5. Coperture in acciaio: applicazione

UNITÀ D1

Le coperture in acciaio, di solito riservate a costruzioni non abitative, hanno tipologie costruttive abbastanza tipiche (▶FIGURA 1). Gli elementi costruttivi ordinari sono:

- i solai;
- le travi, a sezione piena (arcarecci) o di tipo reticolare.

Solai

I solai di falda sono spesso realizzati in lamiera grecata autoportante. L'orditura, che coincide con la direzione dei *canali della grecatura*, è ortogonale alla linea di gronda. Le pendenze ordinarie sono tanto contenute che l'analisi dei carichi può essere condotta direttamente sulla proiezione orizzontale della falda e le lamiere si possono considerare semplicemente inflesse invece che pressoinflesse. Il dimensionamento si esegue con l'aiuto delle schede tecniche fornite dalla ditta produttrice, che fornisce anche il peso superficiale dell'elemento.

Arcarecci

Se l'interasse tra le reticolari è modesto, gli arcarecci sono continui su tre campate. Altrimenti, gli arcarecci sono semplicemente appoggiati su due reticolari consecutive (▶1). L'interasse degli arcarecci è condizionato dalla forma delle travi reticolari di appoggio, essendo opportuno che queste siano caricate soltanto sui nodi. Per luci ordinarie, comprese tra i 4 e i 7 metri, gli arcarecci sono realizzati con profilati della serie IPE, UPN, tubolari, sagomati a freddo. Su luci maggiori si possono disporre arcarecci di tipo reticolare.

Gli arcarecci sono sollecitati a flessione deviata. La tensione massima si ottiene dalla formula:

$$\sigma_{max} = \frac{M \cos \alpha}{W_x} + \frac{M \operatorname{sen} \alpha}{W_y}$$

Per i profili normalmente impiegati il valore di W_y è molto inferiore a quello di W_x; di conseguenza, pur essendo il valore di M sen α assai modesto dato il piccolo valore della deviazione α, le tensioni M sen α / W_y ad esso dovute sono alte. Analogo ragionamento si può fare per i momenti d'inerzia e, quindi, per le deformazioni.

Per arcarecci di grande luce si possono contenere le deformazioni e le tensioni dovute alla sola componente M sen α del momento flettente ricorrendo a un espediente costruttivo: si dispongono nel senso della pendenza due elementi rompitratta che costringono l'arcareccio a lavorare (sul solo piano della falda!) come una trave continua su tre appoggi e non semplicemente appoggiata (▶FIGURA 2).

Travi reticolari

Nella progettazione delle travi reticolari è sempre opportuno rispettare alcune condizioni progettuali; alcune, imposte da esigenze costruttive, altre, da opportunità strutturale. La briglia superiore è in genere inclinata secondo il piano di falda; il corrente inferiore, in genere orizzontale, può essere dotato di una leggera controfreccia per ridurne l'abbassamento sotto carico; le aste di parete vanno disposte in modo che i puntoni siano il più corti possibile, per abbassare la lunghezza libera di inflessione e contenere il pericolo di instabilità al carico di punta.

▶1 Arcarecci contini su due campate sono da evitare perché trasmettono sull'appoggio centrale una reazione (1,25 *pl*) molto più alta che sugli appoggi terminali (0,375 *pl*).

