



DUTTILITÀ STRUTTURALE DI OPERE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Martina Greco^{*}, Marianna Zito^{*}

^{*} Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM)

Università degli Studi di Palermo

Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

e-mail: marianna.zito@unipa.it – Tel.: +39 09123896764

(Ricevuto 7 Febbraio 2009, Accettato 10 Marzo 2012)

Key words: Ductility, Structural Safety, Energy Dissipation.

Parole chiave: Duttività, Sicurezza Strutturale, Dissipazione di Energia.

Abstract. *Based on the new national territory seismic classification and on the current anti-seismic regulations, the study and implementation of seismic-resistant structures, with sufficient capacity to plastic deformation to dissipate the seismic energy incoming, is crucial nowadays. This paper therefore addresses the study of ductility property of structures which can be obtained through appropriate deformation capacity of materials, sections and structural elements.*

Sommario. *Alla luce della nuova classificazione sismica del territorio nazionale e delle attuali normative antisismiche in vigore, fondamentale importanza assume oggi lo studio e la realizzazione di strutture sismo-resistenti in grado di possedere sufficienti capacità di deformazione plastica, al fine di poter dissipare l'energia sismica in entrata. Il presente lavoro affronta pertanto lo studio della duttilità strutturale, conseguibile attraverso adeguate capacità deformative di materiali, sezioni, elementi strutturali.*

1 INTRODUZIONE

La capacità che ha una struttura di resistere (anche se con danni ingenti) ad un evento sismico è strettamente legata alla possibilità che essa ha di dissipare l'energia sismica. Tale dissipazione può avvenire soltanto se la struttura entra in campo post-elastico mediante la formazione di meccanismi in grado di dissipare l'energia dovuta al terremoto, dunque attraverso elevate deformazioni plastiche permanenti concentrate in zone critiche (cerniere plastiche). Da questo concetto fondamentale scaturisce il principio sul quale si basa la progettazione strutturale in zona sismica: *per resistere senza crollo a sismi caratterizzati da elevate intensità, la struttura deve possedere risorse di cui può disporre oltre il proprio limite elastico.*

Nei paragrafi successivi verrà affrontato lo studio della duttilità e dell'iter progettuale che consente di graduare con continuità questa caratteristica da conferire agli elementi strutturali, nella misura richiesta a ciascuno di essi dal ruolo che gli stessi hanno nel meccanismo di deformazione globale della struttura.

2 DUTTILITA' DI SEZIONI IN C.A.

La risposta sismica di una struttura intelaiata presso-inflessa in calcestruzzo armato è fortemente condizionata dal legame tra il momento flettente M e la curvatura ρ delle sue sezioni. Questo è il legame costitutivo della sezione soggetta alle tensioni normali.

La curvatura, in particolare, è definita come rotazione relativa delle sezioni a distanza unitaria. Nella progettazione sismica, la duttilità disponibile μ di una sezione inflessa è generalmente espressa come rapporto tra la curvatura ultima e la curvatura di primo snervamento (condizione al limite elastico dell'acciaio teso); il comportamento della sezione può essere rappresentato mediante la sua caratteristica Momento-Curvatura, da cui può essere individuata la duttilità flessionale, comunemente indicata come la capacità di sopportare elevate domande di curvatura in campo anelastico senza eccessivo decremento del momento resistente.

Nella figura sottostante viene riportato un diagramma caratteristico Momento-Curvatura, ottenuto con riferimento ad una sezione rettangolare, in cui risultano ben evidenti tutti i tratti caratteristici della curva.

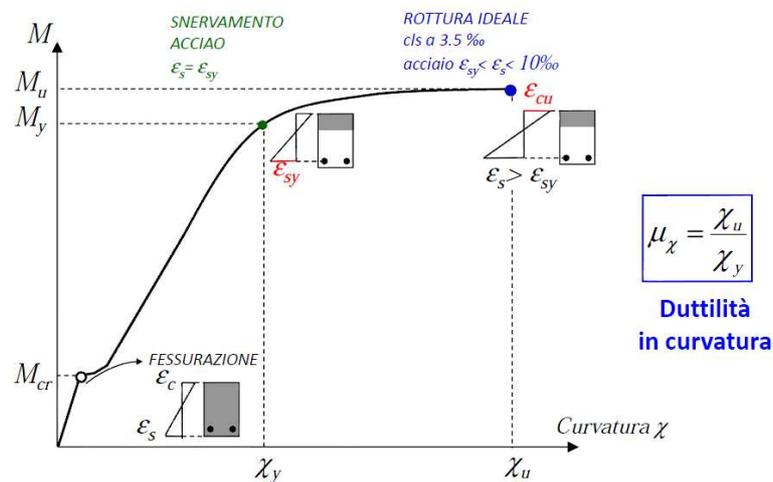


Figura 1: Diagramma caratteristico Momento-Curvatura

Se il comportamento dei materiali è lineare (nella prima fase lo è), la legge M - ρ è lineare, e si scriverà dunque: $M = \rho EI$.

