METODI NON DISTRUTTIVI: LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

S. ALESSANDRI[1], G. MONTI[1], A. GORETTI[2], L. SBARAGLIA[3], G. SFORZA[3]

[1]*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Roma, Italia*

[2]*Dipartimento della Protezione Civile, Ufficio Servizio Sismico Nazionale, Roma, Italia*

[3]*Essebi. S.r.l., Roma, Italia*

SOMMARIO

Le attuali normative italiana [1] ed europea [2], in materia di sicurezza sismica degli edifici esistenti, sanciscono l'impiego di adeguati Fattori di Confidenza (FC) per la valutazione della sicurezza ed il progetto degli interventi sugli edifici esistenti. Il ricorso ai FC è legato al maggior grado di incertezza delle grandezze rilevate negli edifici esistenti rispetto agli edifici di nuova progettazione. Rispetto a questi ultimi, infatti, alle incertezze di natura intrinseca si aggiungono quelle di natura epistemica.

I FC definiti dalle attuali normative, da applicare alle resistenze medie dei materiali per il calcolo della capacità degli elementi strutturali, sono espressi in funzione del Livello di Conoscenza (LC) dell'edificio in esame; quest'ultimo è legato alla quantità ed alla qualità delle informazioni acquisite ed acquisibili relativamente alle caratteristiche geometriche degli elementi strutturali, ai dettagli costruttivi ed alle proprietà dei materiali.

La normativa definisce tre distinti LC ed associa a ciascuno di essi un FC.

Questo lavoro propone una nuova metodologia per la valutazione dei Fattori di Confidenza (FC) che superi l'attuale impostazione tabellare delle Normative Italiana [1] ed Europea [2]. La motivazione è molteplice: a) gli approcci conoscitivi nei confronti dei dettagli costruttivi (armature) sono di natura completamente diversa da quelli nei confronti dei materiali (calcestruzzo e acciaio) e quindi necessitano di trattazioni diverse; b) è improprio che materiali come calcestruzzo ed acciaio con aleatorietà intrinsecamente diverse e su cui l'acquisizione del dato avviene con modalità completamente diverse siano raggruppati sotto un unico FC; c) l'attuale impostazione normativa non dà adeguata rilevanza ai metodi di prova non distruttivi rispetto a quelli distruttivi; d) i valori dei FC dell'attuale normativa non sono fondati su solide basi teoriche.

L'obiettivo primario dello studio è di differenziare i FC, separando quelli da applicare alla resistenza dei materiali (uno per il calcestruzzo ed uno per l'acciaio) da quello da applicare alla geometria delle armature, essendo le due grandezze tra loro troppo disomogenee per essere trattate da un unico FC, come nell'attuale impostazione normativa.

Un ulteriore obiettivo dello studio è di giungere alla selezione dei FC mediante un'equazione esplicita piuttosto che attraverso una definizione tabellare. Vengono infatti sviluppate delle equazioni che consentono di definire il FC per i materiali e per i dettagli costruttivi, caso per caso, in funzione del numero e della tipologia dell'informazione acquisita, dell'affidabilità della strumentazione impiegata e anche delle informazioni note a priori.

La calibrazione dell'equazione dei FC relativi alle resistenze dei materiali è stata eseguita impiegando un metodo bayesiano, che consente di includere nella valutazione sia informazioni a priori (desunte da certificati di prova o dalla pratica costruttiva) sia risultati a posteriori (indagini condotte su materiali ed elementi strutturali).

I metodi di prova in situ vengono riguardati come livelli successivi di aggiornamento delle statistiche a priori sui valori medi della resistenze, tenendo conto anche del livello di affidabilità dei diversi metodi di prova, distruttivi e non distruttivi.

Il metodo proposto, attraverso l'identificazione di un valore di riferimento per la resistenza dei materiali, rappresentato dal limite inferiore di un intervallo di confidenza per il valore medio bayesiano, consente di calibrare il corrispondente FC.

La metodologia proposta e l'equazione sviluppata per i FC sono state validate con numerosi casi simulati e con prove condotte su diversi edifici. I test simulati hanno dimostrato che i valori medi ottenuti applicando l'equazione proposta si discostano molto poco dai valori esatti, mentre i test condotti sugli edifici reali mostrano come i valori ottenuti per i FC riflettano appropriatamente l'affidabilità delle informazioni.