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

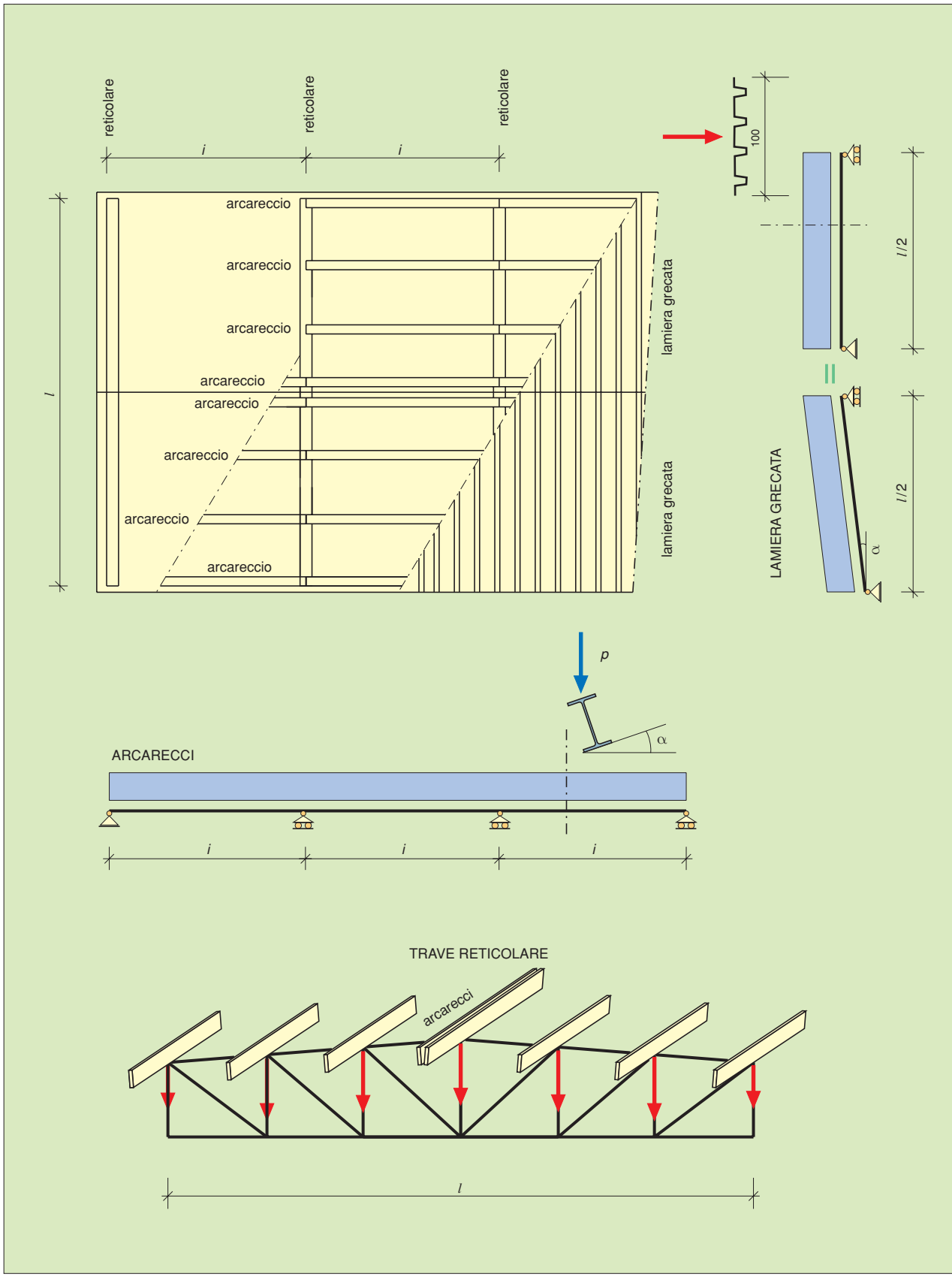


FIGURA 1 Struttura tipica di coperto industriale.

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

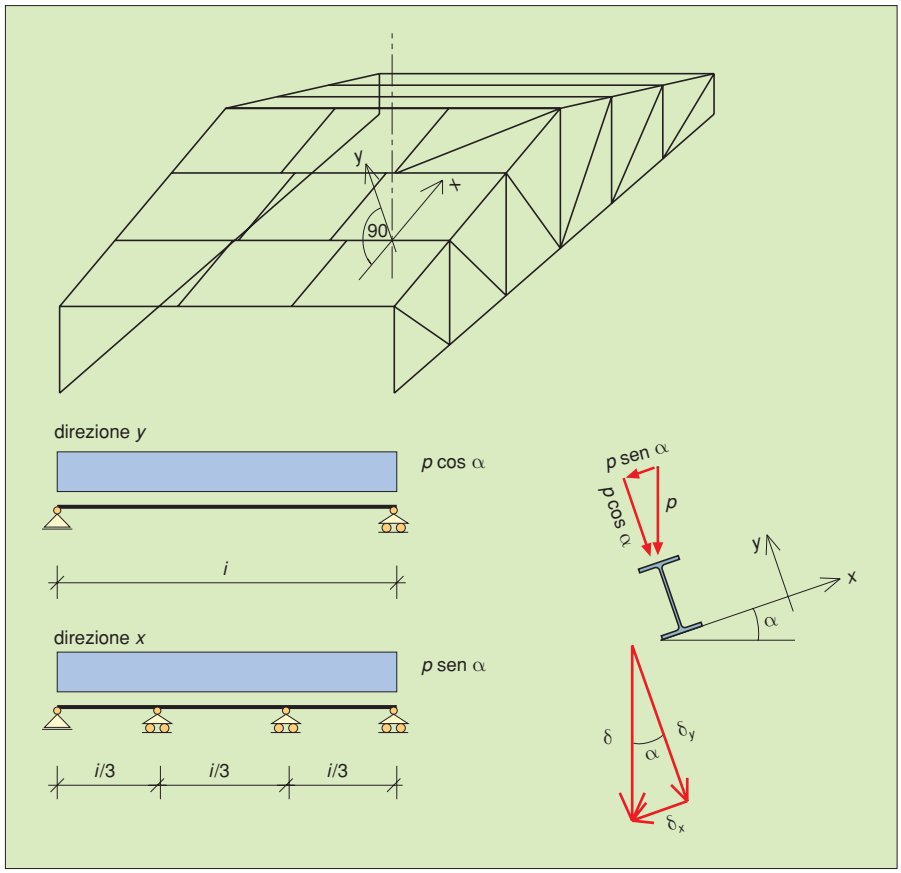


FIGURA 2 Arcarecci ulteriormente vincolati nel piano della falda.

Per potere calcolare la trave secondo il modello reticolare del sistema di bielle (v. unità F2 online, volume 1) occorre che:

1) la trave sia esternamente isostatica e strettamente indeformabile;
2) i carichi siano applicati soltanto in corrispondenza dei nodi;
3) i nodi siano assimilabili a cerniere perfette.

La prima condizione è normalmente soddisfatta se si realizzano travi a generazione triangolare, semplicemente appoggiate ai muri o alle colonne. La seconda condizione presuppone che tutti gli arcarecci siano appoggiati soltanto in corrispondenza dei nodi e che possa essere trascurato il peso proprio delle aste. Quest'ultimo è di solito approssimato a un carico linearmente distribuito sull'intera reticolare, da ripartire nei nodi secondo le rispettive lunghezze di influenza (▶FIGURA 3).

