

Progettazione di strutture in acciaio monopiano secondo il calcolo plastico e le nuove normative

P. Colombi & L. Sgambi
Politecnico di Milano, Italia

M. Antinori
Fondazione Promozione Acciaio, Italia

M. Sommavilla
ArcelorMittal, Italia

SOMMARIO: In questo lavoro si descrive un'applicazione del calcolo di edifici monopiano industriali in acciaio con il metodo plastico. Tale metodo, già da tempo previsto dall'EC3-1-1, è stato recentemente inserito tra i possibili metodi d'analisi dei telai in acciaio dalle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC). Per alcune tipologie di telaio in acciaio, come ad esempio quella monopiano, il metodo porta a delle economie di progetto come da tempo dimostrato nel Regno Unito dove rappresenta, in questi casi, l'unico metodo di calcolo utilizzato. L'analisi evolutiva, utilizzata nel lavoro, permette di mettere in evidenza la sequenza di formazione delle cerniere plastiche sino a collasso, fornendo utili suggerimenti progettuali a riguardo di alcuni particolari costruttivi (vincoli torsionali e rinforzi nodali) che divengono necessari con questo metodo di progettazione. L'influenza degli effetti del secondo ordine è valutata attraverso un fattore amplificativo, come suggerito dall'EC3-1-1 nel caso di modeste azioni verticali. In ultimo, viene riportato uno studio comparato su tre differenti edifici monopiano, allo scopo di mettere in luce quali edifici possono effettivamente trarre vantaggio da questa metodologia. Una versione più estesa di questo lavoro, comprendente tutte le verifiche di dettaglio del caso, è riportata in [Colombi & Sgambi 2008].

1 INTRODUZIONE

In Italia, nella comune progettazione di strutture in acciaio, è di uso comune l'utilizzo di metodi di calcolo in campo elastico. Benché tali metodi siano fondati su tradizioni progettuali largamente consolidate, essi non sono gli unici possibili e, in alcuni casi, nemmeno i più convenienti. In questo lavoro, utilizzando come applicazione la progettazione di un edificio monopiano industriale in acciaio, si vuole dimostrare l'efficienza e l'economicità derivante da una progettazione con il metodo plastico. Tale metodo, già da tempo previsto dall'EC3-1-1, è stato difatti recentemente inserito tra i possibili metodi d'analisi dei telai in acciaio dalle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC). Benché in Italia non sia ancora diffuso, il metodo plastico rappresenta, per alcune tipologie di costruzioni, di fatto il solo metodo di calcolo utilizzato in altri paesi (Regno Unito).

1.1 Classificazione dei metodi di analisi

I metodi di analisi utilizzati nell'usuale progettazione, vengono classificati dalle normative vigenti come (EC3-1-1 § 5.2.1):

- analisi del primo ordine;
- analisi del secondo ordine;

a seconda che l'equilibrio venga valutato nella posizione indeformata o deformata. L'EC3-1-1 al § 5.2.1 fornisce le condizioni da soddisfare affinché si possa utilizzare un'analisi del primo ordine. Questo richiede il calcolo del rapporto $\alpha_{cr} = V_{Sd}/V_{cr}$ (o del suo reciproco) tra il carico critico Euleriano, V_{cr} , ed i carichi di progetto della struttura, V_{Sd} . Nel caso in cui sia necessario mettere in conto gli effetti del secondo ordine, l'EC3-1-1 al § 5.2.2 ne prescrive le modalità operative. In particolare, se gli effetti del secondo ordine non risultano di particolare rilevanza, si suggerisce di tenerne conto in modo semplificato amplificando i carichi (o le azioni interne) attraverso un opportuno fattore di amplificazione. L'EC3-1-1 (così come l'ENV 1993-1-1) di fatto suggerisce l'utilizzo di una rielaborazione della nota formula di Merchant-Rankine per la valutazione della capacità portante che consente di scrivere:

$$V_{Sd} = V_{plastic} \left(1 - \frac{V_{Sd}}{V_{cr}} \right) \quad (1)$$

dove V_{Sd} rappresenta le azioni verticali di progetto, $V_{plastic}$ rappresenta il carico critico ottenuto attraverso l'analisi plastica (analisi rigido-plastica o ana-

lisi evolutiva) mentre V_{cr} rappresenta il carico critico Euleriano.