E è il modulo elastico normale, I è il momento d'inerzia della sezione, eventualmente parzializzata ed omogeneizzata. Quando il comportamento dei materiali non è lineare, la legge M - ρ diventa non lineare. Sulla base del suo andamento si può dunque distinguere il comportamento duttile della sezione da quello fragile della stessa. In particolare:

- Il comportamento è duttile se la legge M - ρ ha un tratto quasi orizzontale piuttosto marcato. In effetti, a questo tratto corrispondono situazioni con armatura tesa snervata.
- Il comportamento è fragile se la legge M - ρ è curvilinea, cioè quando il calcestruzzo si schiaccia con l'armatura tesa che si trova ancora in campo elastico.

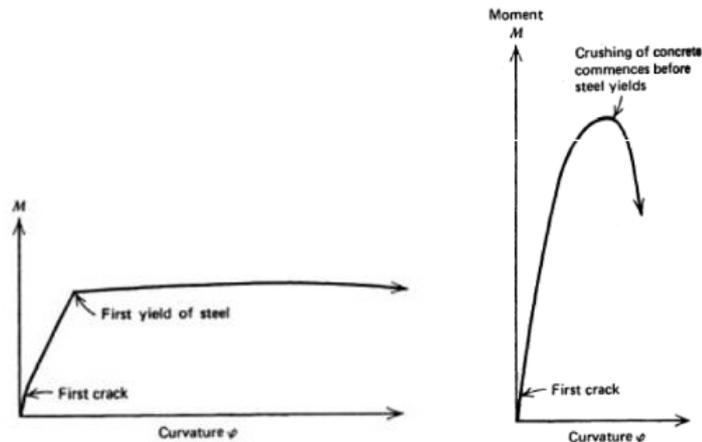


Figura 2: Comportamento duttile e fragile di un materiale

Una sezione di calcestruzzo semplicemente inflessa si rivela essere duttile se ha poca armatura (armatura debole), e fragile se ha molta armatura (armatura forte). La legge M- ρ è comunque schematizzabile comunemente con segmenti di retta:

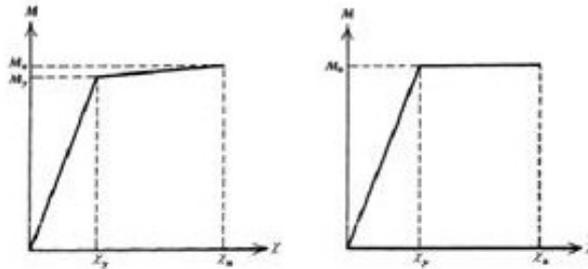


Figura 3 : Diagrammi Momento-Curvatura di tipo bilineare

La costruzione rigorosa della legge M- ρ è concettualmente semplice, ma possibile soltanto per via numerica, poiché i dati che si utilizzano sono due e cioè la geometria della sezione (forma del calcestruzzo, quantità e posizione delle barre) e i legami costitutivi (non lineari) dei materiali.

Nella figura sottostante sono invece riportati i diagrammi Momento-Curvatura, ottenuti per punti, ben evidenziati nelle curve, per il caso della flessione semplice, al variare del rapporto tra armatura compressa e tesa (0,25% e 50%), considerando una sezione rettangolare di dimensioni:

$b = 30\text{cm}$; $h = 50\text{cm}$; Armatura tesa $A_s = 15,00\text{cm}^2$; $\rho = 1\%$; $c = 4\text{cm}$;

Calcestruzzo Classe 25/30;

$$\sigma_{cd} = 0,85 \frac{25}{1,5} = 14,17 \text{ Mpa};$$

$$\text{acciaio } f_{yk} = 450 \text{ Mpa} \rightarrow f_{ya} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391,3 \text{ MPa}$$