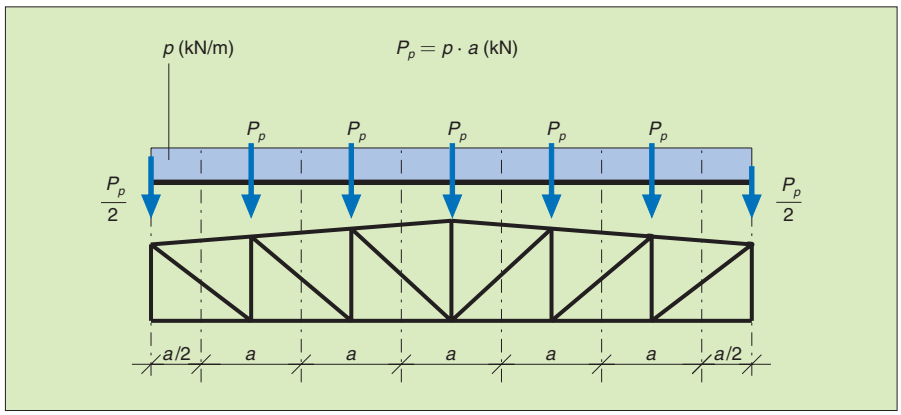


FIGURA 3 Il peso proprio può essere considerato come un carico linearmente distribuito sull'intera trave, da concentrarsi sui nodi.

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

La terza condizione, se non si adottano meccanismi di vincolo molto raffinati, è praticamente impossibile da realizzare. Tuttavia, il funzionamento dei nodi può avvicinarsi a quello di cerniere ideali se si adottano alcuni accorgimenti (approfonditi alla fine del paragrafo): gli assi geometrici delle aste che fanno capo a un nodo devono concorrere nello stesso punto; i baricentri dei collegamenti devono cadere sull'asse geometrico delle aste.

Gli sforzi nelle aste si ricavano con un qualsiasi metodo di equilibrio (dei nodi, delle aste, grafico o analitico) oppure con un programma di calcolo.

La scelta delle sezioni è molto libera; fa eccezione la briglia superiore che, dovendo consentire l'agevole appoggio degli arcarecci, è in genere realizzata con profilati della serie IPE, HE, tubolari o con due profilati opportunamente affiancati della serie L o UPN.

Quest'ultimo tipo di sezione è spesso utilizzato per tutte le aste, perché facilita i collegamenti con le piastre di nodo.

Esempio di calcolo

Dimensionare gli elementi di copertura di un capannone a uso industriale, in acciaio S235, adatto a sopportare un carico neve di 1,28 kN/m^2 (▶FIGURA 4*a*).

Si decide di disporre cinque travi reticolari in senso trasversale. In corrispondenza dei nodi superiori appoggiano gli arcarecci che, a loro volta, sostengono il solaio in lamiera grecata.

Arcarecci

Si decide di utilizzare profilati della serie UPN, di luce l = 4,00 m, semplicemente appoggiati in corrispondenza dei nodi delle capriate.

Analisi dei carichi caratteristici. Vista la modesta pendenza, non è essenziale distinguere tra carichi in proiezione di falda e carichi in proiezione orizzontale.

Lamiera grecata coibentata	0,070 kN/m^2
Neve	1,28 kN/m^2
Totale	1,35 kN/m^2

Analisi lineare dei carichi:

$$p = 1{,}35 \cdot 1{,}50 = 2{,}03 \text{ kN/m}$$

Prima fase: dimensionamento
Viene eseguito a flessione retta. Si ha:

$$M_{max} = \frac{pl^2}{8} = \frac{2{,}03 \cdot 4^2}{8} = 4{,}06 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_{x\,min} = \frac{M_{max}}{\bar{\sigma}_a} = \frac{4{,}06 \cdot 10^6}{160} = 25\,375 \text{ mm}^3 = 25{,}37 \text{ cm}^3$$

Si decide di adottare un profilato UPN 120, sia perché la flessione è in realtà deviata, e quindi più gravosa, sia per assicurare il contenimento della deformazione.

Seconda fase: verifiche di sicurezza (MTA)
- *Materiale*: acciaio tipo S325:

$$\bar{\sigma}_a = 160 \text{ N/mm}^2$$
$$\bar{\tau}_a = 160/\sqrt{3} \text{ N/mm}^2$$
$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$$