Una seconda classificazione dei metodi di analisi prevede la suddivisione in (EC3-1-1 § 5.4.1):

- analisi elastica;
- analisi plastica.

a seconda del valore massimo di tensione e di deformazione ammesso nei calcoli. I metodi di analisi elastica, pur essendo i più semplici da utilizzare ed i più conosciuti dai progettisti, sono in generale conservativi in quanto non tengono conto dell'effetto della redistribuzione plastica delle sollecitazioni. Il tenerne conto porta, in genere, ad utilizzare profili di sezione più piccoli rispetto ad un'analisi elastica a parità di azioni esterne applicate. L'analisi plastica (EC3-1-1 § 5.4.3) può essere convenientemente effettuata utilizzando il concetto di cerniera plastica, concentrando cioè tutti gli effetti anelatici nelle cerniere plastiche. In alternativa è possibile effettuare una analisi elasto-plastica considerando l'effettiva distribuzione delle deformazioni plastiche nelle membrature. In questo lavoro si farà riferimento come metodo plastico al solo metodo delle cerniere plastiche.

1.2 Le imperfezioni reali

A prescindere dal tipo di analisi effettuato, l'EC3-1-1 al § 5.2.2 prescrive di tener conto degli effetti delle imperfezioni reali (tensioni residue, imperfezioni geometriche del telaio e delle membrature, etc.) nell'analisi di instabilità della struttura, sia che l'analisi avvenga con metodi del secondo ordine sia che avvenga amplificando i risultati ottenuti al primo ordine. L'introduzione delle imperfezioni può essere fatta mediante l'uso di imperfezioni geometriche (della struttura e delle membrature) riportate al § 5.3.2 dell'EC3-1-1 oppure attraverso un sistema di forze orizzontali equivalenti (imperfezioni geometri-

che del telaio) oppure trasversali equivalenti (imperfezioni delle membrature).

1.3 I nodi strutturali

Le ipotesi formulate nell'analisi globale della struttura devono essere chiaramente congruenti con il tipo di comportamento previsto per i nodi strutturali. Poiché in questo lavoro si utilizzerà un'analisi di tipo rigido-plastica con collegamenti rigidi, si dovrà imporre che i collegamenti siano a completo ripristino di resistenza [Colombi & Sgambi 2008].

2 UN ESEMPIO APPLICATIVO

Per mostrare l'efficienza del metodo plastico, si considera la progettazione di un edificio monopiano adibito ad uso industriale. Nel seguito se ne descrive sinteticamente la geometria, fornendo una sezione (Figura 1) ed una pianta (Figura 2) dell'organismo strutturale ed i carichi di progetto.

L'edificio in oggetto è sito in Trentino Alto Adige ad una quota di 260 m sul livello del mare, in area industriale. L'edificio è una costruzione monopiano, di 20 m di larghezza per 48 m di lunghezza, con un passo tra telai di 6.00 m. L'altezza delle colonne (asse strutturale) è di 8.0 m con un'altezza interna massima (asse strutturale) dell'edificio 8.50 m (pendenza della copertura del 5 %).

La struttura dei telai è in acciaio laminato a caldo con travi tipo IPE. La struttura secondaria di copertura è formata da arcarecci in profili "UPN" 120, a sostegno dei pannelli di tamponamento in lamiera grecata in acciaio zincato con interposta massa isolante a base di resine poliuretaniche. Lo spessore dei pannelli è di 40 mm e il peso proprio di 0.11 kN/m^2 , con un interasse di appoggio, per i pannelli, massimo di 1.5 m. Su tale luce i pannelli sono dimensionati per un carico di 1.5 kN/m^2 .

