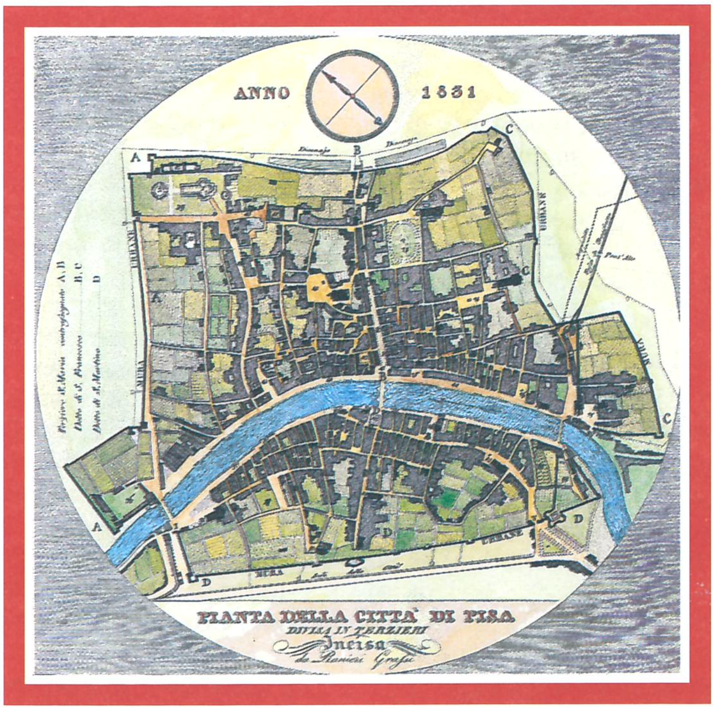
Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia

LA FUZZY SETS THEORY NELLE MISURE DI RE-DESIGN

MAURIZIO ACITO
Libero Professionista in Milano
ALESSANDRO PONZONE
Libero Professionista in Cuneo
ANTONIO MIGLIACCI
Politecnico di Milano.

13° Congresso C.T.E.

Pisa, 9 - 10 - 11 Novembre 2000



LA FUZZY SETS THEORY NELLE MISURE DI RE-DESIGN

MAURIZIO ACITO
Libero Professionista in Milano
ALESSANDRO PONZONE
Libero Professionista in Cuneo
ANTONIO MIGLIACCI
Politecnico di Milano.

SUMMARY

This work outlines a possible approach to the problem of the calibration of partial safety-factors (Ultimate Limit States) in the Re-Design of existing concrete structures.

The paper proposes a new fuzzy approach for the calibration of concrete partial safety-factors.

The procedure is based on linguistic judgement of quality parameters of existing concrete structures as building manufacture quality, quality design, etc..

1. INTRODUZIONE

Attualmente, è noto che per organizzare razionalmente i principi e le regole necessari per garantire la sicurezza di costruzioni si hanno diverse possibilità.

In particolare, i principali metodi divulgati in letteratura (ad esempio, [01], [02]) vengono definiti:

- *Metodi di livello 3,* quando si affronta direttamente il calcolo degli integrali per la valutazione della probabilità di insuccesso o "failure" P_f ;
- *Metodi di livello 2,* quando la P_f è garantita attraverso una relazione nominale basata sulla valutazione di una grandezza β detta distanza o indice di sicurezza;
- *Metodi di livello 1*, divulgati operativamente in [03], [04], [05], [06], [07] nei quali non si calcola la P_f, ma i suoi valori desiderati non dovrebbero essere superati attraverso l'adozione di opportuni coefficienti parziali γ, lato resistenza e lato sollecitazioni, e coefficienti ψ per la combinazione delle azioni (ad esempio, [08]).

Tutti questi metodi operano con riferimento a ciascuno dei molteplici aspetti di comportamento che ogni costruzione può presentare. In tal caso, misurare in termini probabilistici la sicurezza nei confronti dell'i^{mo} Stato Limite (SL), significa valutare la probabilità P_{fi} che si determini tale SL e confrontarla con valori P_{fi}^* prefissati sulla base di considerazioni di vario genere (etiche, sociali, economiche, ecc.). In particolare, per l'i^{mo} SL, se risulta:

$$P_{fi} \leq P_{fi}^* , \qquad (1)$$

allora, la misura si ritiene positiva per tale i^{mo} SL.

Peraltro, è noto come sia possibile determinare la probabilità P_f globale di una costruzione passibile di n SL, appunto al fine di scrivere la misura della sicurezza in presenza di un numero n di crisi possibili. È altresì noto, come si possa "adeguare" tale misura, fatta in un determinato istante, all'intero tempo di vita T_S della costruzione tenendo conto della variabilità nel tempo delle azioni e ammettendo che la sorveglianza e la manutenzione siano in grado di mantenere la resistenza costante (in termini statistici) nel tempo.[1]

In tale ipotesi, il problema è quello di valutare i valori della probabilità P_{fi} nei confronti di un determinato SL in un determinato istante. Inteso che si tratta di una ben determinata crisi (la i^{ma}), e nel prosieguo si omette il pedice i, come pure non si considera il parametro tempo.

Il valore P_f che si ottiene dal calcolo deve essere confrontato con un valore assegnato P_f^* secondo la (1), che è quindi operativa, sennonché per i valori P_f^* da assegnare ai diversi SL non si ha univocità di vedute.

In passato il CEB ([03]) aveva suggerito i valori P_f^* =10^{-5}÷10^{-7} per gli stati limite ultimi (Ultimate Limit State, ULS) e P_f^* =10^{-2}÷10^{-3} per gli stati limite di servizio (Serviceability Limit State, SLS) senza però fare riferimento esplicito al tempo che deve essere considerato (ossia, non si parlava del tempo di vita richiesto T_S).

Recentemente, però, ad esempio in Eurocodice 1 [04] si è introdotto il riferimento al tempo per la definizione delle P_f^* prescrivendo quanto segue:

Ultimate Limit State (ULS)

P_f^* =10^{-6} per un anno di vita;

P_f^* =10^{-4} per il tempo di vita T_S;

Serviceability Limit State (SLS)

P_f^* =10^{-3} per un anno di vita;

P_f^* =1,5. 10^{-1} per il tempo di vita T_S.

Comunque, indipendentemente dal metodo di verifica della sicurezza, nella fase di verifica di un componente o di un sistema strutturale, in relazione ad un determinato SL, è necessario predisporre:

- una valutazione, a monte della analisi di tutte le quantità la cui natura intrinseca non è probabilistica, come ad esempio l'intervento di errori umani di calcolo o di esecuzione, che possono modificare di diversi ordini di grandezza la probabilità di crisi;

---

[1] Cioè, che si abbia sempre lo stesso valore medio η_R, la stessa deviazione standard σ_R, ossia la stessa "forma" statistica.