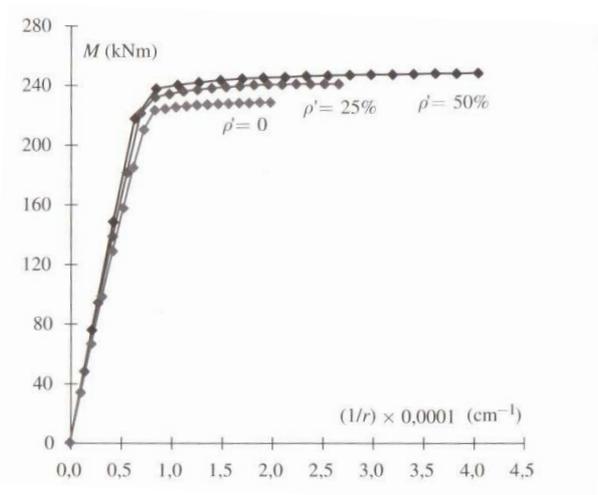


Figura 4 : Diagrammi Momento-Curvatura sezione semplicemente inflessa

Il comportamento della sezione nella fase successiva alla fessurazione è funzione principalmente della percentuale di armatura. Nella fase iniziale, le curve mostrano un andamento lineare e la relazione tra il momento e la curvatura è fornita dalla classica

equazione dell'elasticità: $EI = \frac{M}{\rho}$

in cui EI rappresenta la rigidezza flessionale della sezione. All'incrementarsi del momento, la fessurazione del calcestruzzo riduce la rigidezza della sezione, in maniera più evidente per la sezione ad armatura debole. In questo caso, si verifica un andamento prossimo a quello lineare fino allo snervamento dell'acciaio, cui segue un aumento della curvatura a momento quasi costante. Diversamente, nel caso in cui la percentuale di acciaio è tale da determinare la crisi lato calcestruzzo, lo stato limite ultimo della sezione può essere raggiunto in maniera improvvisa, con una modalità di rottura fragile nel caso in cui il conglomerato non sia confinato efficacemente.

Per garantire un comportamento duttile, appare così evidente che condizione necessaria è che il contenuto di acciaio sia inferiore a quello corrispondente alla rottura bilanciata della sezione.

Come si può notare, si ha la conferma che l'armatura compressa influisce poco sulla resistenza, mentre interviene molto sulla duttilità, come si vedrà nel seguito in termini analitici.

In figura 5, con riferimento alla stessa sezione, caratterizzata però da armatura simmetrica, si riportano i diagrammi Momento-Curvatura nel caso di pressoflessione al variare dello sforzo normale adimensionalizzato v fra 0 e 0,4.

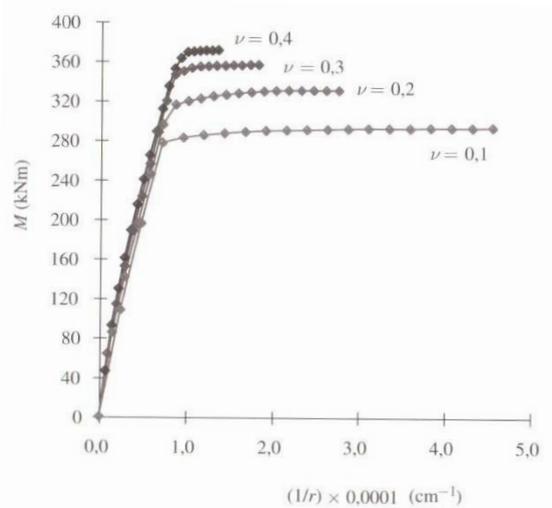


Figura 5 : Diagrammi Momento-Curvatura sezione presso inflessa

Dal grafico emerge con chiarezza che, all'aumentare dello sforzo normale adimensionale ν , aumenta la resistenza (per $0 \leq \nu \leq 0,5$); al contempo, tuttavia, diminuisce sostanzialmente la duttilità.

3 SICUREZZA STRUTTURALE DI SISTEMI DUTTILI

La capacità dissipativa che ha una costruzione nel suo insieme è rappresentata dalla sua duttilità strutturale globale.

La duttilità strutturale globale è legata:

- materiali in grado di subire escursioni elevate in campo plastico;
- sezioni che sopportano ciclicamente curvature elevate senza degrado della capacità portante (momento flettente);
- meccanismi globali progettati in modo da coinvolgere simultaneamente il maggior numero possibile di cerniere plastiche.