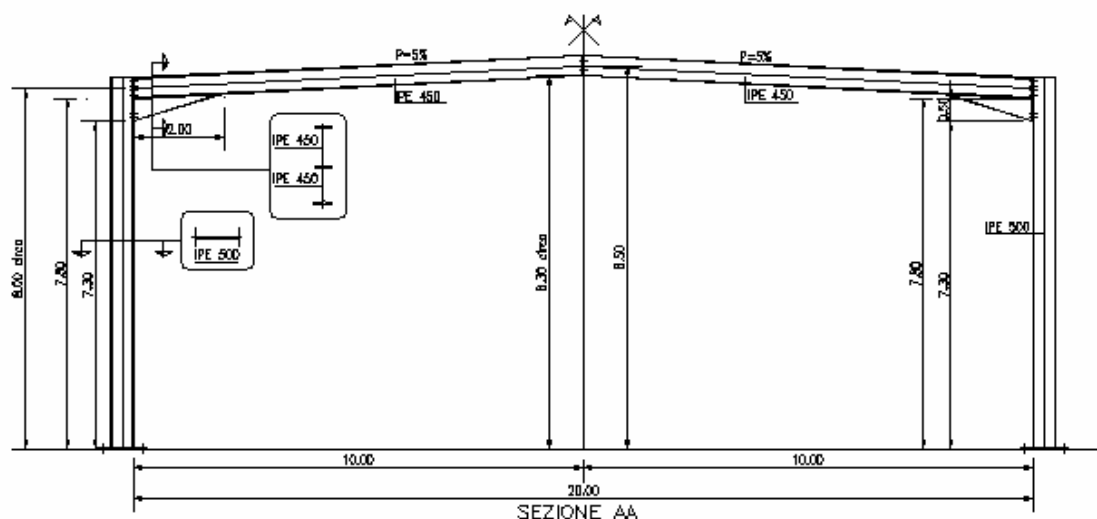


Figura 1. Sezione trasversale dell'edificio monopiano di esempio.

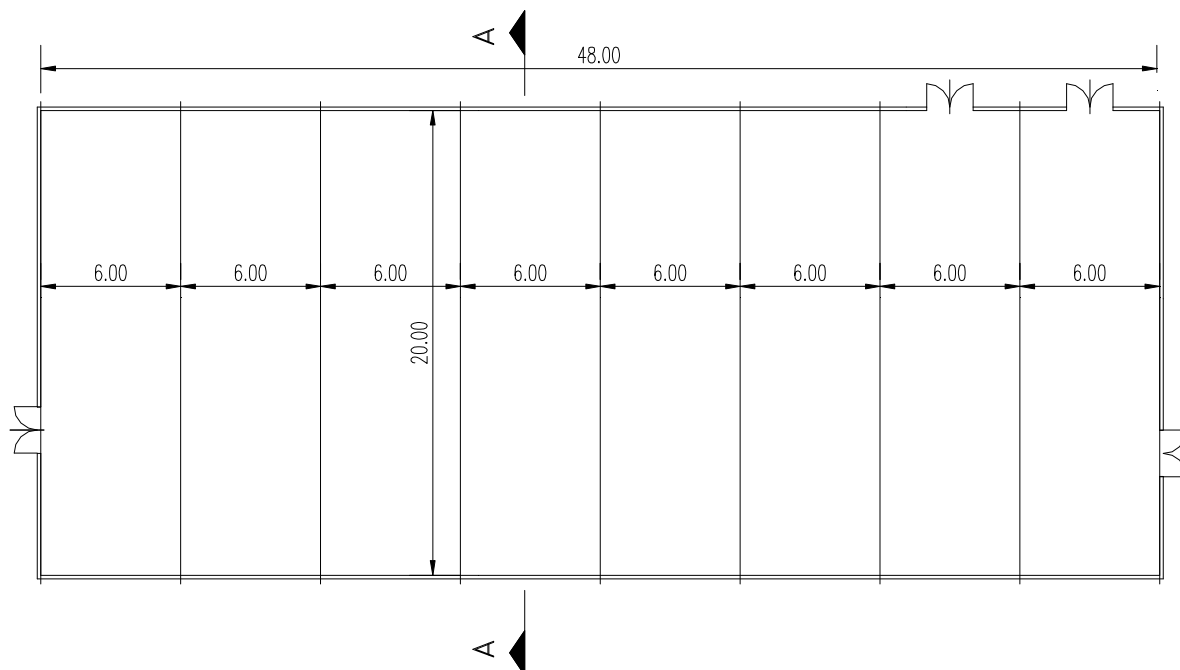


Figura 2. Pianta dell'edificio monopiano di esempio.