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

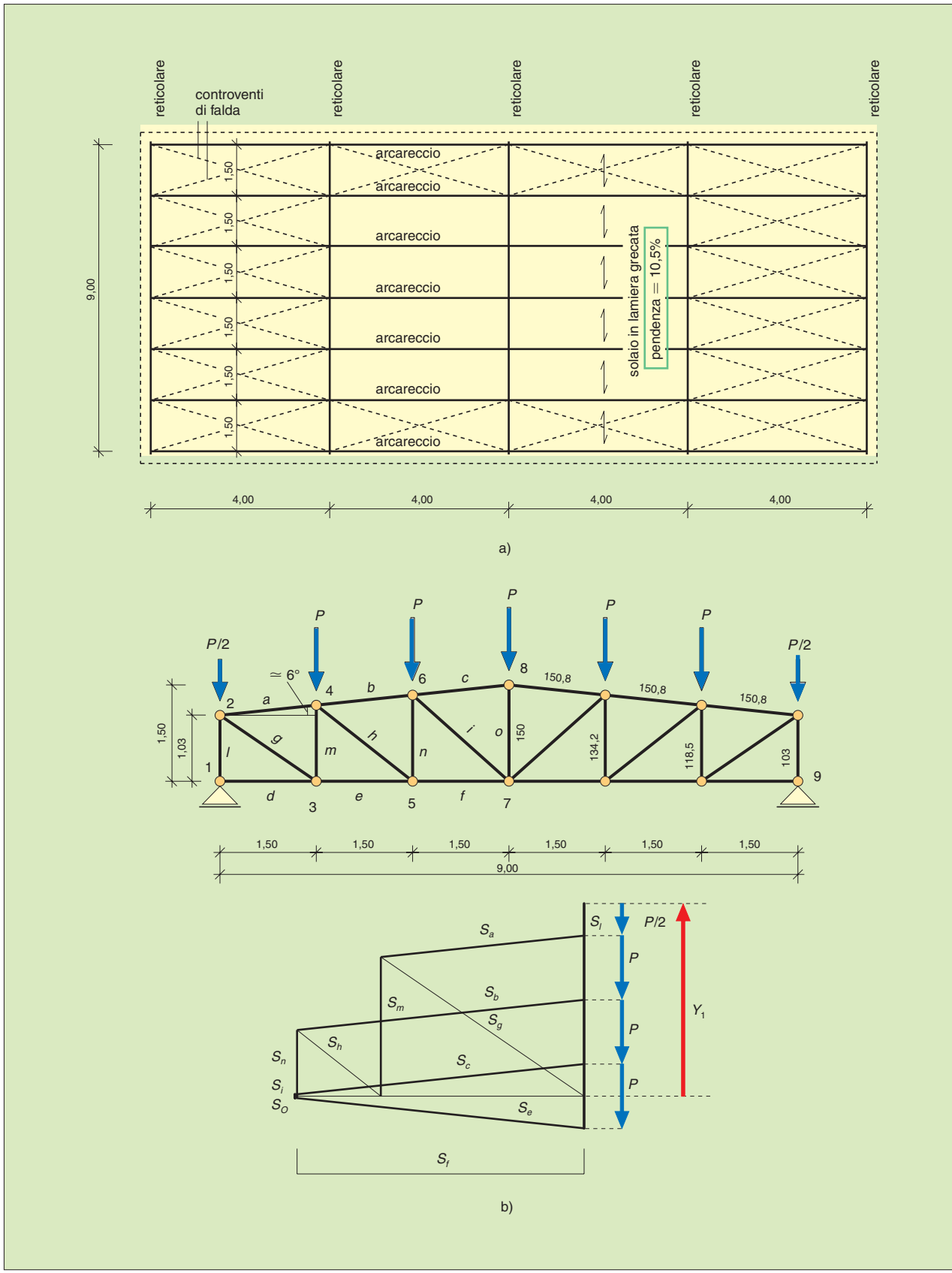


FIGURA 4 (*a*, *b*) Progetto di copertura per capannone industriale.

