

DUTTILITÀ STRUTTURALE LOCALE E GLOBALE

Marco BOZZA *

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

LIVELLI DI DUTTILITÀ STRUTTURALE

La duttilità dei singoli elementi strutturali, con cui sono realizzate le ordinarie costruzioni civili e industriali, costituisce un importante indice (ma non l'unico) per caratterizzare la resistenza delle strutture all'effetto di un sisma. Globalmente per l'intera strutture questo indice prende il nome di *duttilità strutturale* e si indica con μ . Per le costruzioni realizzate in zona sismica la duttilità strutturale assume un significato di assoluto rilievo. L'importanza di questo parametro progettuale nella fase di predimensionamento consiste proprio nel fatto che essa racchiude in sé la capacità che ha la struttura di resistere, oltre i propri limiti elastici, a terremoti di elevata intensità. In particolare la struttura consente di attenuare la risposta all'azione sismica mediante la capacità dissipativa delle proprie risorse duttili. A tal fine la duttilità strutturale si esplica a due livelli:

- **duttilità strutturale locale;**
- **duttilità strutturale globale.**

Più precisamente la valutazione dei parametri di duttilità va fatta in termini di deformazione se riferiti al materiale, in termini di curvatura (o rotazione) se riferiti alla sezione (o all'elemento) e in termini di spostamento se riferiti all'intera struttura, ovvero sinteticamente:

- *duttilità in termini di deformazione (materiale);*
- *duttilità in termini di curvatura (sezione);*
- *duttilità in termini di rotazione (elemento);*
- *duttilità in termini di spostamento (struttura).*

Come detto, è necessario tuttavia precisare che, a parità di tipologia strutturale, costruzioni con elevati livelli di duttilità non necessariamente implicano costruzioni con pari elevate capacità dissipative (elevate capacità di deformazione plastica), in quanto queste ultime risultano fortemente condizionate anche dai seguenti fattori:

- *sistemi e dettagli costruttivi con cui sono realizzati i singoli elementi strutturali;*
- *collocazione e numero delle eventuali cerniere plastiche;*
- *impegno di deformazione plastica richiesto a ciascuna cerniera.*

Per questi motivi, per caratterizzare globalmente la resistenza all'azione sismica, la normativa introduce il *fattore di struttura* q , funzione della duttilità strutturale μ , ma non coincidente con essa, proprio per tenere in conto quanto appena detto. Il fattore di struttura costituisce un parametro fondamentale in fase progettuale in quanto definisce lo spettro di progetto ottenuto come riduzione dello spettro di risposta elastico.

DUTTILITÀ LOCALE IN TERMINI DI SPOSTAMENTO E CURVATURA

La duttilità strutturale locale fa riferimento alla duttilità dei singoli elementi strutturali della costruzione. Come detto essa può esprimersi in termini di spostamento (*duttilità locale traslatoria*) dell'elemento o di curvatura (*duttilità locale flessionale*) delle sezioni maggiormente sollecitate dell'elemento stesso (generalmente quelle di estremità).

Per analizzare la duttilità locale si consideri una struttura a un grado di libertà, come il portale indicato in Figura 1. Pensando di applicare al traverso una forza F crescente monotonicamente è possibile caratterizzare la configurazione sotto carico del telaio analizzando l'evoluzione dei parametri deformativi delle sezioni di estremità dei piedritti. In particolare è utile diagrammare l'andamento forza-spostamento ($F-x$) dei piedritti e momento-curvatura ($M-\rho$) delle suddette sezioni (poiché il telaio è a un grado di libertà il diagramma $F-x$ dei piedritti (locale) coincide con quello $F-x$ della struttura (globale)). Questi diagrammi sono riportati in Figura 2.