Le pareti perimetrali esterne sono ricoperte con pannelli metallici di tipo “sandwich” (autoportanti coibentati in poliuretano). Lo spessore dei pannelli è di 30 mm ed il peso proprio di 0.12 kN/m^2 , con una distanza tra profili orizzontali di sostegno (profili tipo “C”) di 1.50 m. Su tale luce i pannelli di parete sono dimensionati per un carico orizzontale di 0.60 kN/m^2 . Tali dati risultano utili per rendere lo studio di progettazione il più aderente possibile alla realtà.

3 PROCEDURA DI PROGETTO

La progettazione del telaio strutturale dell'edificio mostrato in precedenza, fatta col metodo evolutivo, non richiede l'utilizzo di un software di calcolo specifico e può essere fatta in modo “analitico” come mostrato in [Colombi & Sgambi 2008] o tramite la sovrapposizione di passi lineari eseguibili con i normali codici di calcolo operanti in campo elastico lineare.

Il procedimento di dimensionamento dei profili segue il diagramma di flusso rappresentato in Figura 3. Dopo una prima definizione delle sezioni e dei carichi agenti sul telaio, l'analisi plastica deve garantire che a collasso la struttura possenga comunque un moltiplicatore dei carichi γ maggiore di uno. Per strutture snelle, poiché i carichi devono essere amplificati per tener in conto in via approssimata degli effetti del secondo ordine, deve essere valutato il carico critico Euleriano V_{cr} ed il rapporto $\alpha_{cr} = V_{sd}/V_{cr}$ (paragrafo 1). Poiché tale rapporto dipende dalle dimensioni delle sezioni, anche l'influenza degli effetti del secondo ordine va valutata per via iterativa, come mostrato dal diagramma di Figura 3.

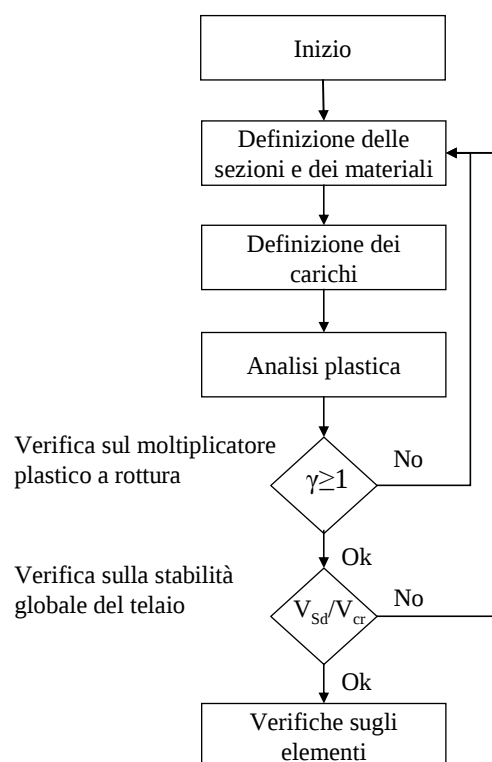


Figura 3. Schema a blocchi per la progettazione plastica.

Eseguite queste operazioni, le sezioni risulteranno dimensionate e verificate a flessione secondo il metodo plastico. Chiaramente, poiché su un generico telaio vi è la presenza anche di azioni assiali e di taglio in contemporanea al momento flettente, si deve considerare l'influenza di queste azioni nella valutazione del momento plastico come specificato al § 6.2.8 e 6.2.9 dell'EC3-1-1.

E' importante, che durante la valutazione del carico di collasso, si tenga memoria della storia di formazione delle cerniere plastiche in quanto L'EC3 impone per strutture più volte iperstatiche, sezioni di classe 1 in corrispondenza delle prime n (n indica il

grado di iperstaticità) cerniere plastiche. Per l'ultima cerniera plastica è invece sufficiente una sezione di classe 2: dopo la formazione dell'ultima cerniera plastica difatti la struttura è in condizioni di imminente collasso e non è richiesta alcuna ulteriore capacità di rotazione.

Come riportato in Figura 3, il dimensionamento strutturale viene eseguito facendo in modo che il moltiplicatore ultimo dei carichi (γ), alla formazione di tutte le cerniere plastiche, sia superiore all'unità. Chiaramente, un valore di molto superiore, porterebbe ad una progettazione sovradimensionata per cui lo scopo del progettista è quello di dimensionare le strutture in modo da ottenere un moltiplicatore il meno possibile maggiore di uno.