- un modello strutturale, cioè una serie di relazioni analitiche fra le azioni applicate (forze, distorsioni, cedimenti, ecc.) e gli effetti prodotti (spostamenti, sollecitazioni, ecc.) e, parallelamente, le caratteristiche meccaniche dei materiali ed i meccanismi resistenti;[2]
- la statistica delle variabili in gioco e i modelli probabilistici con riferimento ai dati raccolti sulle azioni e a quelli raccolti sui materiali.[3]

Chiaramente, la elaborazione statistica dei dati raccolti sulle azioni e sui materiali, fornisce le informazioni indispensabili per la scelta dei modelli probabilistici a "priori" utilizzati nel progetto.

Generalmente, però, il numero di dati a disposizione è minore di quello necessario ad una corretta trattazione statistica. Infatti, per la determinazione della probabilità di crisi sono necessari frattili molto piccoli la cui valutazione è soggetta a grandi incertezze, in quanto richiede un numero elevatissimo di risultanze sperimentali (almeno 1000 per stimare frattili dell'ordine di 0.001) [09].

Per queste ragioni, il problema della valutazione della probabilità di crisi su una struttura mostra spesso una "valenza" convenzionale. Inoltre, tale carattere convenzionale è rafforzato, oltre che dal fatto che l'effettiva caratterizzazione statistica delle variabili in gioco non è mai nota al momento del progetto, soprattutto per l'incertezza del modello assunto per la schematizzazione della struttura e dei vincoli.

Tuttavia, il patrimonio di esperienza accumulato sul costruito consente di affermare che la progettazione di nuove costruzioni, basata sul rispetto dei procedimenti previsti dalle norme, consente di realizzare costruzioni che nella quasi totalità dei casi offrono una adeguata sicurezza strutturale.

Chiaramente, nel caso della misura della sicurezza di strutture esistenti, i principi e le regole adottati per la progettazione delle nuove costruzioni si prestano ad adattamenti in relazione alle peculiarità che caratterizzano le strutture esistenti.

Infatti, per queste strutture si possono individuare i seguenti aspetti:

- possibilità di valutazione di tutte le quantità la cui natura non è probabilistica, come ad esempio il possibile accadimento di errori umani di calcolo o di esecuzione;
- possibilità di valutazione della corrispondenza del modello strutturale, cioè del complesso di relazioni fra le azioni applicate (forze, distorsioni, cedimenti, ecc.) e gli effetti prodotti (spostamenti, sollecitazioni, ecc.);
- possibilità dell'elaborazione statistica dei dati raccolti sulle azioni e sui materiali, per la scelta di modelli probabilistici da utilizzare nelle verifiche.

Appare quindi evidente che, qualora si disponga dei dati geometrici, meccanici e di "servizio" (caratteristiche dimensionali della struttura, tipi di vincolo, caratteristiche dei materiali, nonché tipo e caratteristiche delle azioni applicate), è possibile procedere in modo assai più razionale alla misura della sicurezza di quanto non si faccia per le costruzioni ex novo.

Peraltro, in fase operativa, come si appurerà nel seguito, col metodo semi-probabilistico agli stati limite a livello 1 risulta possibile gestire in modo semplice e razionale le suddette peculiarità delle costruzioni esistenti.

Infatti, con la suddivisione del coefficiente di sicurezza globale γ in più coefficienti parziali (γ_m per i materiali e γ_f per le azioni) risulta possibile riconoscere se, a seconda dei casi, si ha diritto ad un "premio", oppure invece se v'è da patire una "punizione": questa riduzione o quest'aumento della sicurezza può essere richiesto in relazione, ad esempio, alla situazione strutturale preesistente che può mostrare un'intrinseca bontà dei materiali costituenti, talvolta anche con assenze di difetti locali originari, oppure invece rilevarsi molto scadente e cosparsa di deficienze esaltate dal degrado.

È noto, infatti, che una parte dei coefficienti γ_m applicati ai materiali vuole tenere conto delle incertezze e delle aleatorietà riguardanti i materiali in opera ed i risultati costruttivi che si avranno nella fase di esecuzione [06] [07] [08], sono invece ben ricavabili per una struttura esistente di cui si vuole valutare la vulnerabilità o che si vuole consolidare. In tal caso, come sopra si è detto, i γ_m vanno adattati. Così anche, si può pensare a ridurre, o invece più spesso ad aumentare la parte dei coefficienti γ_f relativi alle azioni applicate.

Per chiarire più compiutamente questi concetti, è sufficiente considerare che *lato resistenze,* per i materiali della struttura esistente, le resistenze f_{mk} possono essere determinate con riferimento a quanto v'è in opera, ad esempio su provini estratti, cosicché non possono sussistere dubbi riguardo a possibili differenze di resistenza fra provini compattati e maturati in condizioni standard e le resistenze in opera, come può accadere per una struttura da costruire ex novo. Sempre per la struttura esistente, la presenza di difetti, imperfezioni, etc., può essere osservata su una realtà

[2] Usualmente, queste relazioni vengono assunte di tipo deterministico in quanto si basano sulla meccanica classica delle strutture e dei materiali.

[3] Generalmente tali modelli non sono patrimonio dei singoli progettisti e quindi occorre siano forniti dagli enti normatori.

controllabile, anziché essere semplicemente presunta, come accade per una struttura ex novo, con il risultato di poter assegnare valori più corretti alle parti dei coefficienti γ_m che coprono tali aleatorietà ed incertezze.

Così pure, *lato sollecitazioni*, è sufficiente considerare che nei confronti delle azioni ritenute trascurabili (e come tali trascurate), cui come principio deve conseguire una fittizia maggiorazione dei valori A_k delle azioni staticamente studiate, il controllo della realtà esistente può dare precise informazioni sulla possibilità o meno di trascurare tali azioni, così come, dall'esame di quanto è avvenuto nel passato si possono trarre informazioni sicure sull'effettiva possibilità di avere in futuro carichi più alti di quelli Q_k introdotti nei calcoli. Inoltre, nella determinazione delle sollecitazioni, le incertezze e le aleatorietà geometriche, di vincolo e di schema sono per la gran parte superate dal momento che quasi tutte le grandezze base sono controllabili con buona attendibilità sulla realtà esistente, così come si può riconoscere che la stessa analisi strutturale non è più inficiata da aleatorietà ed incertezze: si pensi, ad esempio, alla possibilità di osservare con buona sicurezza attraverso prove dinamiche il comportamento di organismi articolati e complessi.

In sostanza, con il metodo di livello 1 la suddivisione coefficiente di sicurezza nei coefficienti parziali γ_m e γ_f, e il riconoscimento che essi sono dovuti a più cause di aleatorietà ed incertezza, molte delle quali controllabili, consente di "dosare" meglio premi e punizioni per le diverse operazioni attraverso le quali si valuta la sicurezza e si progetta il consolidamento strutturale.

Evidentemente, però, è indispensabile una giustificazione teorico-sperimentale degli adattamenti dei valori dei coefficienti di sicurezza previsti per le misure di sicurezza delle strutture ex novo.