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

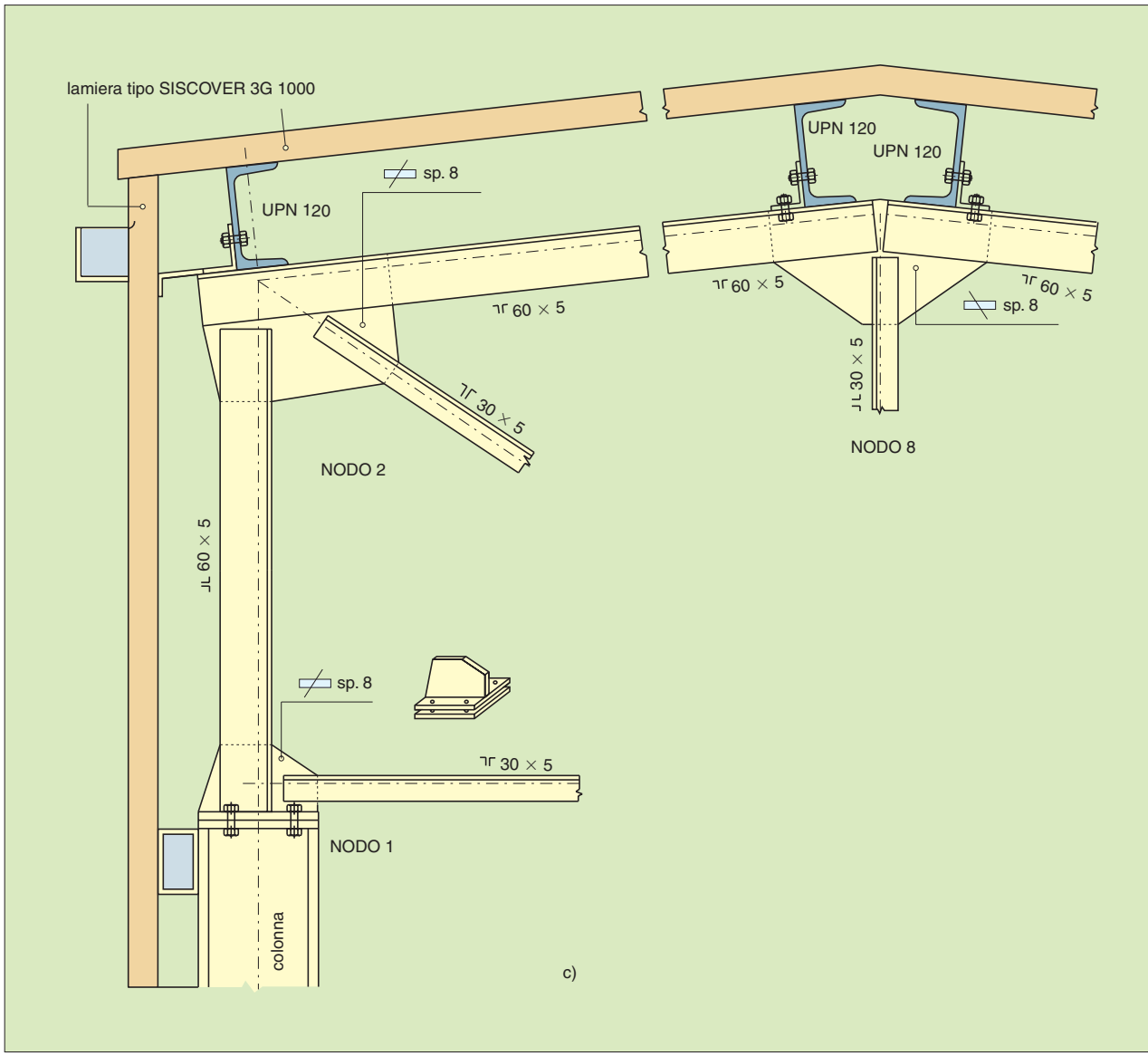


FIGURA 4 (c) Particolari dei nodi 1, 2, 8.

- *Sezione*: UPN 120:

peso proprio: 0,133 kN / m

$W_x = 60{,}7\ \text{cm}^3$ $\quad W_y = 11{,}1\ \text{cm}^3$

$I_x = 364\ \text{cm}^4$ $\quad I_y = 43{,}1\ \text{cm}^4$

$h = 12\ \text{cm}$

$s_a = 0{,}7\ \text{cm}$

- *Modello di calcolo*. Schema statico: trave semplicemente appoggiata:

$l = 4{,}00\ \text{m}$

$p = 0{,}133 + 2{,}03 = 2{,}16\ \text{kN / m}$

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

- *Azioni di progetto* (deviate di $\alpha \cong 6°$):

$$M_d = \frac{pl^2}{8} = 4{,}32 \text{ kN} \cdot \text{m} \qquad \text{in mezzeria}$$

$$V_d = \frac{pl}{2} = 4{,}32 \text{ kN} \qquad \text{sugli appoggi}$$

- *Verifiche di resistenza*. A flessione, in mezzeria:

$$\sigma_{max} = \frac{M_d \cos\alpha}{W_x} + \frac{M_d \operatorname{sen}\alpha}{W_y} = 70{,}8 + 40{,}7 = 111{,}5 \text{ N/mm}^2 < \bar{\sigma}_a$$

A taglio, sugli appoggi:

$$\tau_{max} = \frac{V_{max}}{s_a(h - 2t_{\max})} = 6{,}3 \text{ N/mm}^2 < \bar{\tau}_a$$

- *Verifica di deformabilità*. Deve essere:

$$\delta_{\max} = \frac{l}{200} = 20 \text{ mm}$$

determinata dal carico totale. Si ha:

$$\delta_{dy} = \frac{5}{384}\frac{p\cos\alpha\, l^4}{EI} = 9{,}6 \text{ mm}$$

$$\delta_{dx} = \frac{5}{384}\frac{p\operatorname{sen}\alpha\, l^4}{EI} = 8{,}5 \text{ mm}$$

$$\delta_{d\,max} = \sqrt{\delta_{dx}^2 + \delta_{dy}^2} = 12 \text{ mm} < \delta_{max}$$

Travi reticolari

Lo schema di calcolo è quello della ▶FIGURA 4*b*. Gli arcarecci intermedi scaricano sul nodo superiore di ogni trave una forza pari alla reazione cambiata di segno:

$$Y = 4{,}32 \text{ kN}$$

Sui nodi interni di ogni trave intermedia, su cui appoggiano due arcarecci consecutivi, insiste la forza:

$$2Y = 2 \cdot 4{,}32 = 8{,}64 \text{ kN}$$

Il peso proprio presunto della trave può essere considerato pari a 0,9 kN/m e concentrato in corrispondenza dei nodi superiori. Si ha quindi:

$$P = 8{,}64 + 0{,}9 \cdot 1{,}5 = 10 \text{ kN}$$

Sui due nodi esterni insiste un carico concentrato pari a $P/2$.

Gli sforzi nelle aste possono essere determinati con metodo grafico, con metodo analitico o con un programma di calcolo come 3D di *Travilong Titanium*. Si hanno comunque i risultati riportati nella ▶TABELLA 1.

Tutte le aste saranno realizzate accoppiando due profilati della serie L, posti alla distanza di 0,8 cm pari allo spessore dei fazzoletti di nodo.

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

TABELLA 1 Sforzi nelle aste

Briglia superiore		Briglia inferiore		Diagonali		Montanti	
Asta	Sforzo (kN)	Asta	Sforzo (kN)	Asta	Sforzo (kN)	Asta	Sforzo (kN)
a	−31,83	*d*	0	*g*	+38,36	*l*	−30,00
b	−44,94	*e*	+31,65	*h*	+16,32	*m*	−21,67
c	−45,27	*f*	−44,70	*i*	+0,43	*n*	−10,30
						o	− 0,53

• *Briglia superiore (compressa)*. Si adottano due profili accoppiati L 60 × 5, da verificare a carico di punta.

