

## REQUISITI E VERIFICA DELLA SICUREZZA STRUTTURALE \*

Marco BOZZA \*\*

*\* Il presente articolo fa riferimento alla normativa precedente all'entrata in vigore, a partire dal 2008, delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC): OPCM 3274 del 20 marzo 2003*

*\*\* Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

Per la progettazione di nuovi edifici l'Ordinanza 3274 introduce la definizione dei requisiti di sicurezza e dei criteri di verifica a cui devono soddisfare le strutture in caso di evento sismico. In tale evenienza l'obiettivo è quello di assicurare che sia protetta la vita umana, siano limitati i danni e rimangano funzionanti le strutture essenziali agli interventi di protezione civile.

A tal fine la normativa impone che le strutture colpite da sisma soddisfino a due requisiti fondamentali:

- *sicurezza nei confronti della stabilità: Stato Limite Ultimo (SLU);*
- *protezione nei confronti del danno: Stato Limite di Danno (SLD).*

### REQUISITI DI SICUREZZA

#### **Sicurezza nei confronti della stabilità (SLU)**

Lo Stato Limite Ultimo rappresenta una situazione oltre la quale si ha una condizione di pericolo per la resistenza della struttura, che può portare al collasso (o ad altre forme di cedimento strutturale) e mettere quindi in pericolo la sicurezza delle persone che si trovano all'interno o nei pressi della costruzione.

Il requisito di sicurezza nei confronti della stabilità impone che sotto l'effetto dell'azione sismica di progetto le strutture degli edifici, ivi compresi gli eventuali dispositivi antisismici di isolamento e/o dissipazione, pur subendo danni di grave entità agli elementi strutturali e non strutturali, devono mantenere una residua resistenza e rigidità nei confronti delle azioni orizzontali e l'intera capacità portante nei confronti dei carichi verticali.

In altri termini quanto enunciato equivale al:

**requisito di non-collasso:** *la struttura deve essere progettata e costruita per sopportare l'azione sismica di progetto senza che si manifestino fenomeni di collasso locale o globale ed in modo da mantenere dopo l'evento sismico l'integrità strutturale nei confronti dei carichi verticali ed una residua capacità portante nei confronti delle azioni orizzontali.*

In particolare la struttura deve essere in grado di resistere ad un'azione sismica di progetto caratterizzata da una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (con periodo di ritorno di 475 anni), senza che si verifichino fenomeni di collasso globale o locale, mantenendo quindi una capacità portante residua al termine dell'evento sismico.

#### **Protezione nei confronti del danno (SLD)**

Lo Stato Limite di Danno rappresenta una situazione oltre la quale si genera una condizione non ottimale per l'utilizzo della struttura che può al limite impedirne il funzionamento, non risultando più soddisfatti i requisiti per i quali è stata progettata. In altri termini la costruzione, pur senza manifestare un cedimento strutturale, non può più essere utilizzata per gli scopi preposti.

Il requisito di protezione nei confronti del danno impone che le costruzioni nel loro complesso, includendo gli elementi strutturali e quelli non strutturali, ivi comprese le apparecchiature rilevanti alla funzione dell'edificio, non devono subire danni gravi ed interruzioni d'uso in conseguenza di eventi sismici che abbiano una probabilità di occorrenza più elevata di quella dell'azione sismica di progetto.

In altri termini quanto enunciato equivale al:

**requisito di limitazione del danno:** *la struttura deve essere progettata e costruita per sopportare un'azione sismica, che ha una probabilità di verificarsi molto più alta dell'azione sismica di progetto senza che si verifichi un danneggiamento con conseguenti limitazioni nell'utilizzo, i cui costi siano eccessivamente alti se rapportati con il costo della struttura in se.*

In particolare la struttura deve essere in grado di resistere ad un'azione sismica di progetto caratterizzata da una probabilità di superamento del 10% in 10 anni (con periodo di ritorno di 95 anni), senza che si verifichi un danno e una limitazione di funzionalità ad esso connessa il cui costo sia troppo elevato rispetto al costo della struttura stessa.

## LIVELLI DI VERIFICA

Si consideri una struttura generica soggetta ad un sistema di forze di intensità crescente nel tempo. Il superamento della soglia elastica determina allo scarico, ovvero in corrispondenza della eliminazione delle forze agenti, delle deformazioni plastiche residue. Queste deformazioni permanenti sono indesiderate soprattutto nelle condizioni di servizio della struttura, ma potrebbero invece accettarsi, seppure con certe limitazioni, e con la garanzia di non intaccare la sicurezza a collasso, in condizioni più eccezionali, come nel caso di azioni sismiche corrispondenti a terremoti violenti caratterizzati da elevati periodi di ritorno.

