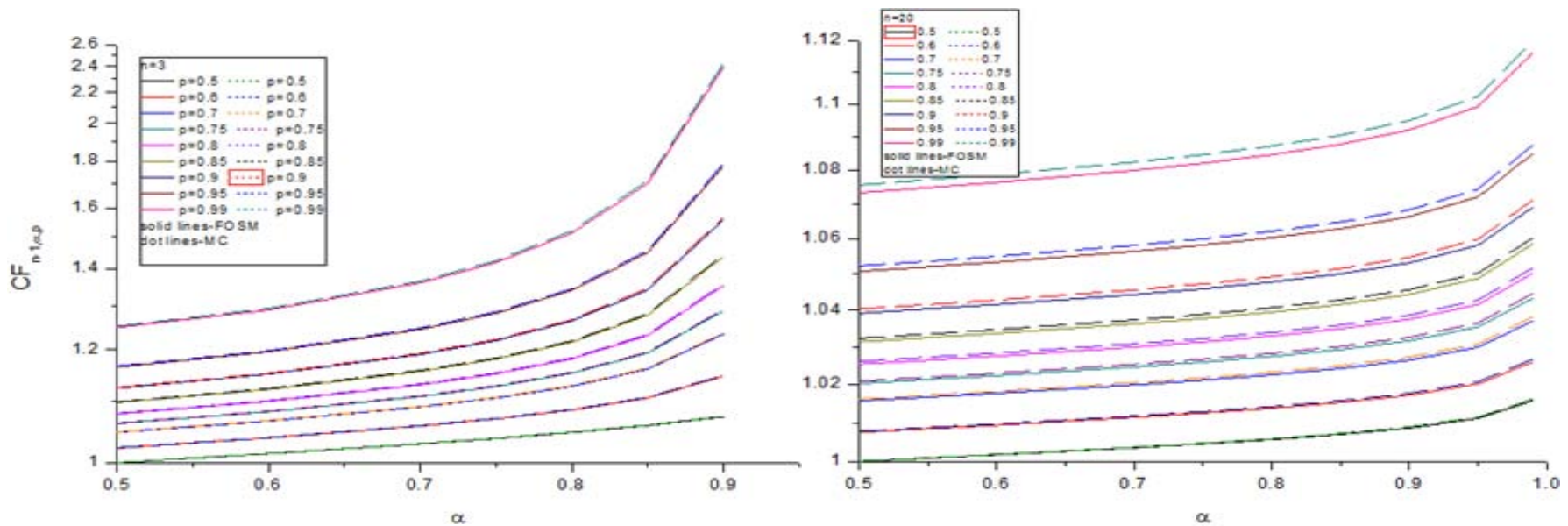


$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{d_u} \frac{0.8 + 4\beta\mu_{su}}{n_{Sdu} + \mu_{su,tot}} \quad \mu_{su} = \frac{A_s f_{yd}}{b d_u f_{cd}}, \quad \mu_{su,tot} = \mu_{su} (1 - \eta + 2\beta)$$



2. Validazione dell'approssimazione FOSM

- L'approssimazione FOSM è stata validata confrontando i risultati ottenuti con simulazioni eseguite col metodo Monte Carlo (MC).
 - I due grafici mostrano il valore del FC ottenuto con FOSM e MC quando il numero di campioni è pari a 3 e 20.
 - Il livello di confidenza α varia a partire da un valore minimo pari a 0.5.



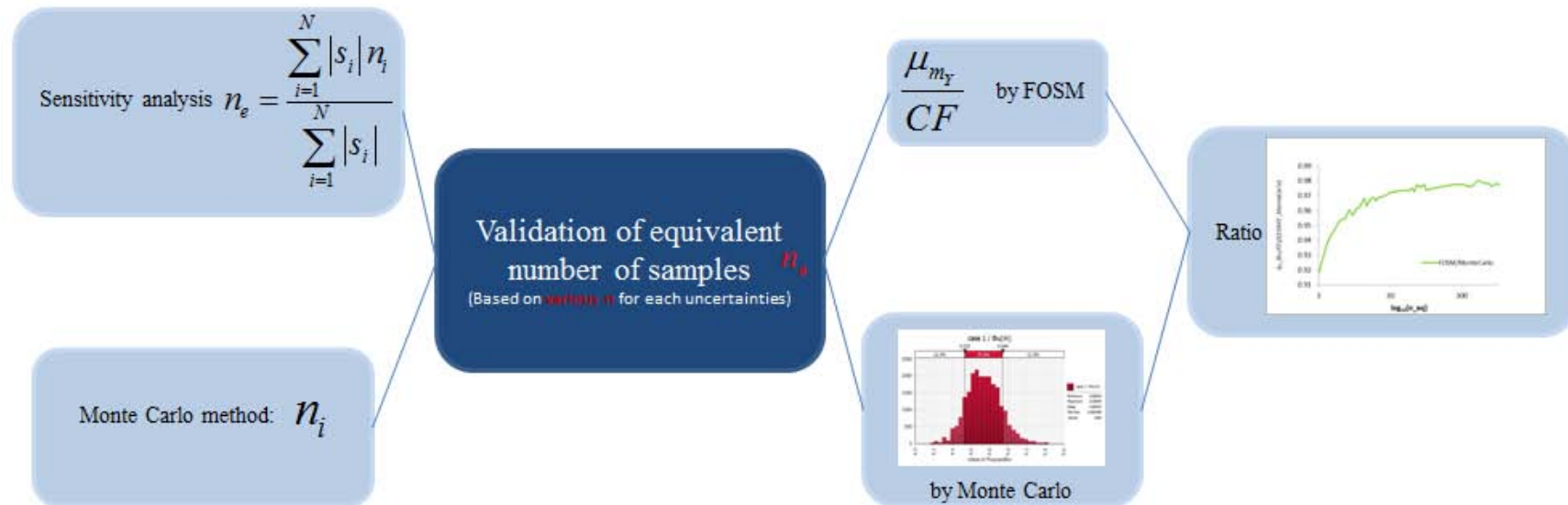
2. Validazione dell'approssimazione FOSM