Obiettivo del presente lavoro è proprio la predisposizione di una metodologia che consenta un adattamento di tali valori standard al caso di strutture esistenti.

A tal proposito, risulta indispensabile una sistemazione più completa e razionale dei risultati delle sperimentazioni e dei rilevamenti svolti sulla struttura esistente, soprattutto perché spesso tali prove si riducono ad un semplice giudizio di tipo linguistico espresso a caratterizzare aspetti particolari della struttura, quali il degrado, la qualità della manifattura, ecc. Evidentemente, tali espressioni di giudizio trovano nei fuzzy sets (FS), in accordo con l'originale concezione dei Fuzzy Sets (FS) di Zadeh del 1965 [10], un adeguato modello matematico.

Si propone, così, una nuova metodologia, che, sulla scorta di valutazioni di tipo linguistico (presunte nel Design, acquisibili nel Re-Design), sul livello di qualità della compattazione, sul livello di qualità curing, sul livello di qualità del mix-design e sul livello di qualità della manifattura, nonché sul livello di degrado, consenta una più corretta calibrazione del fattore di sicurezza γ_c.

In particolare, viene formulata una metodologia per la valutazione della sicurezza di costruzioni esistenti in c.a., che consideri, mediante la fuzzy sets theory (FST) ([11], [12], [13]), nelle classiche misure di livello I, tutte quelle informazioni di natura linguistica che possono essere acquisite sulla costruzione esistente.

2. PROCEDURE CLASSICHE DI CALIBRAZIONE DEI COEFFICIENTI PARZIALI

Come è noto, le proprietà meccaniche dei materiali (per esempio, la resistenza a compressione o a trazione) sono rappresentate mediante valori caratteristici che corrispondono a specifici frattili della funzione di distribuzione statistica, supposta nota, relativa alla proprietà meccanica in questione.

Tale valore caratteristico f_k viene definito come il valore avente una probabilità pari al 5% di essere minorato. Il valore di calcolo è conseguentemente definito come f_k/γ_m, dove γ_m è il fattore parziale per il materiale considerato. In particolare, per il calcestruzzo e l'acciaio i valori di calcolo delle resistenze assumono le note espressioni:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \text{e} \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}. \qquad (1.a, 1.b)$$

In tabella 1, sono riportati i valori numerici di tali coefficienti γ_c e γ_s proposti per le verifiche agli stati limite ultimi (SLU), definite in relazione alle situazioni di progetto nella sezione 2.3 di ENV 1991-1 [04]. In particolare, nella tabella 1 le azioni di progetto persistenti sono riferite alle condizioni di uso normale; le situazioni transitorie, si riferiscono a condizioni anormali che possono verificarsi, per esempio, durante la costruzione o il ripristino; le situazioni eccezionali sono riferite appunto a condizioni eccezionali applicate alla struttura o di esposizione, come ad esempio il fuoco, l'esplosione, etc..

Invece, per le verifiche agli stati limite di servizio (SLS) si usano in genere coefficienti γ_c=γ_s=1.

SITUAZIONI DI PROGETTO	γ_c	γ_s
Persistenti e transitorie	1.50	1.15
eccezionali (eccetto sisma)	1.30	1.00

Tabella 1. *Coefficienti parziali per lo SLU (ENV 1991-1)*

Nel caso del calcestruzzo, l'origine del coefficiente γ_c risiede nella necessità di coprire le aleatorietà e le incertezze che risiedono, sia nel modello probabilistico, sia nel fatto che si fa riferimento ad una resistenza determinata su provini stagionati in condizioni standard, oltre che dalla necessità di doversi garantire nei riguardi dall'eventualità che si verifichino valori di resistenza anormalmente minori di quelli rilevati. In tale ottica, così come delineato nel Bollettino CEB n° 128 [07], tale coefficiente può essere considerato come prodotto di tre fattori in accordo con la seguente espressione:

$$\gamma_c = \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3}, \qquad (2)$$

dove il significato di questi fattori è il seguente:

1) il fattore γ_{c3} copre le incertezze che non possono essere considerate in una trattazione puramente probabilistica; con tale fattore, quindi, si vogliono considerare le incertezze del modello di calcolo che definisce la resistenza e le imprecisioni dell'esecuzione della struttura, connesse, in particolare modo, al posizionamento dell'armatura metallica; per fare ciò viene adottato il valore γ_{c3}=1.10;

2) il fattore γ_{c2} prende in considerazione il rapporto tra la resistenza determinata su provini stagionati in condizioni standard e la resistenza in situ; in Taerwe (1996) [08] viene evidenziato che questa differenza è dovuta principalmente alla diversa stagionatura cui sono stati sottoposti il materiale utilizzato per i provini e quello della struttura; inoltre, la compattazione eseguita sul materiale utilizzato per i provini è generalmente migliore di quella che si realizza nella struttura; peraltro, un'ulteriore sistematica differenza può sussistere fra le parti superiori e le parti inferiori dei getti delle membrature; comunque, posto M il fattore di transizione tra la resistenza effettiva $f_{c,eff}$ e la resistenza dei provini $f_{c,contr}$, si può proporre la correlazione:

$$f_{c,contr} = M \cdot f_{c,eff} = \frac{1}{\eta} \cdot f_{c,eff}\ ; \qquad (3)$$

il valore medio di M viene usualmente assunto pari a 1.10; inoltre, i risultati sperimentali portano a stimare che il coefficiente di variazione di M sia pari a circa il 10%;

3) il fattore γ_{c1} prende in considerazione il fatto che valori minori della resistenza caratteristica f_{ck} possono comunque presentarsi; ancora sul Bollettino CEB n° 128 [07], si propone che il rapporto f_{ck}/γ_{c1} corrisponda al frattile 0.5% della distribuzione teorica della resistenza; in tal caso, assumendo una distribuzione gaussiana, γ_{c1} assume l'espressione:

$$\gamma_{c1} = \frac{1 - 1.645 \cdot \delta_c}{1 - 2.576 \cdot \delta_c}, \qquad (4)$$

essendo δ_c il coefficiente di variazione; considerando una distribuzione lognormale, si avrebbe:

$$\gamma_{c1} = \frac{\mu_c \cdot \exp(-1.645 \cdot \delta_c)}{\mu_c \cdot \exp(-2.576 \cdot \delta_c)}. \qquad (5)$$

Qualora, ad esempio, si ipotizzi una funzione densità di distribuzione normale ed un coefficiente δ_c pari al 15%, si ottiene γ_{c1}=1.23.

In modo del tutto analogo, per il coefficiente γ_s, sempre con riferimento a quanto riportato da Taerwe [08], si può assumere l'espressione:

$$\gamma_s = \gamma_{s1} \cdot \gamma_{s2} \cdot \gamma_{s3}. \qquad (6)$$

Si propone di stimare tutti i fattori pari a 1.05, il che conduce al valore γ_s=1.15.