Come precedentemente evidenziato, il calcolo del moltiplicatore può essere fatto tramite un'analisi evolutiva del comportamento strutturale. Tale analisi, può essere eseguita sovrapponendo più stati elastici lineari. Ad esempio, utilizzando per le colonne un profilo IPE500 e per i traversi un profilo IPE450 sono noti i seguenti momenti di plasticizzazione:

$$\begin{aligned} \text{IPE500} \quad I_c &= 4.820 \text{ E}+08 \text{ mm}^4 \\ M_{p,c} &= W_{pl,c} \cdot f_{yd} = 2194 \cdot 262 = 575 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IPE450} \quad I_t &= 3.374 \text{ E}+08 \text{ mm}^4 \\ M_{p,t} &= W_{pl,t} \cdot f_{yd} = 1702 \cdot 262 = 446 \text{ kNm} \end{aligned}$$

L'analisi del telaio, eseguita in campo elastico lineare porta alla definizione del diagramma dei momenti di Figura 4.

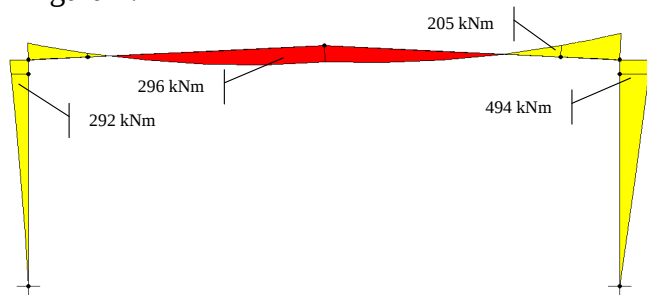


Figura 4. Diagramma dei momenti flettenti sulla struttura iniziale.

Considerando un coefficiente di amplificazione per gli effetti del secondo ordine pari ad 1.23 (assunto dalla precedente iterazione rappresentata in Figura 3) si ottiene, considerando i valori massimi di momento sul traverso e sulla colonna, un valore di moltiplicatore alla formazione della prima cerniera plastica pari a:

$$\gamma_1 = \frac{575}{1.23 \cdot 494} = 0.946 \quad (2)$$

Raggiunto tale valore (si noti che è inferiore all'unità) la zona al di sotto del rinforzo sulla colon-

na si plasticizza ed è possibile inserire in quel punto una cerniera plastica. La struttura perde un grado di iperstaticità ma è comunque in grado di sopportare ulteriore carico. In base alle nuove condizioni statiche, lo stesso carico che ha portato alla formazione della prima cerniera plastica, fornisce il diagramma dei momenti rappresentato in Figura 5.

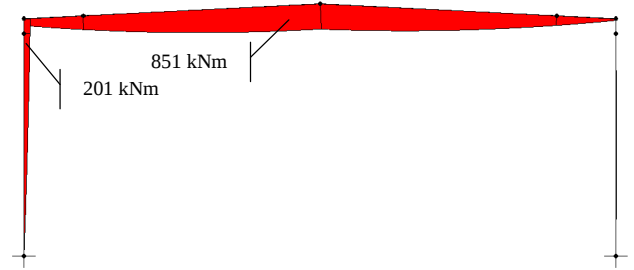


Figura 5. Diagramma dei momenti flettenti sulla struttura dopo la formazione della prima cerniera plastica.

Con una semplice proporzione è possibile ricavare quanto il carico può essere nuovamente incrementato prima della formazione di una seconda cerniera plastica che porterà a collasso la struttura:

$$\Delta\gamma = \frac{446 - 364 \cdot 0.946}{1.23 \cdot 851} = 0.0961 \quad (3)$$

Il moltiplicatore a collasso finale risulta quindi pari a 1.04. Come dal diagramma di Figura 3, le sezioni ed il moltiplicatore ora calcolato sono corretti se la verifica di stabilità del telaio porta a definire un coefficiente amplificativo in accordo con quello ipotizzato. In questo caso, viene valutato come:

$$\delta_{cr} = \frac{1}{1 - \frac{V_{Sd}}{V_{cr}}} = \frac{1}{1 - 0.179} = 1.22 \quad (4)$$

in perfetto accordo con quello ipotizzato (1.23).