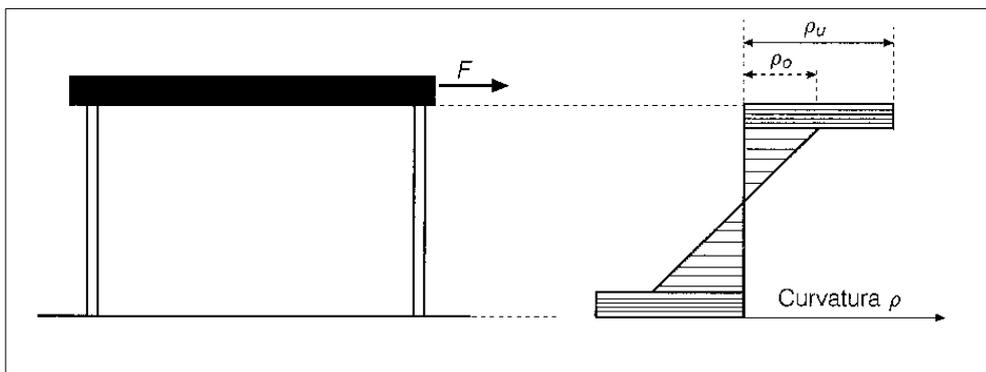


Figura 1

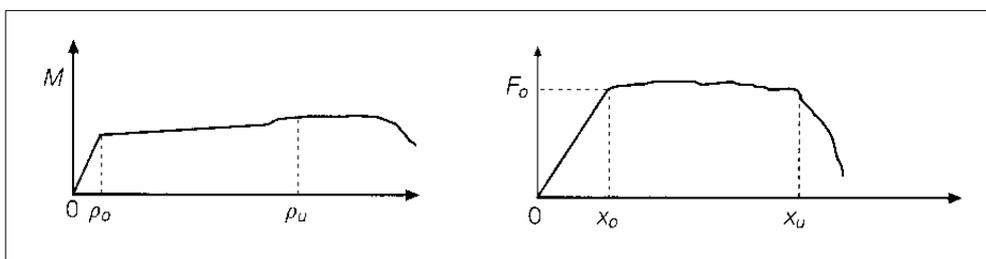


Figura 2

Come si vede in entrambe le figure, questi diagrammi sono costituiti inizialmente da una fase elastica lineare a cui segue una fase post-elastica (plastica) che caratterizza la formazione della cerniera plastica. Si è indicato con ρ_0 e x_0 , rispettivamente, la curvatura e lo spostamento che nei diagrammi separano la fase elastica da quella plastica (soglia della plasticizzazione), e con ρ_u e x_u , rispettivamente, la curvatura ultima e lo spostamento ultimo (corrispondente ad esempio al raggiungimento di ρ_u) consentiti dai materiali dalla sezione. Con questa simbologia si definisce:

- (1) *duttilità (locale) in termini di curvatura* $\mu = \frac{\rho_u}{\rho_0}$
- (2) *duttilità (locale) in termini di spostamento* $\mu = \frac{x_u}{x_0}$

Queste definizioni mettono subito in evidenza che la duttilità di una sezione rappresenta la resistenza della sezione oltre il limite elastico, ovvero rappresenta l'impegno di deformazione plastica (per spostamento o curvatura) che essa è in grado di assorbire (prima della rottura) rispetto al limite del comportamento elastico lineare. In parole semplici la duttilità può definirsi come la capacità che ha la sezione di deformarsi molto (grandi rotazioni) a sollecitazione (momento) pressoché costante. Questo è molto importante poiché l'azione sismica su di una struttura produce nelle sezioni critiche deformazioni che si propagano ben oltre il limite elastico. Per questo motivo si adottano criteri progettuali che aumentino la duttilità delle sezioni.

DUTTILITÀ DELLE SEZIONI IN CA

La risposta sismica di una struttura intelaiata presso-inflessa in cemento armato è fortemente condizionata dal legame tra il momento flettente M e la curvatura ρ delle sue sezioni. 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). Per valutare i criteri che concorrono ad aumentare la duttilità delle sezioni in c.a. è necessario valutare innanzitutto la duttilità dei materiali base considerando i diagrammi tensione-deformazione (σ - ϵ).