La capacità dissipativa che ha una costruzione nel suo insieme, e che in ultima analisi è data del fattore di struttura q , è rappresentata dalla sua duttilità strutturale globale μ , detto anche fattore di duttilità. Definendo la risposta della struttura con la curva-spostamento (curva di capacità dell'edificio), espressa in termini di taglio alla base in funzione dello spostamento di un punto di controllo, analiticamente esso è definito dal rapporto tra lo spostamento ultimo u_u , oltre il quale si ha un degrado limite, e lo spostamento u_1 al limite elastico:

$$\text{fattore di duttilità } \mu = \frac{u_u}{u_1}$$

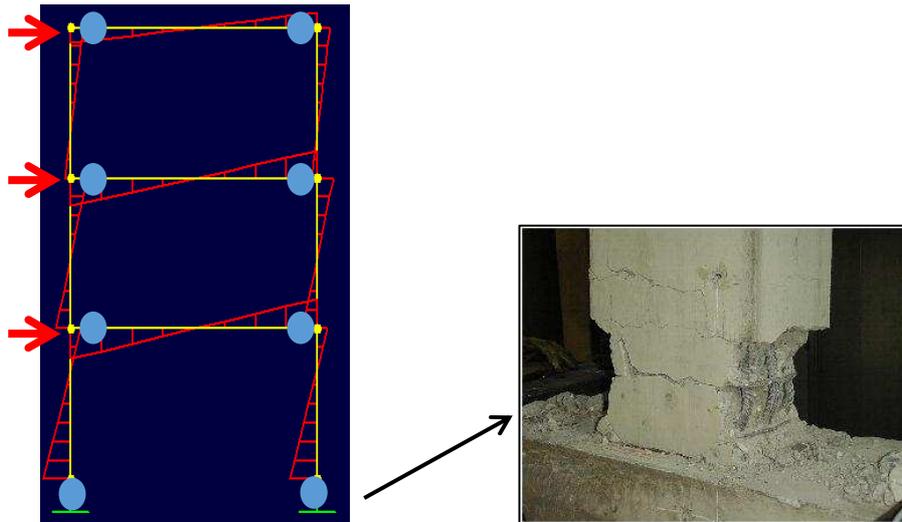


Figura 6: Formazione di cerniere plastiche

Il concetto di duttilità globale di una struttura è il parametro (ma non l'unico) che definisce un utile indice della sua capacità di deformazione anelastica, e quindi contribuisce a caratterizzare l'attitudine globale a dissipare energia. Più correttamente, però, questa attitudine è data dal fattore di struttura q , legato al fattore di duttilità μ , ma non coincidente con esso, per tenere in conto le proprietà delle sezioni ove sono attese le cerniere plastiche.

Un alto livello di duttilità strutturale si ottiene con una corretta progettazione strutturale finalizzata ad un preciso meccanismo di plasticizzazione (Capacity Design). Per definire la duttilità strutturale globale, ovvero il fattore di duttilità μ definito prima, è necessario conoscere la curva di capacità dell'edificio che, come anticipato, è un diagramma che definisce la risposta della struttura ipotizzando che essa sia sollecitata dalle forze peso e da un sistema di forze orizzontali crescente monotonicamente fino al raggiungimento delle condizioni ultime (collasso).

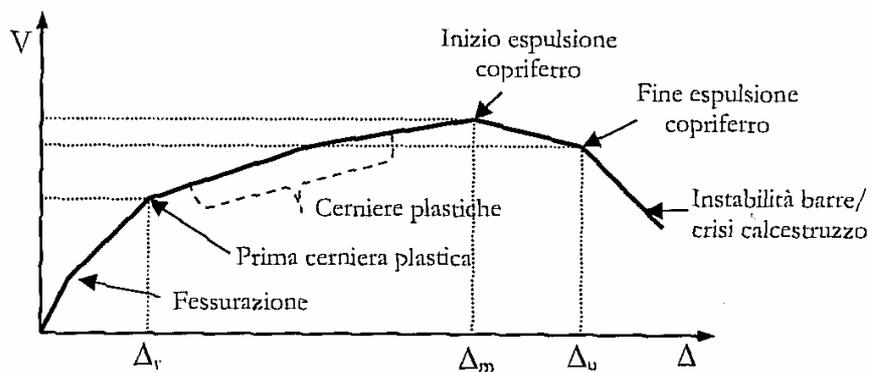


Figura 7 : Curva di Capacità di un telaio a più gradi di libertà

La curva è ottenuta riportando punto per punto l'evoluzione del legame forza-spostamento generalizzato tra la risultante del sistema delle forze applicate F (taglio alla base) e lo spostamento "u" di un punto di controllo (generalmente il baricentro dell'ultimo piano).

E' necessario precisare che la curva di capacità è influenzata anche da altri parametri: carichi verticali, velocità di carico, condizioni al contorno, viscosità del materiale, per cui il meccanismo di collasso non avviene contemporaneamente alla formazione delle cerniere

plastiche. Conseguentemente il comportamento reale non presenta in genere una brusca variazione di rigidità, ma una riduzione graduale.