Per ciò che riguarda la geometria delle armature viene proposta una metodologia che, partendo dalla redazione di un progetto simulato, consente di stimare le armature presenti nei vari elementi della struttura basandosi su un confronto con le sezioni indagate. Tale procedura si propone quale base per una successiva calibrazione dei FC per la quantità e la disposizione delle armature.

ABSTRACT

The current Italian [1] and European [2] codes about seismic assessment of existing buildings establish that for the calculation of the capacities of ductile or brittle elements mean value properties of the existing materials, obtained from *in-situ* tests and from the additional sources of information, shall be divided by appropriate Confidence Factors (CF), accounting for the Knowledge Level (KL) attained.

The KL of a building depend on the amount and quality of information collected about geometry, construction details and mechanical properties of the structural elements.

The codes define three different KLs and the relevant CF values.

This paper refers to the diagnostic activity on reinforced concrete buildings, but the theory can be easily extended to the case of masonry buildings.

The proposal consists essentially in a new treatment of the CF, based on an explicit expression rather than on a table definition. Different CFs are then identified, applied to either the materials resistance (of concrete and steel) and the steel reinforcement layout, being these two quantities too heterogeneous to be calculated by the same methodology, as in the current codes.

The aim of the work presented in this paper is the development of a Bayesian procedure for the assessment of concrete and steel strength and the calibration of CF.

Confidence factor due to the materials resistance are evaluated by a new methodology that allows to define these factors in explicit form, case by case, depending on number, typology and reliability of the adopted testing methods and on the reliability of the *a priori* information.

The Bayesian method allows to employ destructive and non-destructive testing results to update a prior probability distribution function.

Destructive and non-destructive testing results are separately employed, taking into account individual testing reliability.

By the developed method a reference parameter for materials strength is evaluated as the lower boundary of a confidence interval for the Bayesian mean.

The CF is calculated each time by an explicit equation and is a function of the number, the type and the reliability of each testing employed and of the reliability of prior information.

These values are applied to a design value of materials strength parameter to make it equal to the reference parameter.

The design values are weighting means of strength value obtained by testing and by prior information.

The equation developed for CF evaluation has been found by regression analysis applied to the reference values and to the design values.

The proposed methodology and the equation developed for CF have been tested on several simulated cases and on testing made on several buildings. The simulated test show that the mean values obtained applying the calibrated CF compared very well with the exact ones; the tests on real buildings show that the calibrated CF reflects very well the information reliability.

Referring to the steel reinforcement layout, it is proposed a methodology that, starting from a simulated design, allows to estimate it in each structural element by comparison of the checked sections. This procedure will be the starting point for a subsequent steel reinforcement CF calibration.

1. LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Il livello di conoscenza di un edificio si raggiunge attraverso l'acquisizione di informazioni tra loro disomogenee.

Occorre innanzitutto distinguere le incertezze legate alla resistenza del materiale da quelle legate ai dettagli (quantità e posizione) delle armature.

Per questi ultimi, infatti, l'incertezza è unicamente di natura epistemica e la conoscenza della distribuzione per una determinata posizione annulla completamente l'incertezza per l'elemento analizzato ma non per le restanti parti della struttura.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno distinguere tra le due variabili resistenza e distribuzione delle armature, trattandole separatamente nella definizione dei FC in quanto tra loro disomogenee. Si avranno pertanto FC distinti per le resistenze dei materiali e per la distribuzione delle armature.

Per la definizione dei primi è stata applicata una metodologia di tipo bayesiano che consente anche di definire differenti FC su zone omogenee all'interno di uno stesso edificio.

2. IL METODO BAYESIANO

La differenza tra valore medio di resistenza dedotto dai campioni estratti dalla struttura e valore medio di resistenza della struttura reale è legata, oltre alla variabilità spaziale intrinseca del materiale, anche ad una variabilità legata all'esecuzione (non conformità rispetto al progetto originario, esecuzione in tempi diversi dei singoli elementi strutturali con materiali di qualità differenti), nonché all'affidabilità dei metodi di prova e alle variazioni subite nel tempo dai materiali.

L'impiego del metodo bayesiano consente di combinare le incertezze dello stimatore del parametro di interesse con la variabilità intrinseca ed epistemica della v.a. di base [3]. Il valore medio a posteriori viene determinato come media pesata del valore medio a priori e del valore medio campionario cui è associata una variabilità legata al metodo di prova.

Si presenta nel seguito la metodologia sviluppata per la calibrazione dei FC.