Disponendo due calastrelli per ogni asta, questa risulterà suddivisa in tre campi uguali di lunghezza 50,3 cm. Deve essere:

$$\sigma = \frac{\omega N}{A} \leq \bar{\sigma}_a$$

Per valutare la snellezza nel piano della travatura si deve assumere $l_0 = l$. Nel piano perpendicolare si può ancora assumere $l_0 = l$ solo se si predispongono all'estremità di ogni asta ritegni trasversali sufficientemente rigidi (detti *controventi di falda*), in modo da impedire lo spostamento dei nodi. In tale caso si ha:

$$N = 45{,}28 \text{ kN}$$

$$A = 2 \cdot 5{,}82 = 11{,}64 \text{ cm}^2$$

$$i_{min} = i_x = i_{0x} = 1{,}82 \text{ cm}$$

$$\lambda_{max} = \frac{l_0}{i_{min}} = 150{,}81{,}82 = 83 \rightarrow \text{(tabella Acc13, curva c)} \rightarrow \omega = 1{,}67$$

e, sostituendo:

$$\sigma_{max} = \frac{1{,}67 \cdot 45{,}28}{11{,}64} \cdot 10 = 64{,}9 \text{ N/mm}^2 < \bar{\sigma}_a$$

• *Briglia inferiore (tesa)*. Si adottano per tutte le aste due profili accoppiati L 30 × 5, da verificare a trazione semplice. Deve essere:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}_a$$

Si ha:

$$N = 44{,}70 \text{ kN}$$

$$A = 2 \cdot 2{,}78 = 5{,}56 \text{ cm}^2$$

e, sostituendo:

$$\sigma_{max} = \frac{44{,}70}{5{,}56} \cdot 10 = 80{,}4 \text{ N/mm}^2 < \bar{\sigma}_a$$

• *Diagonali (tese)*. Si decide di adottare anche per queste aste due profili accoppiati L 30 × 5. La verifica a trazione semplice è superflua, essendo tali aste soggette a uno sforzo normale (N = 38,36 kN) più piccolo di quello cui è sottoposto, a parità di area resistente, il corrente inferiore.

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

• *Montanti (compressi)*. Si deve adottare una sezione che limiti la snellezza del montante o (il più lungo) a un valore accettabile: per esempio, 150. Per il calcolo della snellezza si può assumere $l_0 = l$ sia nel piano della travatura sia nel piano ortogonale. Deve dunque essere:

$$150 = \frac{l_0}{i_{min}}$$

e quindi:

$$i_{min} = \frac{l_0}{150} = \frac{150}{150} = 1 \text{ cm}$$

Si decide di assegnare ai montanti la stessa sezione della briglia superiore (due L 60 × 5), che garantisce certamente la resistenza.

Nodi

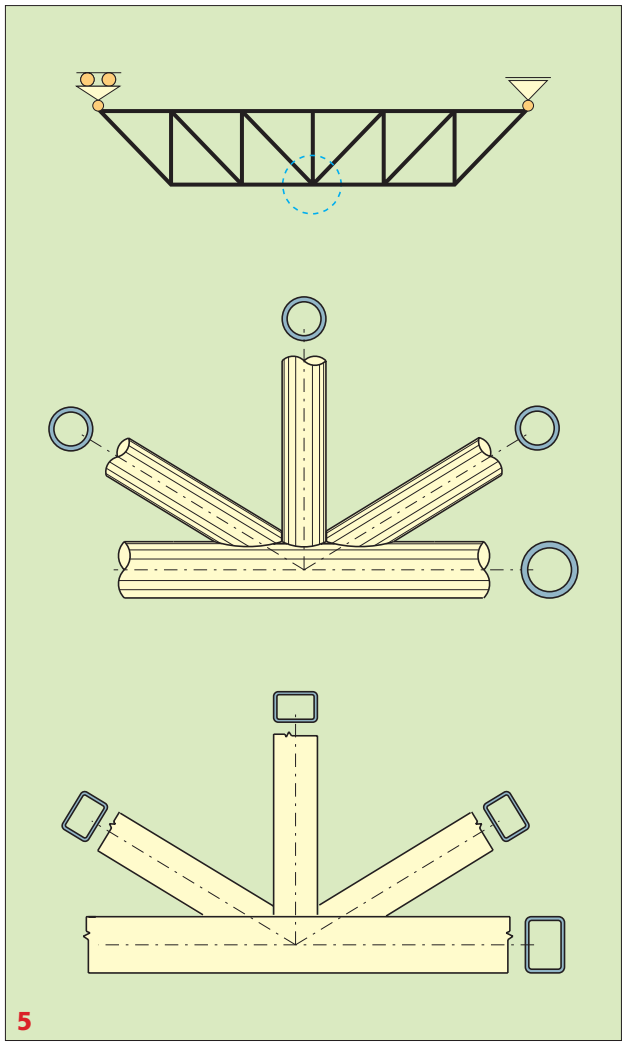
Perché la trave corrisponda al modello del sistema di bielle, le unioni devono essere nodi cerniera.