Per un edificio generico la procedura per determinarne la curva di capacità è analoga a quella del telaio, e in generale, per i motivi appena citati, sarà una linea continua.

Poiché anche in questi casi rimane inalterata la definizione del fattore di duttilità μ , si pone il problema di come determinare il punto di snervamento u_1 (fine della fase elastica). Questo punto di transizione non risulta chiaramente individuabile nei materiali che si allontanano dal comportamento elasto-plastico ideale.

Nelle costruzioni soggette ad azioni sismiche, un elemento fondamentale è il moltiplicatore α_0 dei carichi sismici convenzionali relativo al limite della fase elastica, o soglia plastica, coincidente con il formarsi di un meccanismo, nell'ipotesi che valga la condizione di plasticizzazione simultanea.

Il valore della soglia plastica individua la minore o maggiore resistenza della struttura alle azioni sismiche orizzontali. Più elevata è la soglia plastica, maggiori sono le forze sismiche, quindi le sollecitazioni, di conseguenza più costosa è la struttura.

La scelta fra diverse soluzioni progettuali che assicurino una sufficiente capacità dissipativa può essere effettuata adottando quella che presenta la soglia plastica α_0 più bassa.

Il presentarsi di un comportamento fragile o duttile, a parità di meccanismo di collasso, dipende, per una struttura a telaio, non soltanto dalla maggiore o minore duttilità delle membrature, ma in modo determinante, dalla sequenza di formazione delle cerniere plastiche.

Supponiamo che tutte le cerniere relative a un meccanismo prefissato presentino una buona duttilità, ma che si formino gradualmente, consumando nel corso del processo deformativo parte o tutta la curvatura plastica disponibile, si verifica quindi un basso sfruttamento della duttilità del sistema.

Se invece le cerniere si formano invece tutte al raggiungimento della soglia plastica, ognuna di esse dispone della propria risorsa di curvatura plastica, e quindi il meccanismo di collasso si manifesta in tutta la sua efficienza dissipativa. Si parla in tal caso di condizione di plasticizzazione simultanea, ed è obiettivo fondamentale di una corretta progettazione delle strutture a telaio duttili cercare di avvicinarsi il più possibile alla sua piena realizzazione.

4 CONCLUSIONI

Il presente lavoro mostra quanto fondamentale sia l'importanza di approfondire gli aspetti progettuali connessi allo studio della duttilità degli elementi strutturali, poiché le regole di buona progettazione e l'attuale normativa sismica in vigore (Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008) pongono oggi il problema della verifica della sicurezza strutturale in termini di duttilità strutturale.

Essa è ricondotta alla valutazione di due fattori di duttilità: la duttilità di cui è dotata la struttura (duttibilità disponibile) e la duttilità che un sistema strutturale deve possedere per poter resistere all'evento sismico (duttibilità richiesta).

Il principio generale su cui si basa la verifica strutturale richiede che la duttilità disponibile sia superiore alla duttilità richiesta al fine di tenere in considerazione le risorse di cui può disporre la struttura oltre il limite elastico. Questo ha lo scopo di garantire un globale comportamento duttile che consenta un'adeguata capacità di dissipazione di energia da parte della struttura stessa senza che sia compromessa la resistenza globale a collasso nei confronti dell'azione sismica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Presidenza del Consiglio dei Ministri “Norme Tecniche per il progetto la verifica e l’adeguamento sismico degli edifici” O.P.C.M. 3274 del 3/05/05.
- [2] Ministero dei Lavori Pubblici “Supplemento Ordinario alla Gazzetta Ufficiale del 4/02/2008” D.M 14/01/2008.
- [3] Verderame G.M., Stella A., Cosenza E. “ Le proprietà meccaniche degli acciai impiegati nelle strutture in c.a. realizzati negli anni '60”X Congresso Nazionale ANIDIS "L'ingegneria Sismica in Italia", Potenza-Matera, 9-13 settembre 2001.
- [4] Gherzi, A., Muratore, M., “Verifica e progetto allo stato limite ultimo di pilastri in c.a. a sezione rettangolare: un metodo semplificato”, *Ingegneria Sismica*, Anno XXI, N. 3, settembre-dicembre 2004.
- [5] Cosenza E., Manfredi G., Pecce M., *Strutture in cemento armato*, Hoepli Milano, 2008.
- [6] “Progetto agli stati limite delle strutture in c.a. – parte prima e seconda” – A.Migliacci e F.Mola. – Masson Editore.
- [7] “Atti del corso di aggiornamento in tema di ingegneria sismica” Udine 1981.
- [8] “Reinforced Concrete Structures” – R.Park e T.Paulay – Wiley e Sons, 1975.