Per quanto detto, si richiedono le verifiche nei confronti di due livelli di prestazioni di stato limite:

### Verifica della sicurezza nei confronti dello Stato Limite Ultimo (SLU)

Si richiede che sia evitato il collasso della struttura e si ritiene che essa debba essere soddisfatto nei riguardi di un sisma caratterizzato da un periodo di ritorno molto superiore alla vita utile della struttura.

La verifica consiste nel controllare che il sistema strutturale abbia specifiche caratteristiche di resistenza e di capacità di dissipazione energetica. Ciò lo si ottiene mediante il *fattore di struttura*  $q$  che riduce le ordinate dello spettro di risposta elastico. In altri termini, mediante l'introduzione di  $q$ , l'azione sismica di progetto risulta essere una frazione di quella rappresentata dallo spettro di risposta elastico (a cui corrisponde un comportamento indefinitamente elastico) in virtù della capacità della struttura di subire escursioni post-elastiche (plasticizzazione), cui è associata una dissipazione energetica.

### Verifica della protezione nei confronti dello Stato Limite di Danno (SLD)

Si richiede l'assenza di danni significativi e si ritiene che essa debba essere soddisfatto nei riguardi di un'azione sismica di intensità media, caratterizzato da un periodo di ritorno circa pari alla durata della vita utile della struttura.

La verifica di un adeguato grado di protezione nei riguardi di livelli di danno inaccettabili viene effettuata controllando il rispetto di limiti deformativi (o altri tipi di limitazione). Per le strutture strategiche di utilità essenziale per la Protezione Civile, la verifica deve assicurare che il sistema strutturale possieda sufficiente resistenza e rigidità da mantenersi operativo in occasione di un evento sismico con specifico periodo di ritorno.

## VERIFICA DELLA SICUREZZA IN CAMPO PLASTICO

Per quanto riguarda il *problema della verifica della sicurezza strutturale*, in relazione allo SLU, è chiaro che un'analisi limitata al campo elastico non può certo prevedere con sufficiente approssimazione il reale comportamento della struttura, sotto l'azione sismica, poiché in queste condizioni la struttura esce dal campo elastico per entrare in quello post-elastico. In campo plastico la struttura mobilita riserve di resistenza in grado di incrementare la capacità di dissipazione di energia ben oltre il proprio limite elastico. Un progetto basato sull'utilizzo delle sole risorse elastiche comporterebbe strutture ampiamente sovradimensionate (antieconomiche), certamente non accettabili per le costruzioni civili ordinarie.

Per questo motivo una valutazione appropriata della sicurezza può derivare solamente dall'applicazione di criteri e regole (contenuti nell'Ordinanza 3274) che tengano conto di queste riserve. Appare pertanto giustificato affermare che:

*il requisito fondamentale per realizzare strutture sismo-resistenti consiste nel realizzarle in modo che esse possiedano sufficiente capacità di deformazione plastica la fine di garantire un adeguato livello di capacità dissipativa.*

In questi termini, un'analisi appropriata del comportamento strutturale, e della relativa verifica di sicurezza, può essere agevolmente svolta facendo ricorso ai fattori di duttilità. Quanto detto si traduce nel verificare che le sollecitazioni  $S$  agenti risultino inferiori alle resistenze ultime  $R$  della struttura:

$$(1) \quad S < R$$

e che le deformazioni prodotte dalle azioni esterne  $\delta_r$  siano inferiori alle deformazioni ultime  $\delta_d$  della struttura:

$$(2) \quad \delta_r < \delta_d$$

Nell'analisi plastica pertanto il criterio di collasso è definito non solo da una verifica di resistenza ma anche da una verifica di deformazione. Anzi, è necessario precisare che i collassi, sia dei singoli elementi che della struttura, sono di solito governati dal raggiungimento delle deformazioni ultime  $\delta_u$ .

Per tener conto di questo, sostanzialmente la soluzione del problema della sicurezza viene ricondotta alla valutazione dei seguenti fattori di duttilità:

- *duttilità disponibile*  $\mu_d$ , ovvero la duttilità di cui è dotata la struttura;
- *duttilità richiesta*  $\mu_r$ , ovvero la duttilità necessaria alla struttura per resistere al sisma.

Per comprendere queste definizioni, si consideri un portale avente un comportamento elastico-perfettamente plastico, soggetto ad un carico statico  $F$  di intensità crescente fino al collasso (Figura 1). Il comportamento dinamico di questo sistema è equivalente a quello di un oscillatore semplice ad un grado di libertà.