Per un materiale si definisce:

- (3) *duttilità in termini di deformazione* $\mu = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_0}$

essendo ϵ_0 e ϵ_u , rispettivamente, la deformazione al limite elastico e quella ultima (convenzionale).

Duttilità del calcestruzzo e dell'acciaio

Si considerino di seguito i diagrammi costitutivi convenzionali del calcestruzzo compresso (Figura 3) dell'acciaio ad es. per l'acciaio Fe B 44k (Figura 4):

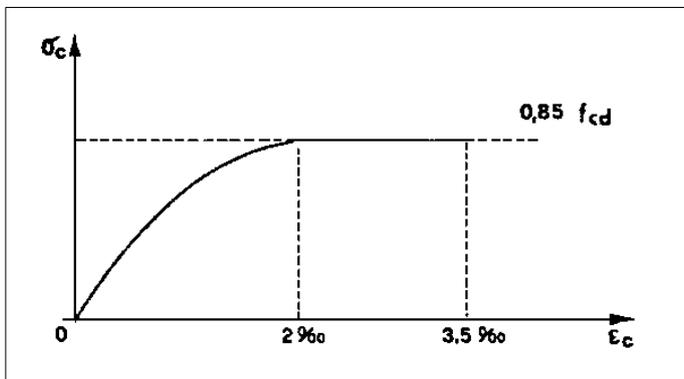


Figura 3

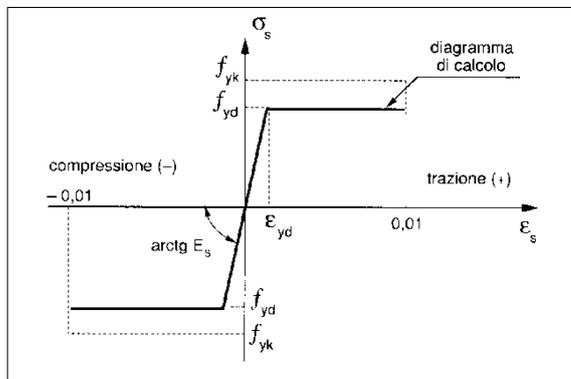


Figura 4

Dal diagramma costitutivo convenzionale del calcestruzzo compresso (Figura 3):

ϵ_{cy} = deformazione limite del tratto parabolico = 0,0020 (0,20%)

ϵ_{cu} = deformazione ultima convenzionale = 0,0035 (0,35%)

duttilità del calcestruzzo $\mu_C = \epsilon_{cu}/\epsilon_{cy} = 1,75$

Dal diagramma costitutivo convenzionale dell'acciaio, ad es. per l'acciaio Fe B 44k (Figura 4):

f_{yk} = valore caratteristico della tensione di snervamento = 430 MPa

f_{yd} = tensione di calcolo di snervamento = $f_{yk}/1,15 = 374$ MPa

ϵ_{yd} = deformazione al limite elastico = $f_{yd}/E_s = 374/206.000 = 0,0018$ (0,18%)

ϵ_{su} = deformazione ultima convenzionale = 0,0100 (1,00%)

duttilità dell'acciaio $\mu_S = \epsilon_{su}/\epsilon_{yd} = 5,52$

Fattori che influenzano la duttilità

Dai valori numerici ottenuti si vede che per avere un comportamento duttile di una sezione in c.a. bisogna sfruttare la duttilità dell'acciaio teso, in modo tale che la crisi avvenga per il raggiungimento della deformazione ultima dell'acciaio e non del lembo compresso di calcestruzzo. In una sezione in c.a. si definisce *rapporto meccanico di armatura* la quantità:

$$(4) \quad \omega_s = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

nella quale si è indicato con:

A_s e A_c , rispettivamente, l'area dell'armatura ad uno dei lembi della sezione e l'area della sezione di calcestruzzo, e con f_{yd} e f_{cd} , rispettivamente, la tensione di calcolo di snervamento dell'acciaio e la tensione di calcolo del calcestruzzo a compressione. Si dimostra che la duttilità μ in termini di curvatura aumenta:

- diminuendo ω_s in zona tesa;
- diminuendo f_{yd} ;
- aumentando f_{cd} ;
- aumentando ω_s in zona compressa;
- aumentando il grado di confinamento del calcestruzzo.

Considerando invece i diagrammi di resistenza sforzo normale-momento (N-M) si dimostra che lo sforzo assiale riduce la duttilità delle sezioni di calcestruzzo. Negli elementi pressoinflessi (pilastri) in cui lo sforzo normale è significativo, come nei pilastri di primo piano, la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo.

Pertanto, non si sfruttano le risorse di duttilità dell'acciaio, ma al fine di migliorare la risposta strutturale si può intervenire incrementando le prestazioni del calcestruzzo attraverso un adeguato confinamento. Un buon confinamento del nucleo è necessario per dare ai pilastri un'adeguata capacità rotazionale plastica al fine di mantenere lo sforzo flessionale anche alle più elevate curvatures.

Orientativamente una sezione inflessa in c.a. può avere una duttilità disponibile μ dell'ordine di 8-10.

DISSIPAZIONE E CERNIERE PLASTICHE

La capacità che ha una struttura di resistere (anche se con danni ingenti) ad un evento tellurico è strettamente legata alla possibilità che essa ha di dissipare l'energia sismica. Quest'ultima può avvenire solamente se la struttura entra in campo post-elastico, con la formazione di meccanismi in grado di dissipare, mediante elevate deformazioni plastiche permanenti concentrate in zone critiche (*cerniere plastiche*), l'energia dovuta al terremoto.

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 (anche se fortemente fessurata), la struttura deve tenere in conto le risorse di cui può disporre oltre il proprio limite elastico

Al contrario se la struttura viene dimensionata per resistere al sisma mantenendo la risposta in fase elastica, essa non dispone di alcuna capacità dissipativa: tutta l'energia assorbita durante il moto sismico del suolo viene accumulata sotto forma di deformazione elastica, e quindi restituita integralmente in fase di scarico, senza lasciare alcuna deformazione residua (assenza di fessurazioni e fenomeni di degrado). Affinché la struttura abbia un tale comportamento le sue sezioni, come detto, devono essere dimensionate per rimanere in fase elastica, e questo lo si ottiene al prezzo di elementi strutturali con elevate rigidità flessione-torsionali. E' ovvio quindi immaginare che un progetto basato sull'utilizzo delle sole risorse elastiche comporterebbe strutture sovradimensionate e antieconomiche, certamente non giustificabili per le costruzioni ordinarie. Quello che si cerca allora di fare è realizzare strutture sismo-resistenti in grado di possedere sufficienti capacità deformazione plastica, al fine di poter dissipare l'energia sismica tramite la duttilità (locale) delle loro sezioni.

DUTTILITÀ E CAPACITY DESIGN

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 , detta 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:

$$(5) \quad \mu = \frac{u_u}{u_1}$$

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. Il criterio progettuale fondamentale delle costruzioni in zona sismica è il seguente:

un alto livello di duttilità strutturale si ottiene con una corretta progettazione strutturale finalizzata ad un preciso meccanismo di plasticizzazione (Capacity Design)

Importanza del fattore di duttilità

Come già ricordato, il comportamento reale di una struttura sollecitata da un sisma è di tipo anelastico in quanto i materiali risultano lavorare oltre il limite di proporzionalità. In questa situazione si hanno una serie di fenomeni di degrado e fessurazioni di tipo irreversibile. Volendo simulare realisticamente il comportamento della struttura sarebbe necessario effettuare analisi dinamiche non lineari che tengano conto esplicitamente sia delle non linearità strutturali (per materiali e geometria) che dell'input sismico mediante accelerogrammi del suolo.