2.1. Statistiche a priori

Come detto, la conoscenza a priori si basa sui dati desunti dai certificati di prova all'epoca della costruzione, ove presenti, o, in alternativa, dalla normativa e dalla pratica costruttiva all'epoca della costruzione. Da tali dati si desume un valore medio della resistenza del materiale μ'_{f_c}, cui si associa una varianza $\sigma'^2_{\mu f_c}$.

2.2. Statistiche a posteriori

La resistenza dei materiali (calcestruzzo ed acciaio) può essere modellata mediante una distribuzione lognormale.

Il metodo proposto viene nel seguito illustrato mediante applicazione alla resistenza del calcestruzzo, f_c.

Se la variabile f_c è lognormale il suo logaritmo naturale $x = \ln\left(f_c\right)$ è una variabile aleatoria a distribuzione normale con valore medio λ e deviazione standard ζ.

La distribuzione a posteriori del parametro λ, $f_\Lambda(\lambda)$, è normale con valore medio e deviazione standard forniti, rispettivamente, dalle:

$$\mu''_\lambda = \frac{\mu'_\lambda\left(\zeta_p^2 / n_p\right) + \mu_p \sigma'^2_\lambda}{\left(\zeta_p^2 / n_p\right) + \sigma'^2_\lambda} \tag{1}$$

$$\sigma''^2_\lambda = \frac{\left(\zeta_p^2 / n_p\right) \cdot \sigma'^2_\lambda}{\left(\zeta_p^2 / n_p\right) + \sigma'^2_\lambda} \tag{2}$$

in cui, $\mu'_\lambda =$ valore medio a priori di, $\sigma'^2_\lambda =$ varianza a priori di λ; $\mu_{\lambda,p} =$ valore medio del logaritmo naturale dei valori di resistenza ricavati dalle prove e $\zeta'^2_{\lambda,p} =$ varianza del logaritmo naturale dei valori di resistenza ricavati dalle prove.

E' possibile distinguere nella metodologia due o più tipi di prova effettuando aggiornamenti successivi della distribuzione del valore medio.

I dati delle prove distruttive possono essere impiegati come primo livello di aggiornamento delle statistiche sul valore medio della resistenza del calcestruzzo, f_c.

Detto n_{MD} il numero di prove distruttive eseguite sulla struttura e $f_{c_{i,MD}}$ il valore di resistenza ottenuto dall'i-esima prova, si determinano il valore medio, μ_{MD}, e la varianza, ζ^2_{PMD}, del logaritmo dei dati campionari forniti, rispettivamente, dalle:

$$\mu_{MD} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{MD}} \ln(f_{c_{i,MD}})}{n_{MD}} \tag{3}$$

$$\zeta^2_{p_{MD}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{MD}} \left[\ln(f_{c_{i,MD}}) - \mu_{MD}\right]^2}{n_{MD} - 1} \tag{4}$$

Nella varianza campionaria è possibile incorporare gli errori di rilevamento; detto $V_{t,MD}$ il coefficiente di variazione del metodo di prova, la varianza legata al metodo può essere calcolata come:

$$\zeta^2_{t,MD} = V^2_{t,MD} \cdot \mu^2_{MD} \tag{5}$$

Complessivamente, la varianza delle prove può essere valutata mediante la:

$$\zeta^2_{MD} = (\zeta_{p,MND})^2 + (\zeta_{t,MND})^2 \tag{6}$$

Noti valore medio e varianza dei risultati delle prove distruttive è possibile procedere ad un primo aggiornamento del valore medio e della varianza del valore medio di $x = \ln\left(f_c\right)$:

$$\mu''_\lambda = \frac{\mu'_\lambda \left(\zeta^2_{MD} / n_{MD}\right) + \mu_{MD} \sigma'^2_\lambda}{\left(\zeta^2_{MD} / n_{MD}\right) + \sigma'^2_\lambda} \tag{7}$$

$$\sigma''^2_\lambda = \frac{\left(\zeta^2_{MD} / n_{MD}\right) \cdot \sigma'^2_\lambda}{\left(\zeta^2_{MD} / n_{MD}\right) + \sigma'^2_\lambda} \tag{8}$$