Chiaramente, poiché in prima battuta non si conosce il coefficiente di amplificazione, è necessario ipotizzarne un valore (ad esempio $\alpha_{cr} = 0.2$ e $\delta_{cr} = 1.25$) e ripetere i cicli rappresentati in Figura 3 sino a che il valore calcolato tramite l'equazione 4 non risulti a convergenza. Ad ogni iterazione può essere assunto come ipotesi sul valore del coefficiente, il valore valutato dall'Equazione 4. In genere sono sufficienti poche iterazioni per ottenere un valore a convergenza.

Infine perché la progettazione a resistenza sia corretta, si deve controllare che non vi sia interazione tra momento flettente ed azione assiale o taglio ed, in alternativa, provvedere ad una opportuna diminuzione della resistenza plastica.

Queste considerazioni, nel caso vi siano più scenari di carico, devono chiaramente essere ripetuti per ogni scenario [Colombi & Sgambi 2008]. Il moltiplicatore di collasso risulterà essere il minore tra quelli valutati.

4 PARTICOLARI COSTRUTTIVI

L'utilizzo del metodo plastico per la progettazione di strutture in acciaio porta ad utilizzare al meglio le risorse di resistenza delle sezioni delle strutture principali analizzate (in questo caso le colonne e i traver- si). Questo comporta che, rispetto ad una comune progettazione, i profili siano più snelli (tipicamente profili IPE con sezioni in classe 1 o 2 secondo EC3 1-1) e quindi sensibili ai fenomeni di instabilità. Le verifiche di stabilità e l'attenzione ai particolari costruttivi che riducono la deformabilità della struttura divengono quindi di fondamentale importanza.

Nel progetto dell'edificio monopiano, i particolari costruttivi più importanti riguardano il rinforzo dei nodi del telaio e i vincoli torsionali.

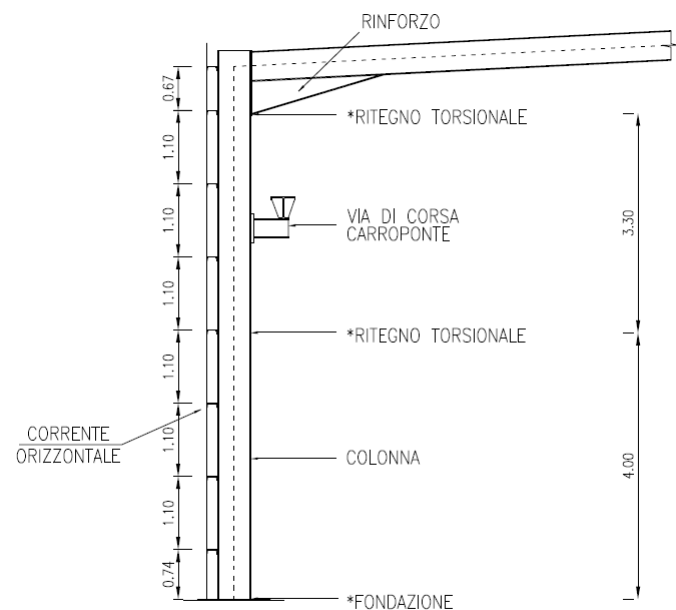


Figura 6. Particolare del passo dei correnti longitudinali e del rinforzo al nodo.

La corretta realizzazione di un rinforzo al nodo colonna-traverso, visibile in Figura 6 risulta importante per i seguenti motivi:

1. la zona di traverso rinforzata rimane sostanzialmente in campo elastico ed in generale all'estremità del rinforzo (assumendo una lunghezza di rinforzo pari a circa il 10% della luce del traverso) si ottiene un momento flettente pari a circa la metà di quello in sommità della colonna. La formazione della prima cerniera plastica è quindi forzata a formarsi all'estremità della colonna mentre la seconda (e nel caso esaminato ultima) si formerà in prossimità della mezzeria del

traverso. Questo porta ad ottenere una certa economia di progetto in quanto la sezione del traverso può essere convenientemente ridotta;

2. non avere la formazione di una cerniera plastica sul traverso in corrispondenza della fine del rinforzo consente di ridurre la sezione del rinforzo (nelle verifiche di instabilità non occorre tener conto della presenza di una cerniera plastica);
3. nelle verifiche allo stato limite di esercizio è possibile tener conto dell'effetto benefico del rinforzo che irrigidendo la zona nodale porta ad una riduzione degli spostamenti verticali e trasversali.