Nella progettazione di nuove strutture l'importanza della duttilità strutturale consiste allora nel fatto che essa, contribuendo a definire il fattore di struttura q , offre la possibilità di utilizzare un'analisi elastica convenzionale con valori delle azioni sismiche che già tengono conto implicitamente della risposta non lineare.

CURVA DI CAPACITÀ DELL'EDIFICIO

Per definire la duttilità strutturale globale, ovvero il fattore di duttilità μ definito nella (5), 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 monotonamente fino al raggiungimento delle condizioni ultime (collasso). 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). Si analizzano nel seguito due situazioni:

- curva di capacità di un portale;
- curva di capacità di un telaio generico.

Curva di capacità di un portale

Per cogliere gli aspetti concettuali e qualitativi si consideri un portale (ad esempio in acciaio) incastrato alla base e al cui traverso è applicata una forza orizzontale F di intensità via via crescente.

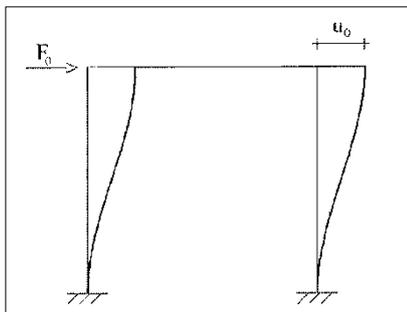


Figura 5

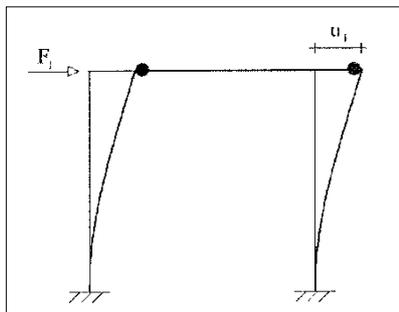


Figura 6

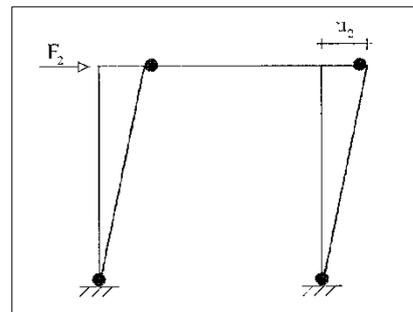


Figura 7

L'intensità di F che porta il telaio al collasso può assumere valori in tre fasi di riferimento, a cui corrispondono i relativi intervalli per lo spostamento u :

- Prima fase* sia F_0 il valore di F che mantiene il regime deformativo delle travi del telaio in fase elastica (Figura 5). Sia u_1 il massimo spostamento in questa fase;
- Seconda fase* l'intensità di F viene incrementata fino a F_1 , valore per il quale si ha la formazione delle cerniere plastiche alle estremità del traverso (Figura 6);
- Terza fase* l'intensità di F viene incrementata fino a F_2 , valore per il quale si ha la formazione delle cerniere plastiche anche ai piedi dei piedritti. Sia u_2 il valore dello spostamento quando F raggiunge il valore di F_2 (Figura 7).

Al raggiungimento di $F = F_2$ il telaio si trasforma in un meccanismo plastico in grado di resistere (senza ulteriore incremento di F) fino al raggiungimento dello spostamento ultimo u_u consentito dalla struttura (condizione limite). La curva individuata da queste fasi è la *curva di capacità* del telaio ad un grado di libertà (Figura 8).