A questo punto è possibile incorporare i dati relativi alle prove non distruttive, procedendo, come per i dati delle prove distruttive fino ad ottenere i valori a posteriori dei parametri della distribuzione di λ dati dalle equazioni (1) e (2). Il procedimento descritto può essere riassunto nelle equazioni:

$$\mu'''_\lambda = \frac{\frac{\mu'_\lambda}{(\sigma'_\lambda)^2} + \frac{n_{MD} \cdot \mu_{MD}}{(\zeta_{MD})^2} + \frac{n_{MND} \cdot \mu_{MND}}{(\zeta_{MND})^2}}{\frac{n_{MD}}{(\zeta_{MD})^2} + \frac{n_{MND}}{(\zeta_{MND})^2} + \frac{1}{(\sigma'_\lambda)^2}} \tag{9}$$

$$\sigma'''^2_\lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{n_{MD}}{(\zeta_{MD})^2} + \frac{n_{MND}}{(\zeta_{MND})^2} + \frac{1}{(\sigma'_\lambda)^2}}} \tag{10}$$

E' possibile migliorare l'affidabilità del valore medio determinato con il metodo bayesiano facendo riferimento all'intervallo di confidenza al 95%. In particolare, ciò che interessa è il limite inferiore dell'intervallo, $< \mu)_{1-\alpha}$ che rappresenta quel valore che risulta inferiore al valore medio della popolazione con un livello di confidenza di $(1-\alpha)$; per una distribuzione normale si ha:

$$P\left(\frac{\bar{x}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}} \le k_\alpha\right) = 1-\alpha \tag{11}$$

in cui $(1-\alpha)$ è il livello di confidenza specificato e $k_\alpha = \Phi^{-1}(1-\alpha)$. Riordinando i termini dell'espressione (11) ed introducendo la simbologia precedentemente illustrata si ottiene il limite inferiore dell'intervallo di confidenza $(1-\alpha)$ =95%:

$$\mu'''_{\lambda,\inf} = \mu'''_\lambda - k_\alpha \sigma'''_\lambda = \mu'''_\lambda - 1.96\sigma'''_\lambda \tag{12}$$

cioè quel valore per cui si ha:

$$P\left(\mu'''_\lambda \ge \mu_{f_c} - k_\alpha \sigma'''_\lambda\right) = 0.95 \tag{13}$$

Introducendo nella (12) l'espressione di μ'''_λ si ottiene:

$$\mu'''_{\lambda,\inf} = \sigma'''_\lambda \left\{ (\sigma'''_\lambda) \left[\frac{\mu'_\lambda}{(\sigma'_\lambda)^2} + \frac{n_{MD} \cdot \bar{x}_{MD}}{(\zeta_{MD})^2} + \frac{n_{MND} \cdot \bar{x}_{MND}}{(\zeta_{MND})^2} \right] - 1.96 \right\} \tag{14}$$

Si nota che il parametro $\mu'''_{\lambda,\inf}$ è relativo alla variabile $\lambda = E\left[\ln\left(f_c\right)\right]$; da questo si può ricavare il parametro $\breve{m}'''_{\inf,\breve{m}_{f_c}}$, relativo alla mediana di f_c, $\breve{m}_{fc}$, cioè a quel valore che bipartisce la distribuzione e a cui è associata una probabilità del 50 %:

$$\breve{m}'''_{\inf,\breve{m}_{f_c}} = e^{\mu'''_{\lambda,\inf}} \tag{15}$$

2.3. Definizione del valore di calcolo della resistenza del materiale

Al fine di facilitare il calcolo del valore medio di resistenza da impiegare per la verifica della struttura, si è ritenuto opportuno definire un valore di calcolo della resistenza, dato dalla:

$$\mu = \left[\frac{\mu'_{f_c} + n_{MD} \cdot \mu_{MD} + n_{MND} \cdot \mu_{MND}}{n_{MD} + n_{MND} + 1}\right] \tag{16}$$

in cui μ'_{f_c} = valore medio a priori, μ_{MD} = valore medio delle prove distruttive, μ_{MND} = valore medio delle prove non distruttive.

2.4. Calcolo dei fattori di confidenza, FC

I Fattori di Confidenza, FC, da applicare alle resistenze dei materiali sono stati calibrati in modo da verificare la seguente equazione:

$$\mu_D = \frac{\mu}{FC} \cong \breve{m}'''_{\mathrm{inf},\breve{m}_{fc}} \tag{17}$$

in cui μ_D è il valore medio della resistenza del materiale da utilizzare nelle formule di capacità degli elementi, come indicato dalla normativa.