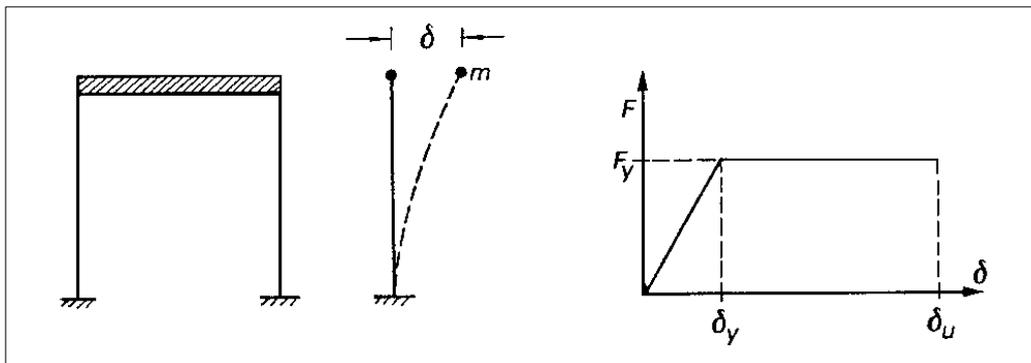


Figura 1

Dal diagramma forza-spostamento ( $F$ - $\delta$ ) la duttilità disponibile è definita dal rapporto:

$$(3) \quad \mu_d = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

essendo  $\delta_y$  lo spostamento del traverso al limite elastico, e  $\delta_u$  lo spostamento ultimo consentito dalla struttura. La duttilità richiesta alla struttura vale:

$$(4) \quad \mu_r = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y}$$

essendo  $\delta_{\max}$  lo spostamento massimo che subisce il traverso per effetto della storia del carico  $F$ .

Noti questi fattori di duttilità, la verifica della resistenza della struttura è garantita dal rispetto della seguente relazione:

$$(5) \quad \mu_r < \mu_d$$

Il problema fondamentale della verifica della sicurezza strutturale si riconduce pertanto alla determinazione dei valori di  $\mu_r$  e  $\mu_d$ , verificando che sia soddisfatta la (5). Posta in questi termini, si può quindi dire che in campo plastico la classica disuguaglianza:

$$(6) \quad S_d < R_d$$

(che esprime che le sollecitazioni di calcolo  $S_d$  devono essere minori delle resistenze di calcolo  $R_d$ ) che serve a garantire lo stato limite ultimo, viene espressa in termini di deformazioni o duttilità. Pertanto l'azione  $S_d$  si fa corrispondere alla richiesta in termini di duttilità  $\mu_r$  e la resistenza di calcolo  $R_d$  la si fa corrispondere alla duttilità disponibile  $\mu_d$ . Più in generale la disuguaglianza (5) deve essere verificata sia a livello locale (elemento) che globale (struttura nel suo complesso).

#### LIMITAZIONI DELLA VERIFICA DI SICUREZZA IN TERMINI DI DUTTILITÀ

Sebbene come detto, in generale, un calcolo in campo plastico (non lineare) considera più realisticamente il comportamento strutturale rispetto ad un calcolo, e ad una verifica, in campo elastico (lineare), vanno tuttavia sottolineate alcune limitazioni contenute nella procedura di verifica appena descritta. Queste limitazioni di fatto condizionano l'effettiva possibilità di utilizzare tale metodologia per valutare la sicurezza in relazione ad azioni di tipo sismico. Sostanzialmente esse fanno riferimento alle seguenti problematiche:

- *effettiva possibilità di verifica della sicurezza;*
- *effettiva capacità dissipativa della struttura.*

### Effettiva possibilità di verifica della sicurezza

Questa limitazione nasce dalla verifica in termini di duttilità espressa dalla (5), ovvero che la duttilità richiesta dall'azione applicata alla struttura sia minore di quella disponibile. Infatti per effettuare correttamente tale verifica è necessario stabilire, con riferimento alle richieste in termini di duttilità, la relazione tra le richieste a livello globale (struttura), locale (elemento) e quella sulla sezione ed infine sul materiale. Lo stesso discorso vale anche per le disponibilità di duttilità, ovvero è necessario stabilire relazioni tra queste disponibilità in termini locali e globali. Queste relazioni non sono sempre di facile determinazione, soprattutto per azioni cicliche quali quelle sismiche e per escursioni in campo fortemente plastico.