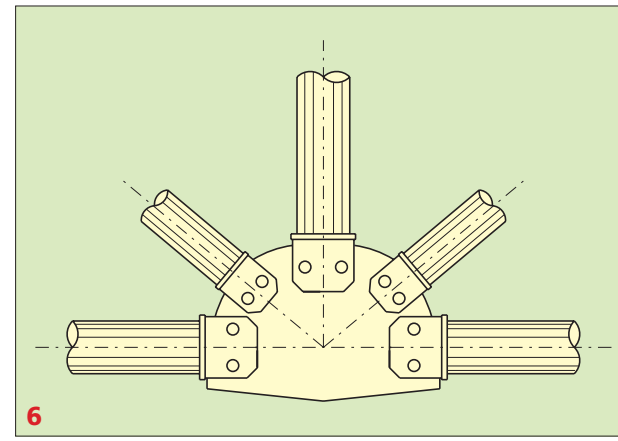
Nelle reticolari di modesto impegno statico le aste possono essere saldate direttamente tra loro (▶FIGURA 5); altrimenti, le unioni sono realizzate mediante piastre di nodo, per avere a disposizione la superficie necessaria a saldature

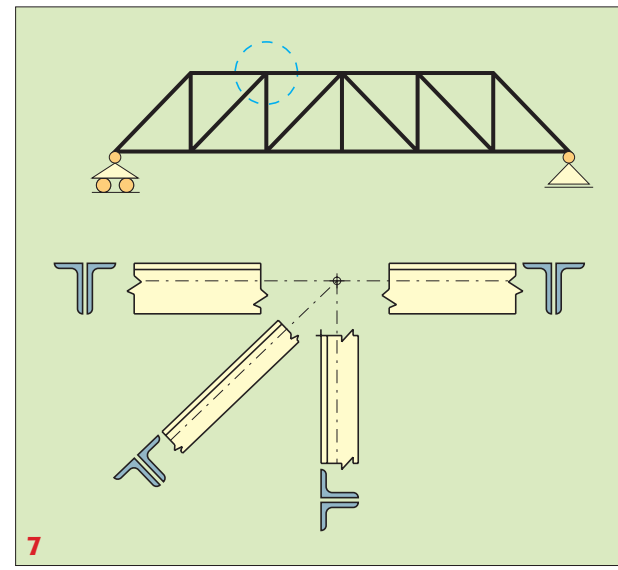
FIGURA 5 Nodo reticolare con aste saldate tra loro.

FIGURA 6 Nodo reticolare con aste bullonate su piastra.

FIGURA 7 Gli assi geometrici delle aste devono convergere nel nodo.







Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

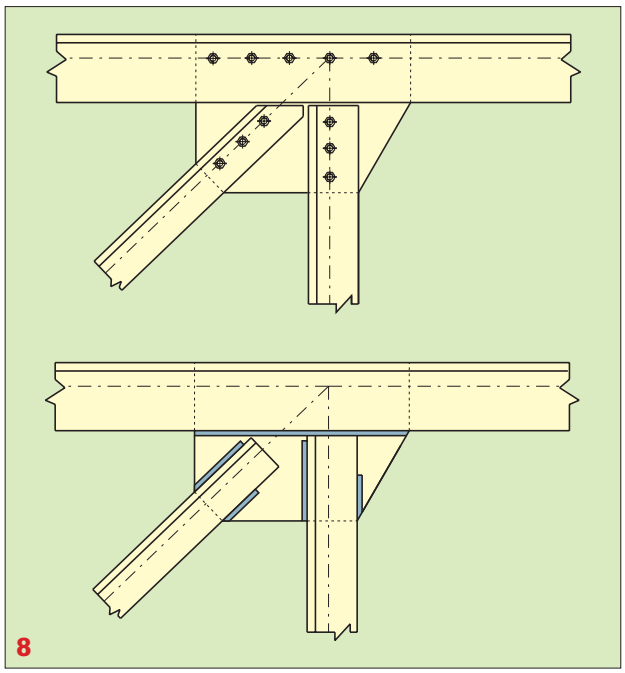
FIGURA 8 I baricentri delle bullonature e delle saldature devono cadere sugli assi delle aste.

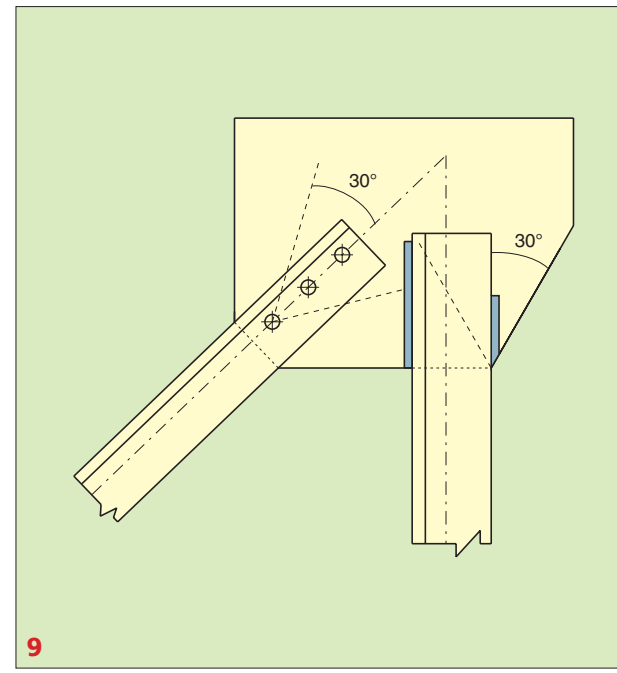
FIGURA 9 Le piastre di nodo devono essere realizzate in dimensioni il più possibile piccole.