Infatti il valore di γ_{s1} viene valutato, sempre attraverso la (4), assumendo un coefficiente di variazione δ_s = 5%, cui consegue appunto γ_{s1} = 0,05.

Il valore di γ_{s2}, che deve coprire la differenza fra la resistenza in situ e la resistenza determinata su provini, mette in conto i seguenti aspetti:

1) la reale distribuzione del limite d'elasticità, che non è normale, ed il fatto che nella realtà il rapporto f_{yk}/γ_s conduce ad un frattile probabilmente di ordine superiore allo 0.5%;
2) il danneggiamento delle barre in situ e la possibile corrosione;
3) la preoccupazione di compensare altri piccoli incertezze non statisticamente studiati.
4) Il fattore γ_{s3}, analogamente al γ_{c3}, copre le incertezze che non possono essere considerate in una trattazione puramente probabilistica.

Più recentemente, il Model Code '90 [14] ha introdotto un nuovo principio riguardante la qualità della produzione del calcestruzzo e dell'acciaio ed i relativi effetti sui coefficienti di sicurezza. Infatti, quando la produzione è industrializzata e continuamente controllata ed è assicurata una completa qualità mediante certificazione di enti indipendenti (fatto, questo, che implica il sistematico rigetto in caso di inadeguatezza), i fattori parziali γ_c e γ_s possono essere scelti tra 1.5 ed 1.4 e tra 1.15 e 1.10 rispettivamente, in dipendenza della riduzione (anche superiore al 50%) delle usuali tolleranze.

Sotto le stesse condizioni, nel caso di una produzione continua di elementi identici e di una valutazione statistica delle possibili prestazioni dell'intera produzione, può essere fatta un'altra riduzione di γ_c, dividendolo per 1.10 se il valore medio del rapporto η tra la resistenza in situ della struttura e la resistenza dei provini standard è maggiore di 0.9.

Tali principi sono stati ripresi ed ampliati nella ENV 1992-1-3, nella quale è specificato che:

1) i coefficienti di sicurezza base per il calcestruzzo e per l'acciaio sono rispettivamente γ_c=1.5 e γ_s=1.15;
2) si possono utilizzare i valori γ_c=1.4 e γ_s=1.10 quando:

- sia operante uno stretto regime di controllo di qualità delle condizioni di produzione con monitoraggio delle geometrie della struttura, della localizzazione delle barre e delle proprietà dei materiali inclusi nel calcestruzzo e degli acciai dolci ed armonici;
- gli elementi che non soddisfino i requisiti di qualità prefissati, sulla base del metodo di controllo adottato siano scartati,
- la qualità sia assicurata dal sistema di supervisione e certificazione,
- sia raggiunto il 50% delle tolleranza definite in ENV 1992-1-1.

3) Si possono utilizzare i valori γ_c=1.3 e γ_s=1.05 quando:

- una valutazione statistica delle prestazioni sia fatta con continuità sull'intera produzione di elementi identici,
- il progetto sia basato sul valore attuale (cioè rilevato in situ) delle tolleranze,
- il valore medio del rapporto η fra la resistenza in situ e la resistenza di provini standard sia maggiore di 0.9.

Una impostazione ancora più articolata si ritrova nelle normative nordiche NKB (1987) [15], dove il numero di fattori considerati si amplia con l'introduzione dei coefficienti γ_{c4}, γ_{c5}, γ_{c6}.

In particolare, il fattore γ_{c4} considera una opportuna riduzione (o aumento) del coefficiente di sicurezza in relazione alle modalità di collasso dell'elemento considerato, in accordo a quanto proposto nella tabella 2. Infatti, le riserve di capacità sono correlate ad effetti favorevoli che, usualmente, non vengono esplicitamente tenuti in conto in fase di progettazione come, ad esempio, gli effetti di irrigidimento delle barre d'acciaio e gli incrementi della capacità di deformazione o della capacità di sopportare carichi delle strutture staticamente indeterminate dovuti alla ridistribuzione dei momenti. Il fattore γ_{c5} è legato al livello di ispezione e di controllo di qualità, come mostrato nella tabella 3. Il fattore γ_{c6}, invece, è funzione delle conseguenze del collasso dell'elemento, come indicato in tabella 4.

In tale contesto appare chiaro che nella definizione del coefficiente γ_c intervengono fattori le cui caratteristiche sono proprie di una variabile di natura linguistica.

Nello specifico, appare senz'altro più adeguato considerare un modello fuzzy per i coefficienti γ_{c4}, γ_{c5} e γ_{c6} introdotti in NKB (1987), ma anche i coefficienti γ_{c2} e γ_{c3}, qualora, la stima viene fatta con riferimento a valutazioni di tipo linguistico in merito alle effettive condizioni di compattazione e curing o, più in generale, alla qualità della manifattura e del calcestruzzo in opera.

Tipo di collasso	Duttile con riserva di capacità	Duttile senza riserva di capacità	Fragile
γ_{c4}	0.9	1.0	1.1

***Tabella 2**. Valori di γ_{c4} NKB (1987)*

Livello di ispezione e controllo	Intenso	Normale	Moderato
γ_{c5}	0.95	1.0	1.1

***Tabella 3.** Valori di γ_{c5} NKB (1987)*

Classe di sicurezza	Bassa	Normale	Elevata
γ_{c6}	0.9	1.0	1.1

***Tabella 4.** Valori di γ_{c6} NKB (1987)*

3. DESCRIZIONE DEL METODO PROPOSTO PER LA CALIBRAZIONE DEL COEFFICIENTE γ_c

3.1. ASPETTI GENERALI

In [21], viene evidenziato come allo stato attuale si hanno numerosi lavori [16-20] nei quali vengono proposte procedure basate sulla FST per tenere conto delle informazioni di natura linguistica.

Alla luce di queste procedure e di quanto sviluppato in [21], si propone così un metodo che consente di definire il valore di γ_c, recependo le informazioni di tipo linguistico quali: la qualità della manifattura, la corrispondenza della costruzione agli schemi di calcolo, la capacità dei materiali nel garantire le prestazioni in presenza di degrado, ecc..

Più in specifico, si possono ad esempio considerare i seguenti parametri qualitativi:

P1=compattazione del calcestruzzo;
P2=curing del calcestruzzo;
P3=omogeneità del calcestruzzo;
P4=conformità con le specifiche di progetto;
P5=conformità con le specifiche di norma;
P6=tipo di collasso;
P7=livello di controllo;
P8=capacità di garantire le prestazioni in presenza di degrado.

Per brevità, nella descrizione del metodo si considerano solo tre parametri qualitativi. Il primo, P1, che congloba i primi quattro parametri sopra indicati, può ritenersi come un parametro in grado di tradurre la qualità della manifattura. Il secondo, P2, che esprime la qualità della progettazione. Il terzo, P3, che esprime la capacità dei materiali nel garantire le prestazioni in presenza di degrado. Questo, però, non rappresenta un limite per la procedura nel caso si dovesse considerare un numero maggiore di parametri.