I FC possono essere espressi in forma esplicita in funzione della deviazione standard del valore medio di calcolo μ che quantifica il grado di affidabilità delle informazioni disponibili:

$$FC = 1 + c \cdot \sigma_\mu^\omega \tag{18}$$

in cui σ_μ = deviazione standard della distribuzione del valore medio di calcolo μ, espressa da:

$$\sigma_\mu = \sqrt{\frac{\sigma_{MND}^2 + \left(V_{p,MND} \cdot \mu_{MND}\right)^2}{n_{MND}} + \frac{\sigma_{MD}^2 + \left(V_{p,MD} \cdot \mu_{MD}\right)^2}{n_{MD}}} \tag{19}$$

con μ_{MND} = valore medio delle prove non distruttive, σ_{MND}^2 = varianza campionaria delle prove non distruttive, μ_{MD} = valore medio delle prove distruttive, σ_{MD}^2 = varianza campionaria delle prove distruttive, $V_{p,MND}$, $V_{p,MD}$ = coefficienti di variazione legati al metodo di prova. Questi ultimi dovrebbero essere forniti dagli esecutori del metodo di prova, in relazione alla precisione dell'apparecchiatura usata e alle equazioni di correlazioni impiegate per determinare la resistenza a partire dalla grandezza rilevata (rimbalzo, velocità, ecc.).

Al fine di calibrare i valori del coefficiente c e dell'esponente ω nella (18), la procedura descritta è stata applicata a casi simulati mediante metodo Monte Carlo, ipotizzando un valore noto di μ_{f_c} ed il possibile campo di variazione di tutti i parametri (V_{f_c}, μ'_{f_c}, V'_{f_c}, n_{MD}, $V_{t,MD}$, n_{MND}, $V_{t,MND}$).

I valori di c e ω sono stati ottenuti mediante il metodo dei minimi quadrati all'insieme dei valori di μ_D calcolati mediante la (17) e all'insieme dei valori di $\breve{m}'''_{\mathrm{inf},\breve{m}_{fc}}$ calcolati mediante il procedimento bayesiano descritto, per tutti i casi simulati.

L'equazione risultante per la valutazione del FC è:

$$FC = 1 + 0.02 \cdot \sigma_\mu^{0.3} \tag{20}$$

in cui σ_μ, valutato con la (19), è espresso in kN/m^2.

La procedura di calcolo del FC relativo alla resistenza di un materiale segue quindi i seguenti passi:

1. Acquisizione dell'eventuale informazione a priori
2. Scelta dei metodi di prova distruttivi (con coefficiente di variazione $V_{p,MD}$) e non distruttivi ($V_{p,MND}$)
3. Esecuzione delle prove distruttive e calcolo di valore medio e varianza, μ_{MD} e σ_{MD}^2
4. Esecuzione delle prove non distruttive e calcolo di valore medio e varianza, μ_{MND} e σ_{MND}^2
5. Calcolo di σ_μ mediante la (19)
6. Calcolo del FC mediante la (20).

La Figura 1 mostra il confronto, per tutti i casi simulati, tra i valori di μ_D calcolati mediante la (17), con FC fornito dalla (20), e i corrispondenti valori di $\breve{m}_{f_c}$; tale confronto dimostra che i valori di μ_D ottenuti non sovrastimano mai il valore mediano reale e, al contempo, non risultano penalizzati, in quanto nel 90% dei casi il loro valore è compreso tra l'80% ed il 90% di $\breve{m}_{f_c}$.

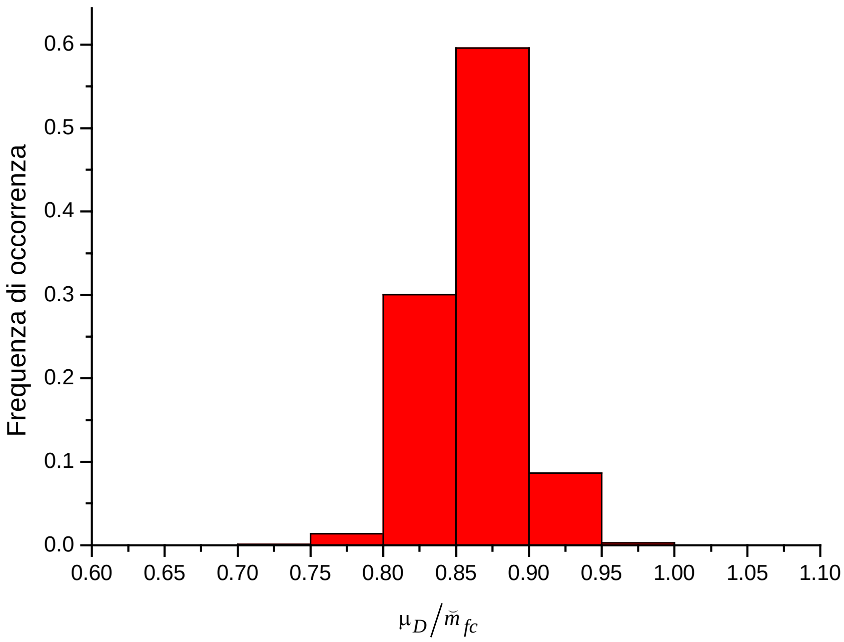

Figura 1. Confronto tra valore di progetto e valore reale della resistenza di f_c

3. CASI STUDIO

Il metodo proposto è stato applicato alla valutazione del valore medio di resistenza del calcestruzzo per alcuni casi reali.