In corrispondenza delle cerniere plastiche l'EC3-1-1 prescrive al § 6.3.5.2 l'adozione di adeguati vincoli torsionali (reagenti su correnti ed arcarecci) del tipo indicato in Figura 7 dove è riportato un esempio di vincolo torsionale per una colonna. Al § 6.3.5.2 l'EC3-1-1 prescrive di verificare la distanza tra tali ritegni utilizzando quanto riportato al § 6.3.5.3 oppure le note informative dell'Anesso BB.3.

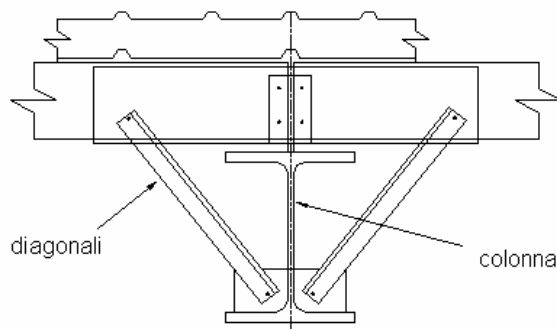


Figura 7. Particolare della realizzazione di un vincolo torsionale sulla colonna.

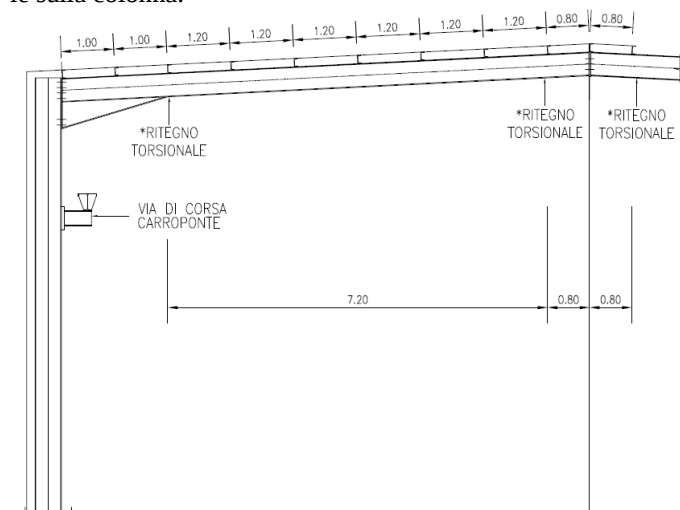


Figura 8. Particolare del passo degli arcarecci.

Risulta chiaro che, essendo la struttura molto snella, le verifiche di stabilità devono essere eseguite in modo accurato ed i passi dei correnti longitudinali e degli arcarecci (visibili nelle Figure 6 ed 8) devono essere assunti in modo da eliminare il rischio di instabilità degli elementi strutturali principali (colonne e traver- si).

Se i vincoli torsionali impongono all'ala interna un vincolo locale sufficientemente rigido, i correnti

e gli arcarecci rappresentano per l'ala esterna un vincolo distribuito lungo lo sviluppo del profilo, il cui effetto può essere convenientemente tenuto in conto nelle verifiche di stabilità degli elementi principali.

Decidere di adottare un passo tra i correnti longitudinali più grande porterebbe, ad esempio, a dover aumentare la sezione della colonna per tutelarsi nei confronti dei fenomeni di instabilità. Quindi, se da un lato questo porterebbe ad un'economia sul numero dei correnti, dall'altro produrrebbe un aumento della quantità di acciaio necessaria per le sezioni delle colonne. La scelta del corretto passo dei correnti e della sezione delle colonne deve quindi essere fatta nell'ottica di conseguire una economia globale della struttura.

5 STUDI COMPARATIVI

Per meglio illustrare le potenzialità del metodo plastico nella progettazione di capannoni monopiano, si confrontano i risultati ottenuti nel caso di tre telai monopiano aventi caratteristiche differenti. Oltre alla resistenza sezionale e alla stabilità, per avere un quadro più completo dei vantaggi, si è considerata anche la verifica di deformabilità in esercizio sotto carichi orizzontali.