Il metodo ipotizza che per un manufatto strutturale in c.a. progettato ed eseguito in modo ottimale e in assenza di degrado, il coefficiente γ_c assuma (rispettando la (1)) un valore numerico prossimo alla parte γ_{c1} ($\cong$1,25), mentre, nel caso in cui il progetto e l'esecuzione siano di tipo medio con un degrado tale da non pregiudicare le prestazioni, tale coefficiente γ_c assume (rispettando la (1)) un valore numerico prossimo al prodotto $\gamma_{c1}\cdot\gamma_{c3}$ ($\cong$1,4).[4] Infine, laddove il progetto e l'esecuzione siano carenti e difettosi ed i materiali diano scarsa garanzia delle prestazioni in presenza di degrado, si ipotizza che il coefficiente γ_c assuma (sempre per la (1)) un valore numerico intorno a 1,7÷1,8.

3.2. DESCRIZIONE DEI MODELLI FUZZY DELLE VARIABILI LINGUISTICHE

Per la definizione dei modelli fuzzy, utilizzati per i giudizi e i pesi sulla sicurezza relativi a ciascun parametro di qualità P_i, occorre innanzitutto definire l'insieme classico (crisp) di variabili linguistiche (v.l.) del giudizio. Tale insieme può essere composto ad esempio dai seguenti giudizi di qualità G_j: {Scarsa o Small (S); Media o Medium (M); Elevata o Large (L)}.

Naturalmente, in analogia a quanto visto in [21], occorre considerare anche la diversa importanza (peso o conseguenza) sulla sicurezza, e quindi sulla riduzione o meno del valore del coefficiente γ_c, non solo dei differenti parametri, ma anche dei differenti livelli di giudizio (ad esempio, S, M, L).

Pertanto, risulta indispensabile disporre di un insieme di v.l. W_{ijk} (il pedice "i" individua il parametro di qualità, il pedice "j" individua il giudizio di qualità espresso per il generico parametro, il pedice "k" individua il peso sul coefficiente γ_c) che, appunto, possono essere ancora le v.l. Large, Medium e Small.

Tali v.l., vengono associate alle funzioni di appartenenza (membership o variabile fuzzy (v.f.)) $\mu_{G_{ij}}$ e $\mu_{W_{ijk}}$, opportunamente predefinite (sulla scorta dell'esperienza e di pareri ingegneristici).

Per quanto riguarda i modelli delle funzioni di appartenenza o variabili fuzzy (v.f.) da associare alle variabili linguistiche G_{ij} e W_{ijk}, scelte per ogni parametro di qualità, sono v.f. definiti nell'intervallo [0, 1]. Evidentemente, l'insieme dei valori dell'intervallo [0, 1] e dei corrispondenti gradi di appartenenza (membership), costituisce un insieme fuzzy (FS).

In Tabella 5 sono riportate, ad esempio, gli insiemi fuzzy assunti per L, M e S, nelle simulazioni numeriche svolte in questa sede.

Large	{0|0; 0.1|0.01; 0.2|0.04; 0.3|0.09; 0.4|0.16; 0.5|0.25; 0.6|0.36; 0.7|0.49; 0.8|0.64; 0.9|0.81; 1|1}
Medium	{0|0; 0.1|0; 0.2|0; 0.3|0.33; 0.4|0.67; 0.5|1; 0.6|0.67; 0.7|0.33; 0.8|0; 0.9|0; 1|0}
Small	{0|1; 0.1|0.81; 0.2|0.64; 0.3|0.49; 0.4|0.36; 0.5|0.25; 0.6|0.16; 0.7|0.09; 0.8|0.04; 0.9|0.01; 1|1}

***Tabella 5**. Libreria dei FS per i giudizi e i pesi*

3.3 DESCRIZIONE DEL MODELLO FUZZY DI ELABORAZIONE

Per il modello di elaborazione, in analogia ad [21], si ritiene adeguato procedere mediante intersezione degli insiemi fuzzy, in luogo del prodotto cartesiano. Così facendo, la fuzzy relation (FR) $\tilde{R} = \tilde{R}(\tilde{G}x\tilde{W})$ [5] di combinazione del giudizio di qualità con il peso sulla sicurezza, è un FS monodimensionale dato da:

$$\tilde{C}_{Pi} = \tilde{G}_{ij} \cap \tilde{W}_{ijk}\,. \qquad (7)$$

A questo punto, nel metodo si ipotizza che per un manufatto strutturale in c.a., progettato ed eseguito in modo ottimale, il coefficiente $\tilde{\gamma}_c$ di sicurezza assuma un valore esprimibile mediante la variabile linguistica del tipo Small ($\tilde{\gamma}_c$ S); mentre, nel caso in cui il progetto e l'esecuzione siano di tipo medio, tale coefficiente $\tilde{\gamma}_c$ assume un valore esprimibile mediante la variabile linguistica di tipo Medium ($\tilde{\gamma}_c$ M). Infine, laddove il progetto e l'esecuzione siano carenti e difettosi, si ipotizza che tale coefficiente $\tilde{\gamma}_c$ assuma un valore esprimibile mediante la variabile linguistica di tipo Large ($\tilde{\gamma}_c$ L).

In tal caso, posto γ_c=1,7, per la v.f. del coefficiente $\tilde{\gamma}_c$ si possono assumere i corrispondenti livelli riportati in tabella 6.

Calcolato mediante la (7) l'effetto combinato $\tilde{C}_{Pi}$ del giudizio con il peso, relativo ai singoli parametri, si valuta se questo effetto sia in grado di alterare il coefficiente di sicurezza $\tilde{\gamma}_c$ L (struttura progettata ed eseguita con standard qualitativi carenti).

---

[4] Evidentemente, in entrambe le due precedenti ipotesi, non si considera la parte γ_{c2} in quanto la resistenza del calcestruzzo viene determinata su provini direttamente prelevati dalla struttura esistente.

[5] Le grandezze fuzzy vengono soprassegnate con una tilde (~).