- Validazione dell'approssimazione FOSM (First Order Second Method) in base al numero di campioni per ogni incertezza.



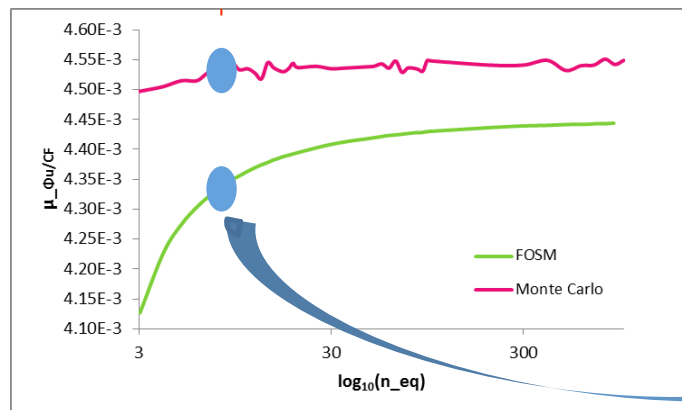
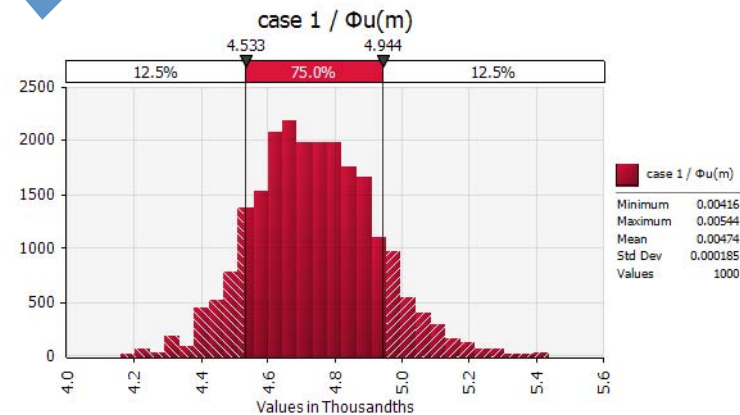
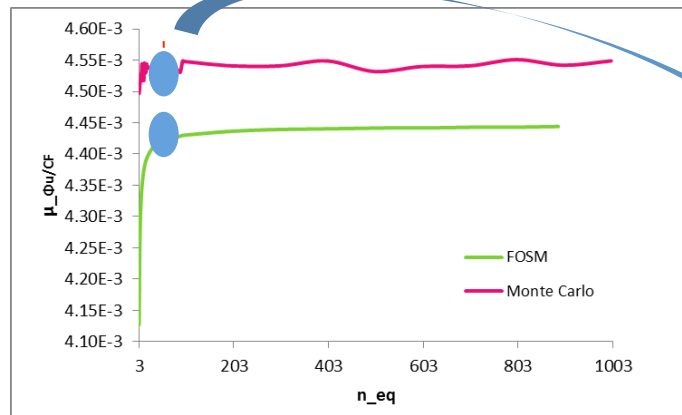
3. Validazione del numero equivalente di campioni

- Validazione del numero equivalente di campioni tramite analisi di sensitività.



3. Validazione del numero equivalente di campioni

- Può essere ad esempio eseguita confrontando la deviazione standard della curvatura ultima calcolata con FOSM e MC.