Il primo esempio di telaio monopiano è quello presentato in questo lavoro. Si tratta di un telaio di un capannone con un'altezza delle colonne di 8 m in presenza di un carroponte.

Come secondo esempio è stato dimensionato un capannone con le stesse caratteristiche geometriche del capannone precedente (altezza di 8 m, larghezza di 20 m) ma senza carroponte. In questo caso, dopo alcune iterazioni, si giunge a dimensionare sia la colonna che il traverso con profili IPE450.

Come terzo esempio si è considerato il dimensionamento di un capannone avente un'altezza di 6 m con carroponte. Dopo alcune iterazioni si dimensiona sia la colonna che il traverso con dei profili IPE450.

La Tabella 1 mostra le valutazioni in termini di resistenza (γ) e deformabilità (δ/H) dei tre telai considerati. Tutti i telai risultano dimensionati con un moltiplicatore di collasso simile (1.04) e risultano verificati sia a resistenza che a deformabilità. Come si può notare, la verifica di deformabilità risulta penalizzante per il Telaio 1, in cui sia l'altezza che la presenza del carroponte fanno sì che non vi sia un considerevole guadagno nell'utilizzo del metodo plastico per la progettazione.

	γ	δ/H	Verifica
Telaio 1	1.04	1/304	SI
Telaio 3	1.04	1/317	SI
Telaio 2	1.03	1/350	SI

Tabella 1. Risultati degli studi comparativi.

Per il Telaio 2 (senza carroponte) e per il Telaio 3 (di altezza inferiore) la verifica di deformabilità è largamente soddisfatta per cui l'utilizzo del metodo plastico può portare ad un effettivo incremento dell'economicità della costruzione.

CONCLUSIONI

A conclusione del lavoro si riportano alcune considerazioni utili ai fini progettuali:

1. In tutti i casi sviluppati, la prima cerniera plastica è stata forzata a formarsi sulla colonna dalla presenza del rinforzo al nodo. Alternativamente tale cerniera plastica poteva essere posizionata (con un'opportuna scelta della sezione del rinforzo e della colonna) sul traverso alla fine del rinforzo traverso-colonna. Tuttavia, è preferibile che si formi in corrispondenza della colonna, essendo il gradiente di momento, in quella zona, più elevato che sul traverso e quindi la corrispondente cerniera plastica più facile da controllare.
2. Si suggerisce al progettista di considerare nel modo più corrispondente possibile alla realtà l'apporto del rinforzo irrigidente al nodo traverso-colonna (elemento triangolare ricavato dalla stessa sezione del traverso) nelle fasi di verifica agli SLE (deformazioni). Scopo di tale oggetto, è anche quello di limitare le deformazioni verticali ed orizzontali del portale oltre a permettere il trasferimento del momento flettente sollecitante al nodo trave-colonna.

BIBLIOGRAFIA

- Ballio G. & Bernuzzi C., Progettare costruzioni in acciaio - Hoepli, 2004
- Ballio G. & Mazzolani F., Strutture in acciaio - Hoepli, 1982
- Bontempi F., Sgambi L. & Arangio A., Tecnica delle costruzioni. Basi della progettazione. Elementi intelaiati in acciaio - Carocci, 2008
- Colombi P. & Sgambi L. Analisi di una soluzione monopiano con il metodo plastico. ETS pubblicazioni, Novembre 2008.
- Corradi L., Meccanica delle Strutture - la valutazione della capacità portante, McGraw-Hill, 1994
- ECCS, Practical Analysis of Single Storey Frames - ECCS n°61
- Massonet C., Save M., Calcolo Plastico a Rottura delle costruzioni - CLUP, 1993
- Nunziata V., Teoria e pratica delle costruzioni in acciaio - Dario Flaccovio, 1997
- Radogna E.F., Tecnica delle costruzioni 1 - Fondamenti di costruzioni in acciaio - Masson, 1995.
- SCI Publication, Design of Single Span Steel Portal Frames - SCI Publication P252, 2002
- SCI Publication, Design of Steel Portal Frames for Europe - SCI Publication P164, 2001
- SCI Publication, Plastic Design of Single Storey Pitched Roof Portal Frames to EC3 - SCI Publication 147, 1995