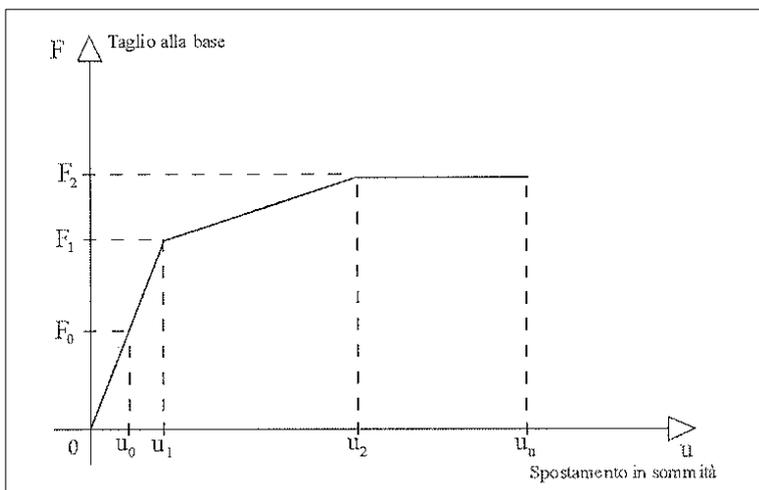


Figura 8

Il diagramma della Figura 8 rappresenta, nella sostanza, l'andamento di come evolve la rigidezza della telaio all'aumentare della forza F sul traverso. Come si vede chiaramente, nell'intervallo $0 \leq u \leq u_1$ la struttura mantiene la propria rigidezza iniziale (fase elastica), mentre per $u_1 < u \leq u_2$ la struttura oppone ancora una rigidezza all'incremento di F , ma inferiore a quella della fase elastica (il telaio equivale a due aste incastrate al piede con le estremità libere di ruotare). Per $u_2 < u < u_u$ la struttura non ha più rigidezza (aste con cerniere al piede) poiché non consente ulteriori incrementi di F : lo spostamento del traverso avviene ad F costante.

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, ecc., 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 rigidezza, ma una riduzione graduale.

Curva di capacità di un telaio generico

Per un edificio generico la procedura per determinarne la curva di capacità è analoga a quella del telaio SDOF, e in generale, per i motivi appena citati, sarà una linea continua. Poiché anche in questi casi rimane inalterata la definizione (1) 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.

Una procedura approssimata per il calcolo di u_1 può essere fatta secondo le indicazioni riportate nei diagrammi di Figura 9 (nella Figura u_1 è indicato con δ_y):

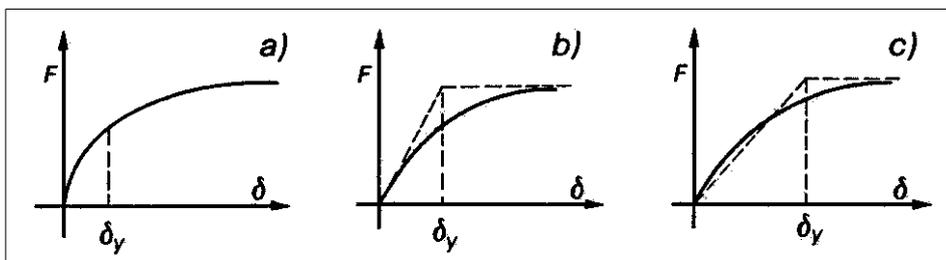


Figura 9

- a) facendo coincidere δ_y con il punto di prima inflessione (Figura 9a));
- b) facendo coincidere δ_y con il punto di intersezione delle tangenti alla curva (Figura 9b));
- c) facendo coincidere δ_y con il punto di intersezione delle rette che sottendono un'area equivalente (Figura 9c)).

Si ricorda che l'area sottesa dalle curve (o dalle linee spezzate) rappresenta la quantità di energia assorbita dal sistema. Con le procedure b) e c) si riduce la curva di capacità dell'edificio ad un comportamento elasto-plastico, con l'evidente vantaggio di una notevole semplificazione dal punto di vista progettuale.