LIVELLI $\tilde{\gamma}_c$	LIBRERIA FS (γ_c=1,7)
$\tilde{\gamma}_c$ L	{(γ_c)|1; (γ_c-0,2)|0.6; (γ_c-0,30)|0.30; (γ_c-0,45)|0.15; (γ_c-0,5)|0.07; (γ_c-0,55)|0}
$\tilde{\gamma}_c$ M	{(γ_c)|0; (γ_c-0,2)0.5|; (γ_c-0,30)|1; (γ_c-0,45)|0,13; (γ_c-0,45)|0; (γ_c-0,5)|0}
$\tilde{\gamma}_c$ S	{(γ_c)|0; (γ_c-0,2)|0; (γ_c-0,30)|0,15; (γ_c-0,45)|0.5; (γ_c-0,5)|1; (γ_c-0,55)|0.5; (γ_c-0,6|0}

***Tabella 6**. Libreria dei FS per i livelli di* $\tilde{\gamma}_c$

Allo scopo, occorre stabilire una FR fra il giudizio fuzzy $\tilde{G}$ di qualità di un parametro e il coefficiente $\tilde{\gamma}_c$. Per questo si adotta una fuzzy composition (FC) del tipo:

$$\tilde{R}(\tilde{G}x\tilde{\gamma}_c) = \tilde{R}(\tilde{G}x\tilde{W}) \circ \tilde{R}(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c)\,, \qquad (9)$$

dove, la fuzzy relation $\tilde{R} = \tilde{R}(\tilde{G}x\tilde{W})$ è espressa dalla (7), mentre, per stabilire la fuzzy relation $\tilde{R} = \tilde{R}(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c)$, occorre sviluppare il seguente ragionamento: per una determinato parametro di qualità, il coefficiente γ_c è grande se il peso sulla riduzione del coefficiente di sicurezza è piccolo e così via. Si hanno, allora, le seguenti regole di inferenza:

$$\begin{aligned} &\tilde{\gamma}_c \text{ is Large if } \tilde{W}_{ijk} \text{ is Small;} \\ &\tilde{\gamma}_c \text{ is Medium if } \tilde{W}_{ijk} \text{ is Medium;} \qquad (10) \\ &\tilde{\gamma}_c \text{ is Small if } \tilde{W}_{ijk} \text{ is Large.} \end{aligned}$$

In tal caso, la fuzzy relation $\tilde{R} = \tilde{R}(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c)$, qualora si faccia riferimento alle espressioni L, M ed S, assunte per i livelli di $\tilde{\gamma}_c$ e si utilizzino le (10), può scriversi come segue:

$$\begin{aligned} &\tilde{R}(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c) = \tilde{R}_1(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c) \cup \\ &\tilde{R}_2(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c) \cup \tilde{R}_3(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c) \end{aligned}, \qquad (11a)$$

dove,

$$\begin{aligned} &\tilde{R}_1(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c) = \tilde{W}Lx\tilde{\gamma}_c S \\ &\tilde{R}_2(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c) = \tilde{W}Mx\tilde{\gamma}_c M \qquad (11b) \\ &\tilde{R}_3(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c) = \tilde{W}Sx\tilde{\gamma}_c L\,. \end{aligned}$$

In particolare per lo sviluppo delle (11), per semplicità operativa, si è adottata per i livelli di $\tilde{\gamma}_c$ la libreria di tabella 7. Il risultato è espresso dal FS di tabella 8.

LIVELLI $\tilde{\gamma}_c$	LIBRERIA FS (γ_c=1,7)			
	(γ_c)	(γ_c-0,2)	(γ_c-0,3)	(γ_c-0,45)
$\tilde{\gamma}_c$ L	1	0,5	0,25	0
$\tilde{\gamma}_c$ M	0	1	1	0
$\tilde{\gamma}_c$ S	0	0,25	0,5	1

***Tabella 7.** Libreria FS utilizzata per i livelli di γ_c nello sviluppo della FR (11)*

Naturalmente, tale FS di tabella 8 costituisce una FR fra il peso e il coefficiente γ_c. Ad esempio, si può osservare che i valori di membership maggiori per i valori del coefficiente γ_c maggiori, risultano corrispondere, correttamente, ai valori bassi del peso sul coefficiente di sicurezza.

Tale circostanza traduce l'esigenza che per un parametro di qualità, ogni qualvolta si supponga un peso basso, quest'ultimo non risulti significativo nell'alterare (riduzione) il coefficiente γ_c.

Peso W	COEFFICIENTE γ_c			
	(γ_c)	(γ_c-0,2)	(γ_c-0,3)	(γ_c-0,45)
0	1	0,5	0,25	0
0.1	0,9	0,5	0,25	0
0.2	0,5	0,5	0,25	0
0.3	0,2	0,2	0,2	0
0.4	0,1	0,6	0,6	0
0.5	0	1	1	0
0.6	0	0,6	0,6	0,1
0.7	0	0,2	0,2	0,2
0.8	0	0,25	0,5	0,5
0.9	0	0,25	0,5	0,9
1	0	0,25	0,5	1

***Tabella 8.** Calcolo delle condizioni di inferenza (8)*

A questo punto, si dispone di quanto serve per ottenere la fuzzy relation $\tilde{R}(\tilde{G}x\tilde{\gamma}_c)$ mediante la (9). Il risultato della FC è un FS monodimensionale (ad esempio, del tipo riportato in tabella 11) e costituisce già di per sé l'aggiornamento del coefficiente di sicurezza $\tilde{\gamma}_c$ e indicato nel seguito con $\tilde{\gamma}_{ca}$.

Per la valutazione fuzzy dell'alterazione che può avere il coefficiente $\tilde{\gamma}_c$, laddove per esso sia assunta l'espressione linguistica Large di tabella 6, si adotta una FR che combini, appunto, il coefficiente di sicurezza aggiornato $\tilde{\gamma}_{ca}$ con la v.f. $\tilde{\gamma}_c$L, ottenendo un nuovo coefficiente fuzzy $\tilde{\gamma}_{ca,B}$ (il pedice B indica che in tale operazione si è seguita la proposta di Blockley [16]).

Per la quantificazione numerica di tale alterazione occorre valutare il nuovo coefficiente γ_c, defuzzificando il coefficiente fuzzy $\tilde{\gamma}_{ca,B}$ [6]. Nel caso specifico, si assume, a favore della sicurezza, come coefficiente γ_c il più grande dei γ_c con membership massima.

Infine, per combinare la contemporanea presenza di più parametri di qualità, fra tutti i valori di γ_c ottenuti, ciascuno relativo ad un parametro, si

---

[6] Defuzzificare vuol dire stabilire un criterio per la scelta del valore numerico della grandezza fuzzy da assumere in relazione al grado di appartenenza dei singoli valori.

assume, a favore della sicurezza, il valore maggiore.

3.4. APPLICAZIONE NUMERICA DEL METODO DI CALIBRAZIONE DI γ_C

Nel prosieguo, con riferimento ai parametri definiti nel paragrafo precedente, viene presentato un esempio numerico[7] di esemplificazione del metodo proposto per la calibrazione di γ_c.

Per i parametri P_i considerati per un manufatto esistente, in tabella 9 sono definite le variabili linguistiche, assunte per i giudizi e i rispettivi pesi sul coefficiente di sicurezza. Si ricorda che i giudizi sono espressi in fase di rilievo, mentre i pesi sono stabiliti da esperti in sede preventiva.