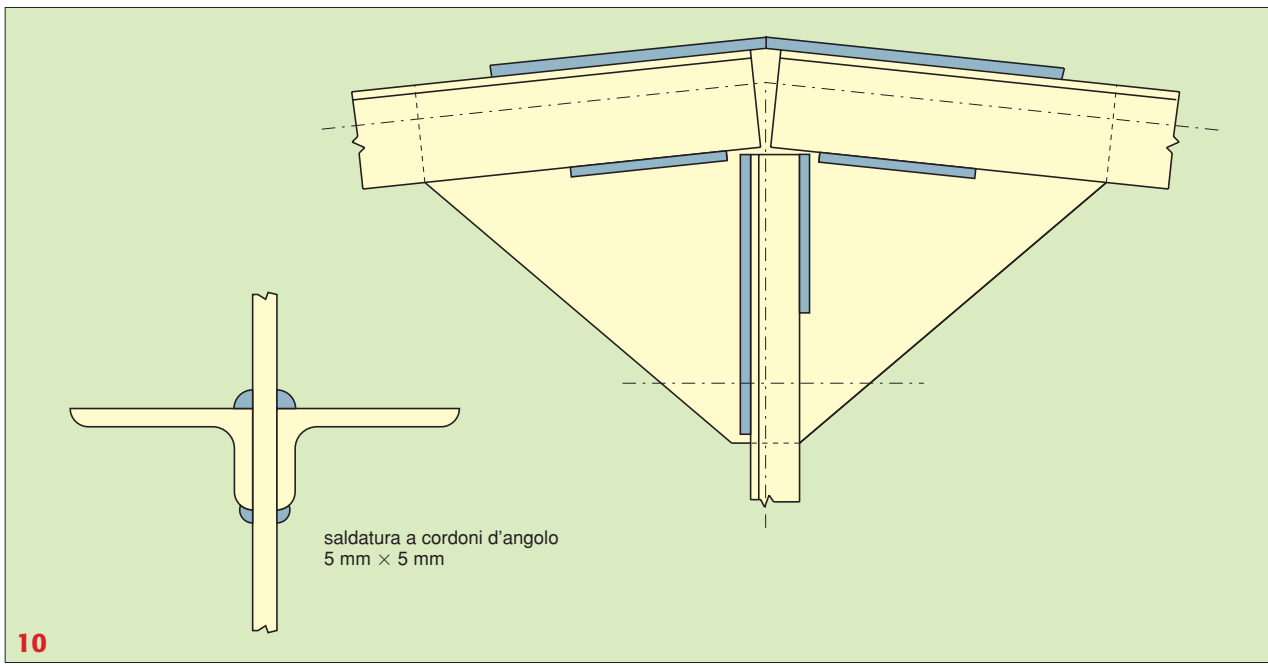
FIGURA 10 Nodo di trave reticolare saldato su piastra.

e bullonature efficienti (▶FIGURA 6). Perché il funzionamento di questi nodi non si discosti troppo da quello della cerniera perfetta, bisogna curare che gli sforzi nelle aste e nei collegamenti non generino momenti secondari o parassiti rispetto al punto ideale di nodo. A tal fine, devono essere rispettati per quanto possibile i seguenti accorgimenti:

- gli assi geometrici delle aste devono essere concorrenti (▶FIGURA 7);
- i baricentri dei collegamenti devono cadere sull'asse dell'asta (▶FIGURA 8); per le saldature bisogna quindi differenziare le lunghezze dei cordoni in modo che questi siano inversamente proporzionali alle rispettive distanze dall'asse geometrico;







Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*

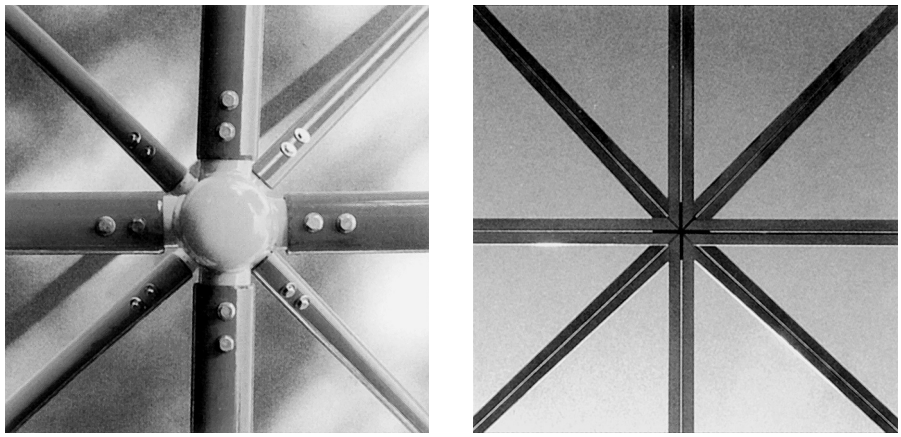


FIGURA 11 Nodi commercializzati da ditte specializzate.

- le piastre di nodo devono essere meno rigide e quindi meno estese possibile. Si può ritenere, a tale proposito, che gli sforzi nei bulloni o nei cordoni di saldatura si diffondano nella piastra secondo un angolo di 30° rispetto all'asse dell'asta; ciò consente di dare alle piastre una forma razionale (▶FIGURA 9).

La ▶FIGURA 10 rappresenta il nodo di colmo (nodo 8) della trave studiata in questo paragrafo.

Oltre ai collegamenti di tipo tradizionale, realizzati saldando o bullonando le aste alle piastre, si realizzano nodi particolarmente raffinati, coperti da brevetto, soprattutto adatti a strutture reticolari da lasciare a vista (▶FIGURA 11).

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [5929]
Questo file è una estensione online del corso Zavanella, Leti, Veggetti, *Progettazione, costruzioni e impianti*