I casi analizzati riguardano 7 edifici su cui sono state condotte prove impiegando sia metodi distruttivi (carote) che metodi non distruttivi (sclerometro ed ultrasuoni). In nessuno dei casi analizzati era disponibile una informazione a priori, pertanto tale dato non è stato incluso nella valutazione.

La Figura 2 e la Figura 3 mostrano come i valori ottenuti per i FC riflettano l'affidabilità delle informazioni pesando adeguatamente i dati che risultano maggiormente dispersi.

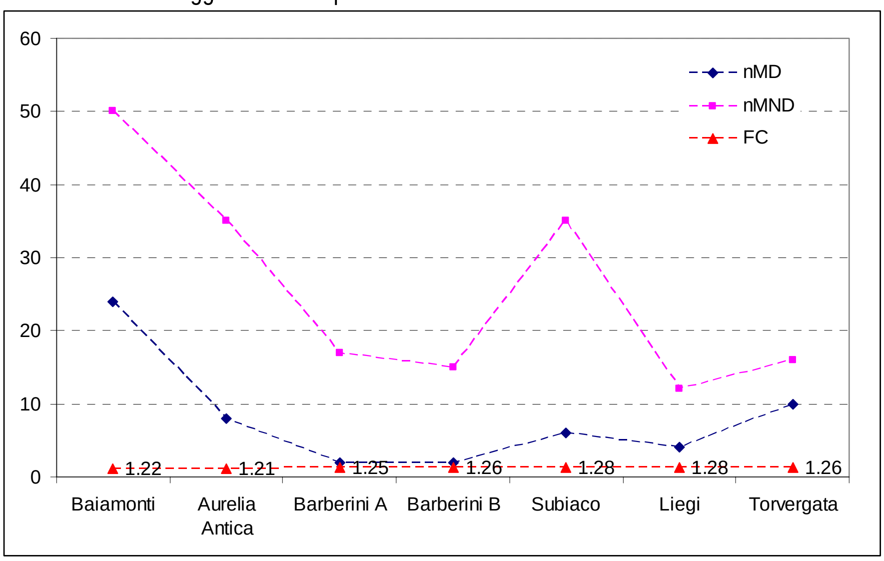

Figura 2. Variazione del FC in funzione del numero di prove eseguite con MD e MND per i 7 edifici analizzati

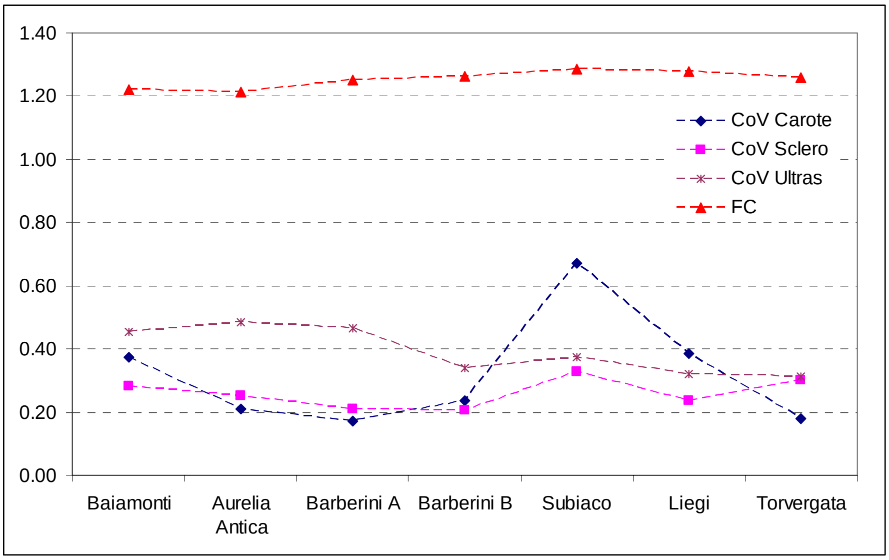

Figura 3. Confronto tra FC ed i coefficienti di variazione CoV delle prove eseguite con MD (carote) e MND (sclerometriche e ultrasoniche) per i 7 edifici analizzati