### Effettiva capacità dissipativa della struttura

Un altro aspetto importante che non viene colto da una verifica indirizzata ad un controllo delle deformazioni plastiche e delle resistenze ultime è relativo alle capacità dissipative esistenti nella struttura sia a livello locale che a livello globale. I fattori di duttilità definiti dalle relazioni (3) e (4) possono utilizzarsi con successo per l'interpretazione delle massime deformazioni della struttura reale. Lo stesso non può dirsi per quanto riguarda la valutazione dell'energia dissipata. Questo è importante perché, per quanto detto all'inizio, solo attraverso la dissipazione di energia è possibile ridurre gli effetti sismici pervenendo a sistemi strutturali economicamente accettabili.

Facendo riferimento infatti a due sistemi strutturali (ad esempio in c.a. e in c.a.p.) che abbiano le stesse riserve in termini di resistenza e deformazione plastiche (Figura 2) è facile osservare tuttavia come essi siano caratterizzati da capacità dissipative ben diverse.

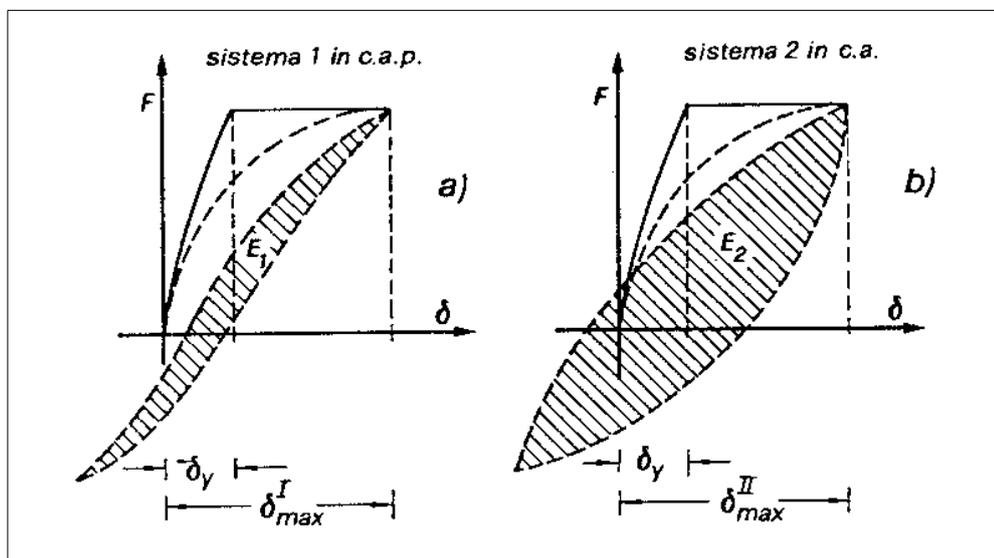


Figura 2

Infatti, per definizione, anche se:

$$(7) \quad \mu_1 = \mu_2 = \frac{\delta_{max}^I}{\delta_y^I} = \frac{\delta_{max}^{II}}{\delta_y^{II}}$$

si ha che:

$$(8) \quad E_1 < E_2$$

Ne segue allora che i due sistemi suddetti, sebbene abbiano uguali fattori di duttilità, come osservato, non sono in grado di dissipare la stessa energia  $E$ . Si consideri anche che nei sistemi costruttivi l'effettiva energia dissipata è legata ai cicli isteretici del diagramma  $F$ - $\delta$ , ma che gli scarti in termini di energia dissipata tra i due comportamenti strutturali, reale ed ideale, aumentano al crescere del numero dei cicli, pur disponendo della stessa duttilità.

### CONCLUSIONI

Da queste brevi osservazioni scaturisce l'importanza di tener conto della capacità dissipativa della struttura in campo plastico, ma anche che il fattore di duttilità  $\mu$  non può essere rappresentativo della reale energia dissipata.

È evidente pertanto che per utilizzare la verifica di sicurezza in termini di duttilità è necessario far riferimento a definizioni appropriate di  $\mu$ , facendo sì che, tramite esse, il modello del sistema colga con sufficiente affidabilità il reale comportamento strutturale e che durante il processo di carico (azione sismica) i cicli di isteresi non subiscano eccessivi degni.

Più in generale per la verifica della sicurezza strutturale è necessario che siano soddisfatte tutte le prescrizioni contenute nell'Ordinanza 3274, operando attraverso le seguenti fasi:

- la scelta di un'azione sismica di progetto in relazione alla zonazione sismica ed alle categorie di suolo di fondazione;
- l'adozione di un modello meccanico della struttura in grado di descriverne con accuratezza la risposta sotto azione dinamica;
- la scelta di un metodo di analisi adeguato alle caratteristiche della struttura;
- l'esecuzione con esito positivo delle verifiche di resistenza e di compatibilità degli spostamenti;
- l'adozione di tutte le regole di dettaglio volte ad assicurare caratteristiche di duttilità agli elementi strutturali ed alla costruzione nel suo insieme.