Parametri qualitativi (Pi)	Giudizio (Gij)	Pesi (Wijk)
P1	Large	Large
P2	Large	Large
P3	Large	Medium

***Tabella 9**. Definizione della variabile linguistica assunta per il giudizio e per il peso.*

Ad esempio, lo sviluppo del metodo, con riferimento al giudizio di qualità Large e al peso sulla riduzione del coefficiente γ_c, Large, espressi per l'indicatore di degrado P1, fornisce il FS monodimensionale indicato in tabella 10. Evidentemente già questo insieme fornisce già un'indicazione di quanto possano incidere sul coefficiente γ_c il giudizio e il peso assunti per il parametro di qualità considerato.

	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$G \cap W$	0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81	1

***Tabella 10.** Vettore dell'intersezione (giudizio, peso) per il parametro di qualità P1.*

A questo punto vengono sviluppate le condizioni di inferenza (11) che, in forma esplicita, forniscono il FS bidimensionale della tabella 6.

Adottando poi la fuzzy composizione (9): $\tilde{R}(\tilde{G}x\tilde{\gamma}_c) = \tilde{R}(\tilde{G}x\tilde{W}) \circ \tilde{R}(\tilde{W}x\tilde{\gamma}_c)$,

si ottiene il vettore di tabella 11.

$\tilde{\gamma}_{ca}$	(γ_c=1,7)	(γ_c=1,50)	(γ_c=1,40)	(γ_c=1,25)
membership	0,1	0,36	0,5	1

***Tabella 11.** Vettore Composizione (9).*

In tal caso, il FS monodimensionale di tabella 11 costituisce l'aggiornamento $\tilde{\gamma}_{ca}$, ed assume la seguente espressione:

$\tilde{\gamma}_{ca}$ ={((γ_c)|0.1; ((γ_c-0.20)|0.36; ((γ_c-0.30)|0.5; ((γ_c-0.45)|1}.

In analogia a quanto proposto da Blockley (1975), combinando i suddetti $\tilde{\gamma}_{ca}$ con l'espressione $\tilde{\gamma}_c L$ di tabella 6 risulta:

$\tilde{\gamma}_{ca,B}$ ={1.7|0.1; 1.50|0.42; 1.4|0.746; 1.25|1; 1.2|0.81; 1.15|0.40; 1.1|0.19; 1|0.01}.

In ogni caso, la defuzzificazione avviene estraendo il valore massimo del coefficiente γ_c cui corrisponde la membership massima; nel caso specifico γ_c=1,25.

Allo scopo di evidenziare quanto possa incidere sulla misura di sicurezza la possibilità di calibrare il coefficiente γ_c, si suppone di considerare, per uno stesso manufatto, tre diverse situazioni di giudizio per i parametri P_1, P_2 e P_3. In particolare, queste tre situazioni possono ricondursi ai casi seguenti.

La prima situazione si riferisce ad un manufatto perfettamente progettato ed eseguito, che non denota degrado dei materiali. In tal caso, ai valori di v.l. Large (L), per i giudizi sui parametri di qualità, si è scelto di assegnare, per tutti e tre i parametri, ancora la v.l. Large (L) per il giudizio sul peso[8].

La seconda situazione si riferisce ad un manufatto progettato ed eseguito non proprio a perfetta regola d'arte e con degrado non significativo. In tal caso, ai valori di v.l. Medium (M), per i giudizi sui parametri di qualità, si è scelto di assegnare un peso Medium per il parametro P_1, mentre ai parametri P_2 e P_3 si è assegnato il peso Large. Questa circostanza vuole tradurre una maggiore importanza del parametro P_1 nei confronti della sicurezza e che, pertanto, a parità di giudizio deve condurre ad una minore riduzione del coefficiente γ_c.

La terza situazione si riferisce ad un manufatto, sebbene adeguatamente progettato, carente nell'esecuzione e in presenza di degrado che non pregiudica le prestazioni dei materiali. In tal caso, ai valori di v.l. Small, Large, e Medium, per i giudizi sui parametri di qualità, rispettivamente dei parametri P1, P2, e P3, si è scelto di assegnare un peso Small al parametro P1, mentre, ai parametri P_2 e P_3 si è assegnato il peso Large. Questa circostanza vuole tradurre una maggiore importanza del parametro P1 nei riguardi della sicurezza.

[7] Per le successive simulazioni numeriche, per i giudizi e i pesi vengono utilizzate le variabili fuzzy riportate in tabella 5.

[8] Questa circostanza traduce l'esigenza che ai parametri di qualità espressi con giudizio Large la funzione peso riduca in modo Large, il coefficiente γ_c.

A partire da tali valori linguistici espressi per i giudizi e i pesi, riportati in tabella 12, si sono valutati, col metodo proposto, i corrispondenti valori numerici di γ_c. Tali valori sono forniti (tabella 12) sia con riferimento ai singoli parametri, che all'insieme dei tre parametri considerati per le tre diverse situazioni. Dai valori ottenuti si può osservare come ai giudizi Large e Medium, per le prime due situazioni, corrispondano valori di γ_c rispettivamente di 1,25 e 1,50, mentre, nella terza situazione è stato sufficiente che il solo parametro P_1 risultasse con un giudizio di merito Small (carente esecuzione) e peso Small per ottenere un valore di γ_c pari a 1,7.

Parametri		(G_{ij})	(W_{ijk})	Coefficiente γ_c	
				$\tilde{\gamma}_{ca,B}$	Globale
1	P1	L	L	γ_c=1.25	γ_c=1.25
	P2	L	L	γ_c=1.25	
	P3	L	L	γ_c=1.25	
2	P1	M	M	γ_c=1.50	γ_c=1.50
	P2	M	L	γ_c=1.40	
	P3	M	L	γ_c=1.40	
3	P1	S	S	γ_c=1.70	γ_c=1.70
	P2	L	L	γ_c=1.25	
	P3	M	L	γ_c=1.40	

Tabella 12. *Coefficiente γ_c .*

A questo punto, si dispone di un metodo che consente di calibrare più correttamente il coefficiente γ_c, in considerazione di parametri di qualità che possono essere valutati con riferimento alla struttura esistente in esame.

Tale circostanza determina chiari riflessi sulle misure di sicurezza allo stato limite ultimo per tensioni normali.

3.5. APPLICAZIONE NUMERICA DEL METODO NELLE MISURE SLU PER TENSIONI NORMALI

Nel prosieguo, come esempio di applicazione del metodo ad un problema strutturale di Re-design si fa riferimento ad un elemento strutturale presso-inflesso con sezione quadrata 40x40cm (figura 1), armata con 4 barre FeB44k, di diametro 20 mm (A_s=6,28 cm^2, A'_s=6,28 cm^2). Per quanto riguarda la resistenza del calcestruzzo si suppone che le prove abbiano evidenziato una resistenza f_{ck} pari a 25 MPa.

Supponendo che per tale elemento strutturale si assumano le tre situazioni di espressioni verbali definiti in tabella 12, si valuta l'assestamento dei domini di interazione M-N costruiti con riferimento ai corrispondenti valori di γ_c. In Figura 2 sono evidenti gli importanti riflessi sui domini resistenti che gioca la possibilità di adattare valori di γ_c, in relazione ad informazioni di tipo linguistico che possono desumersi dalle costruzioni esistenti.