4. ARMATURE

In questo paragrafo viene presentato un metodo per la valutazione dei dettagli costruttivi delle armature. Il metodo viene qui formalizzato, mentre una sua applicazione a casi reali è attualmente in fase di attuazione.
Il procedimento può essere così riassunto:

1. progetto simulato dell'edificio in accordo alle norme dell'epoca
2. determinazione del quantitativo di armatura presente in alcune sezioni
3. confronto tra quantitativo stimato ed osservato nelle sezioni indagate
4. aggiornamento della stima iniziale nelle sezioni non indagate sulla base del confronto effettuato nelle sezioni indagate.

Nel presente lavoro si analizza il solo punto 4.

Si introduce il rapporto R tra armatura "osservata" e stimata. Inizialmente R=1 per tutte le sezioni. Su un certo numero di sezioni, ad indagini effettuate, è possibile determinare il rapporto tra quanto effettivamente osservato e quanto stimato inizialmente. N sarà il numero di sezioni indagate e R^* il predetto rapporto che potrà essere maggiore o minore dell'unità e che sarà, in genere, diverso da sezione a sezione.

Per estendere a tutta la struttura i risultati delle indagini è necessario introdurre una correlazione (spaziale) della variabile R. Per correlazione nulla le informazioni non si aggiornano in sezioni diverse della struttura e pertanto il saggio in un pilastro non fornisce indicazioni su quanto potremmo discostarci dalla stima iniziale in un altro pilastro. Il caso limite opposto è quello della perfetta correlazione che fornisce, invece, il massimo dello scambio di informazione in pilastri diversi. La correlazione tra armature in pilastri diversi verrà indicata con ρ_a. La deviazione standard della stima iniziale verrà indicata con σ_a ed è una misura dell'attendibilità del progetto simulato.

Un ulteriore variabile di interesse è l'errore associato alla misura dell'armatura. Per saggi distruttivi, tale errore può essere considerato nullo, mentre per saggi non distruttivi, l'errore può essere significativo, in particolare nelle zone di sovrapposizione delle barre o per copriferri elevati. La deviazione standard dell'errore di misura verrà indicata con σ_ε e la sua correlazione spaziale ρ_ε. Notare che sarebbe l'errore di misura su R, ma è possibile dall'errore di misura sull'armatura osservata risalire all'errore di misura su R.

Considerando le sezioni di armatura in un vettore R, quelle indagate con R^*, ed indicando con Σ_a e Σ_ε la matrice di varianza – covarianza di R e dell'errore di misura, una stima di R nelle sezioni non indagate è pari a:

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} + \mathbf{\Sigma}_a \mathbf{E}\left(\mathbf{E}^T \mathbf{\Sigma}_a \mathbf{E} + \mathbf{\Sigma}_\varepsilon\right)^{-1}\left(\mathbf{R}^* - \mathbf{R}\right) = \mathbf{R} + \mathbf{K}\left(\mathbf{R}^* - \mathbf{R}\right) \tag{21}$$

dove la matrice E è una matrice di estrazione delle sezioni indagate rispetto a tutte le sezioni

Per semplificare la soluzione si può considerare l'errore di misura completamente scorrelato e uguale per tutte le sezioni:

$$\mathbf{\Sigma}_\varepsilon = \sigma_\varepsilon^2 \mathbf{I} \tag{22}$$

con I matrice identità. E' inoltre possibile considerare perfettamente correlata l'armatura nelle varie sezioni e con ugual varianza. Pertanto si ha:

$$\mathbf{\Sigma}_a = \sigma_a^2 \mathbf{11} \tag{23}$$

con 11 matrice di tutti uno.

In questo caso la matrice K ha tante righe quante le sezioni da aggiornare e tante colonne quante le sezioni indagate. I termini di K sono tutti uguali tra loro, indipendentemente dal numero di riga o di colonna. Il generico termine vale (Matlab, simbolico):

$$K = K(i,j) = \sigma_a^2 \Big/ \left(N\sigma_a^2 + \sigma_\varepsilon^2\right) \tag{24}$$

Poiché gli elementi di K sono uguali, il termine K (R*-R) può essere scritto nella forma:

$$\mathbf{K}\left(\mathbf{R}^* - \mathbf{R}\right) = KN\mathsf{E}\left[\left(\mathbf{R}^* - \mathbf{R}\right)\right] = KN\mathsf{E}\left[\mathbf{R}^*\right] - KN\mathbf{1} \tag{25}$$

Con $\mathsf{E}\left[\mathbf{R}^*\right]$ media del rapporto tra armature osservate e simulate nelle sezioni indagate ed 1 vettore di tutti uno, essendo R=1.