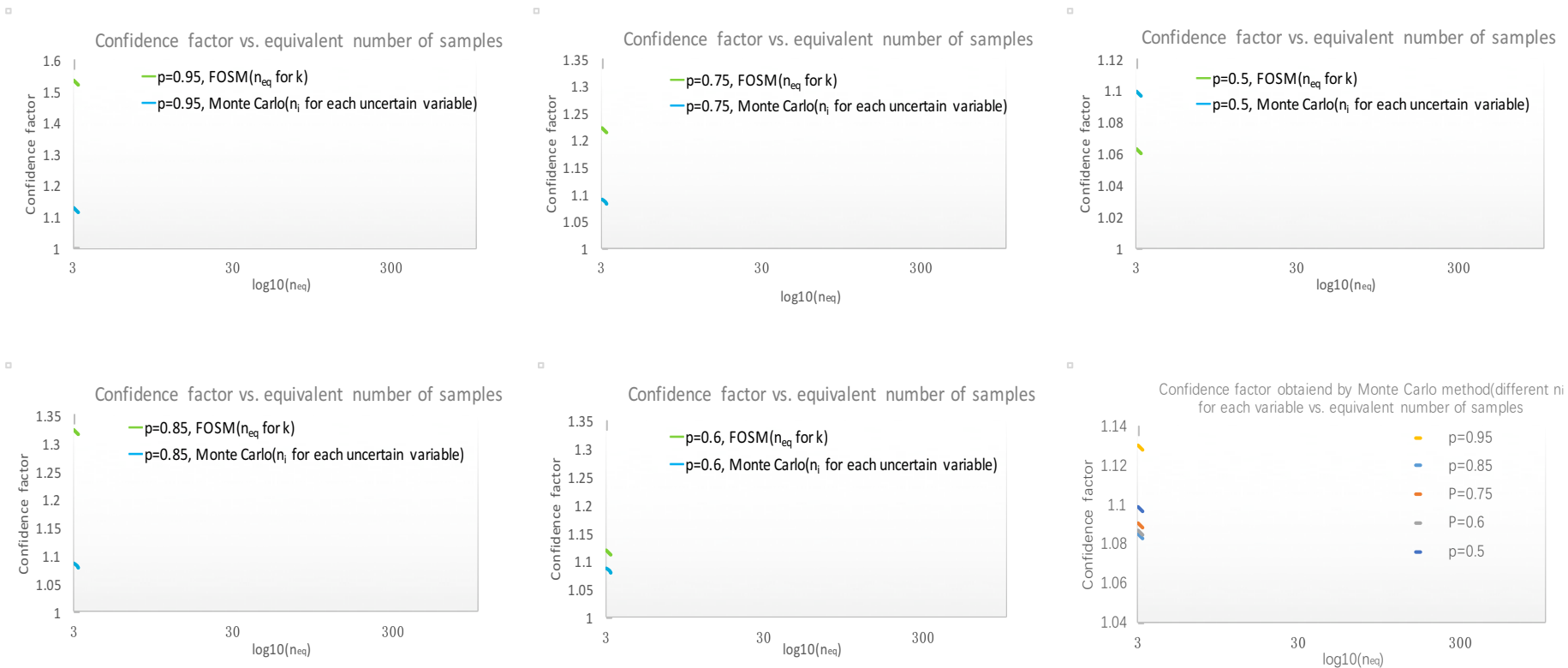


$$\frac{\mu_{m_y}}{CF} = 0.004351$$



3. Validazione del numero equivalente di campioni

- Variazione del FC al variare di n_{eq} per limiti di tolleranza $p = 0.95, 0.85, 0.75, 0.6, 0.5$.



Vantaggi del numero equivalente di campioni

- Esprime quantitativamente, con **continuità**, il LC.
- **Indirizza** la raccolta di un maggior numero di campioni su quei parametri che influenzano maggiormente l'incertezza che si ha sulla capacità.
- **Ottimizza** la raccolta di campioni (costi e benefici possono essere valutati in fase di pianificazione delle indagini).
Maggiore è n_e , maggiore è il costo, ma minore il *FC*.



Sintesi della procedura per la valutazione della capacità di elementi strutturali esistenti in CA

1. Progetto degli esperimenti

1.1 Valutare la sensitività di ogni variabile incerta rispetto alla capacità.

1.2 Scegliere il numero di campioni da estrarre per ogni variabile incerta.

1.3 Stimare il **numero equivalente di campioni**.

1.4 Valutare il costo delle prove sperimentali.

1.5 Iterare fra 1.2 e 1.4 fino a massimizzare il numero equivalente di campioni senza superare il budget (o risolvere un *problema di ottimizzazione*).

1.6 Valutare il FC usando il numero equivalente di campioni per stimare k .

2. Valutazione

2.1 Stimare la capacità di interesse con il valore medio delle variabili incerte.

2.2 Applicare al risultato il FC ottenuto al passo 2.1.



Conclusioni

- L'attuale impostazione LC \rightarrow FC della NTC 2008 può essere migliorata.
- Si è proposto un metodo in cui:
 - LC e FC variano con continuità.
 - Si adotta un numero equivalente di prove che tiene conto del “peso” delle variabili di base rispetto alla grandezza di interesse.
- Il metodo è rigoroso e di facile applicazione.
- L'esito delle validazioni preliminari con metodi MC è molto soddisfacente.



Ringraziamenti

Prof. Giuseppe Quaranta

Eng. Qian Wang