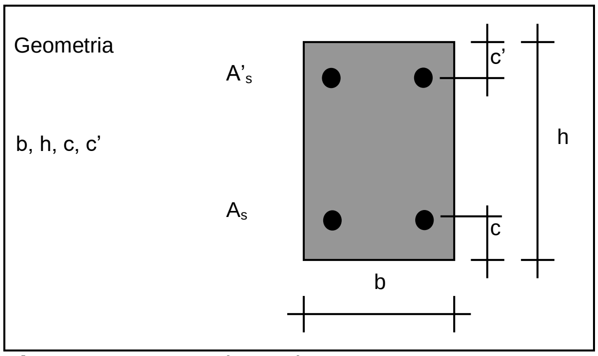


Figura 1. *Geometria sezione*

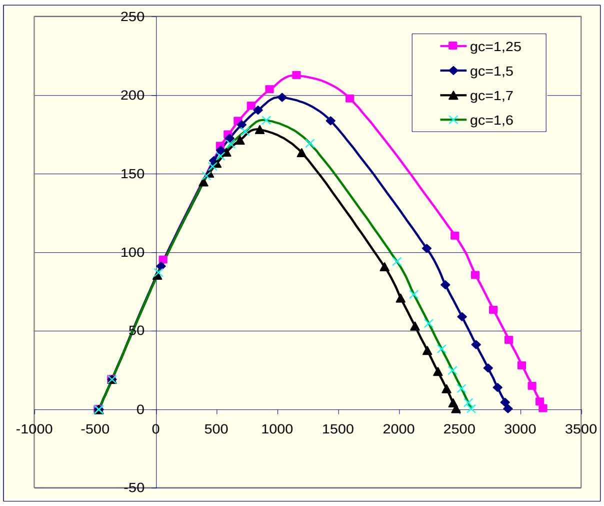


Figura 2. *Domini interazione M-N (momento in kN m, azione assiale in kN, gc=γ_c)*

4. CONCLUSIONI

La precedente applicazione numerica del metodo proposto per la calibrazione del coefficiente γ_c, evidenzia la possibilità, mediante la FST, di tenere conto delle informazioni di tipo linguistico che si possono ricavare dall'esame delle strutture esistenti.

Si possono formulare le seguenti osservazioni, significative, su tale metodo.

Possibilità di tenere conto di valutazioni di tipo linguistico relative a parametri qualitativi, del tipo:

- compattazione del calcestruzzo;
- curing del calcestruzzo;
- omogeneità del calcestruzzo;
- conformità con le specifiche di progetto;
- conformità con le specifiche di norma;
- tipo di collasso;
- livello di controllo;

- capacità di garantire le prestazioni in presenza di degrado.

In tal modo, la calibrazione risulta assai più razionale rispetto a quanto svolto dalle procedure usuali applicabili alle sole strutture da realizzare ex novo.

BIBLIOGRAFIA

[01] **F. CASCIATI (1996),** "Mathematical Modeling for Structural Reliability", CRC Press, Boca Raton,1996.

[02] **A.H.S. ANG - W.H. JANG (1975),** "Probability concepts in Engineering Planning and Design", John Wiley & Sons - New York, vol.1(1975) e vol.2 (1984).

[03] **CEB FIP**, Model Code for Concrete Structures - Bulletin n°. 124/ 25f - Paris,1978.

[04] **EUROCODICE 1:** "Basis of Design and Actions on Structures", CEN/TC250, 15 March 1993.

[05] **EUROCODE 2:** "Design of Concrete Structures" - CEN, Bruxelles,1991.

[06] **BOLLETTINO CEB n° 127:** "Manuel Sécurité des Structures", Deuxième édition, révisée et complémentée.

[07] **BOLLETTINO CEB n° 128:** "Manuel Sécurité des Structures", Deuxième édition, révisée et complémentée".

[08] **L. TAERWE (1996),** "Survey and Background of the Semiprobabilistic Design Method for Concrete Structures according to Eurocodes EC1 and EC2", Studi e Ricerche, n°17 - Italcementi S.p.A. Bergamo Editore,1996.

[09] **P. FERRARI e M. SAVOIA (1997),**" Stima della resistenza caratteristiche del calcestruzzo nell'ambito della teoria dei numeri sfuocati", Congresso AICAP 1997.

[10] **L. A. ZADEH (1955),** "Fuzzy sets", Information & Control, V. 8, 1965, pp. 383-353.

[11] **G. J. KLIR and BO YUAN (1995),** "Fuzzy Sets and Fuzzy Logic" Theory and Applications, Prentice Hall 1995.

[12] **H. J. ZIMMERMANN (1985),** "Fuzzy Set Theory - and Its Applications", Kluwer-Nijhoff Publishing, Boston 1985.

[13] **D. DUBOIS AND H. PRADE (1980),** "Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications", Academic Press, N.Y., 1980.

[14] **CEB FIP:** Model Code 1990: Bulletin n°. 204 - EPFL Presse, St. Saphorin, Suisse

[15] **NKB,** Guidelines for loading and safety regulations for structural design, NKB Report no. 55E, June 1987.

[16] **D.I. BLOCKLEY (1975),** "Predicting the likelihood of structural accidents", Proceedings of Institutions of Civil Engineering, Vol. N° 59, Dicembre 1975, pp. 659-668.

[17] **J. T. P. YAO (1980),** "Damage Assessment of Existing Structures", Journal of the engineering mechanics division, Agosto 1980, pp. 785-799 .

[18] **M. BROWN ET ALTRI (1979),** "Fuzzy Sets Measure", Journal of Structural Engineering, Ottobre 1979, pp. 855-872.

[19] **M. BROWN ET ALTRI (1983),** "Fuzzy Sets and Structural Engineering", Journal of Structural Engineering, Maggio 1983, pp. 1211-1225.

[20] **B. TEE, M. D BOWMAN and K. C. SINHA (1988),** "A fuzzy mathematical approach for bridge condition evaluation", Civil Engineering System, Marzo 1988, pp. 17-24.

[21] **M. ACITO (2000),** "Misura fuzzy della vulnerabilità di manufatti stradali e ferroviari in c.a. interessati da degrado", 13° Congresso CTE, Pisa, novembre 2000.

Ing. ACITO MAURIZIO, Specializzato in costruzioni in C.A. alla Scuola di Specializzazione "F.lli Pesenti" del Politecnico di Milano.
E-Mail mauacito@tin.it

Prof. ing. MIGLIACCI ANTONIO, Ordinario di Progetto di Strutture al Politecnico di Milano e Direttore della Scuola di Specializzazione in Costruzioni in C.A. "F.lli Pesenti" del Politecnico di Milano.

Ing. PONZONE ALESSANDRO, Specializzando in costruzioni in C.A. alla Scuola di Specializzazione "F.lli Pesenti" del Politecnico di Milano.