In definitiva:

$$\mathbf{R}' = \left(1 - KN\right)\mathbf{R} + KN\mathsf{E}\left[\mathbf{R}^*\right] \tag{26}$$

Poiché il termine KN vale:

$$KN = N\sigma_a^2 \Big/ \left(N\sigma_a^2 + \sigma_\varepsilon^2\right) = \left[1 + \sigma_\varepsilon^2 \Big/ \left(N\sigma_a^2\right)\right]^{-1} \tag{27}$$

Qualora si possa considerare nullo l'errore di misura, KN=1 e l'aggiornamento delle armature risulta semplicemente dall'espressione:

$$\mathbf{R}' = \mathsf{E}\left[\mathbf{R}^*\right] \tag{28}$$

Cioè in ogni sezione l'armatura aggiornata nelle sezioni non indagate si ottiene da quella simulata scalata nel rapporto dato dalla media dei rapporti tra armatura osservata e simulata nelle sezioni indagate.

Nel caso si voglia introdurre una correlazione non perfetta, ma uguale per le varie sezione si ha:

$$KN = \sigma_a^2 \rho_a N \Big/ \left[\left(N-1\right)^* \sigma_a^2 \rho_a + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_a^2\right] \tag{29}$$

La procedura può essere adottata anche in relazione ad elaborati di progetto che non rispecchiano l'"*as built*".

5. CONCLUSIONI

Questo lavoro propone una nuova metodologia per la valutazione dei Fattori di Confidenza (FC) che superi l'attuale impostazione tabellare delle Normative Italiana [1] ed Europea [2]. La motivazione è molteplice: a) gli approcci conoscitivi nei confronti dei dettagli costruttivi (armature) sono di natura completamente diversa da quelli nei confronti dei materiali (calcestruzzo e acciaio) e quindi necessitano di trattazioni diverse; b) è improprio che materiali come calcestruzzo ed acciaio con aleatorietà intrinsecamente diverse e su cui l'acquisizione del dato avviene con modalità completamente diverse siano raggruppati sotto un unico FC; c) l'attuale impostazione normativa non dà adeguata rilevanza ai metodi di prova non distruttivi rispetto a quelli distruttivi; d) i valori dei FC dell'attuale normativa non sono fondati su solide basi teoriche.

Si è quindi distinto tra i FC da applicare alla resistenza dei materiali, uno per il calcestruzzo ed uno per l'acciaio, ed il FC da applicare alla geometria delle armature.

Per la valutazione dei FC relativi alle resistenze dei materiali è stata sviluppata una equazione esplicita che consente di calcolarli senza far riferimento alle tabelle normative, caso per caso, in funzione del numero, tipologia delle prove eseguite, dell'affidabilità della strumentazione impiegata e delle informazioni note a priori.

La metodologia proposta e l'equazione sviluppata per i FC sono state validate con numerosi casi simulati e con prove condotte su diversi edifici. I test simulati hanno dimostrato che i valori medi ottenuti applicando l'equazione proposta si discostano molto poco dai valori esatti, mentre i test condotti sugli edifici reali mostrano come i valori ottenuti per i FC riflettano appropriatamente l'affidabilità delle informazioni.

Per ciò che riguarda la geometria delle armature viene proposta una metodologia che, partendo dalla redazione di un progetto simulato, consente di stimare le armature presenti nei vari elementi della struttura basandosi su un confronto con le sezioni indagate. Tale procedura si propone quale base per una successiva calibrazione dei FC per la quantità e la disposizione delle armature.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato sviluppato nell'ambito del programma "Dipartimento di Protezione Civile – Consorzio RELUIS", firmato l'11-07 (n. 540), Linea di Ricerca 2, il cui supporto finanziario è stato grandemente apprezzato.

BIBLIOGRAFIA

[1]. OPCM 3431, 3-05-05, Allegato 2.

[2]. EC8 Eurocodice 8 – Parte 3 ENV 1998 1-1. Design of structures for earthquake resistance. 2004.

[3]. Ang AH-S, Tang WH. Probability Concepts in Engineering Planning and Decision, Vol. I, Basic Principles. John Wiley and Sons: New York, 1975.