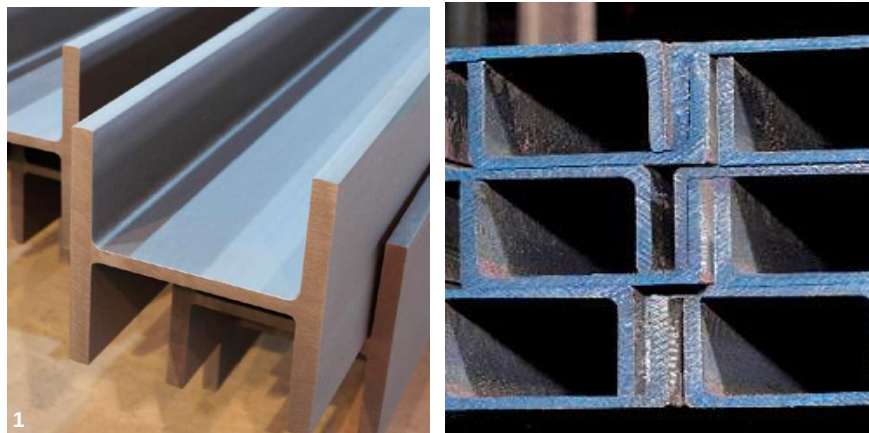


QUADERNI DI PROGETTAZIONE STRUTTURALE

2: PROGETTAZIONE CON PROFILI APERTI LAMINATI A CALDO - TRAVI

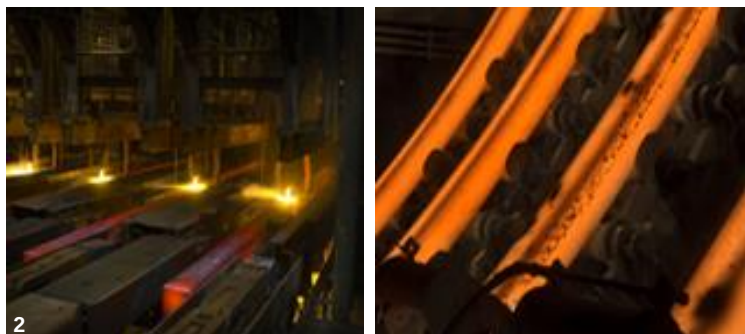


LE TRAVI LAMINATE



Molti architetti e professionisti del mondo delle costruzioni ricordano e associano l'immagine della classica “putrella” a quella delle strutture in acciaio da sempre impiegate nell'edilizia.

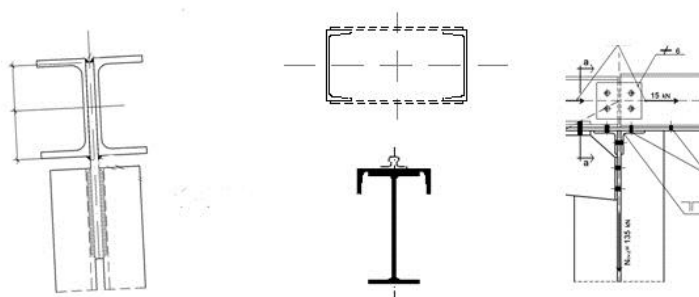
Richiamando quest'immagine, è proprio dalla sagoma a doppio “T” che vorrebbe partire il nostro approfondimento sulle travi laminate. La ricerca e la sperimentazione hanno impiegato molte risorse nel settore, passando a tecnologie e processi produttivi notevolmente evoluti rispetto al passato, mantenendo nel tempo praticamente inalterate le geometrie originarie di questi profili, ampliando però la gamma degli elementi disponibili.



I processi produttivi delle travi laminate presentano al giorno d'oggi nuove modalità, tutte regolate da apposite normative. I risultati della ricerca hanno permesso di produrre elementi strutturali in acciaio con resistenze migliorate agli agenti atmosferici o con risposte alle sollecitazioni meccaniche sempre più performanti.



Un aspetto vincente risiede nelle geometrie delle sezioni, anch'esse normate, caratterizzate dalla facoltà di garantire una facile accoppiabilità tra elementi differenti, quali ad esempio pilastro-pilastro, trave-pilastro, trave-trave o tra gli stessi elementi per creare nuove sezioni.



Gli utilizzi sono praticamente illimitati; un'applicazione interessante delle travi laminate in acciaio, in campo edile, è legata alla realizzazione di edifici monopiano ad uso industriale.

In questo caso emergono alcune peculiarità che rendono l'acciaio adatto alla realizzazione di edifici di questa tipologia, sebbene non sufficientemente noto ai più.

Alla rapidità di montaggio degli elementi in acciaio, infatti, è strettamente connessa una maggiore pulizia del cantiere, proprio per l'unica necessità, per realizzare l'edificio, di assemblare i profili tra di loro, diversamente da quanto avviene per i sistemi costruttivi tradizionali (non bisogna dimenticare che la maggior parte delle operazioni viene **svolta in officina**, alleggerendo, di fatto, l'attività di cantiere).



Considerando la struttura portante, poi, si aggiungono **ulteriori aspetti positivi**.

In ambito industriale, dove la **flessibilità**, la **riduzione dei tempi** per l'entrata in funzione di un impianto e i **futuri ampliamenti** sono fondamentali, un approccio di questo tipo può davvero fare la differenza.

I vantaggi nell'utilizzo di travi piene per questi scopi sono molteplici. Oltre ad essere facilmente reperibili, i procedimenti di giunzione sono semplici e collaudati e, infine, processi quali trasporto e zincatura a caldo sono facilitati dalle dimensioni.



Se si vogliono utilizzare travi laminate, come ad esempio profili IPE o HE, si possono raggiungere tranquillamente **luci dai 15 ai 30 metri**, senza appoggi intermedi.

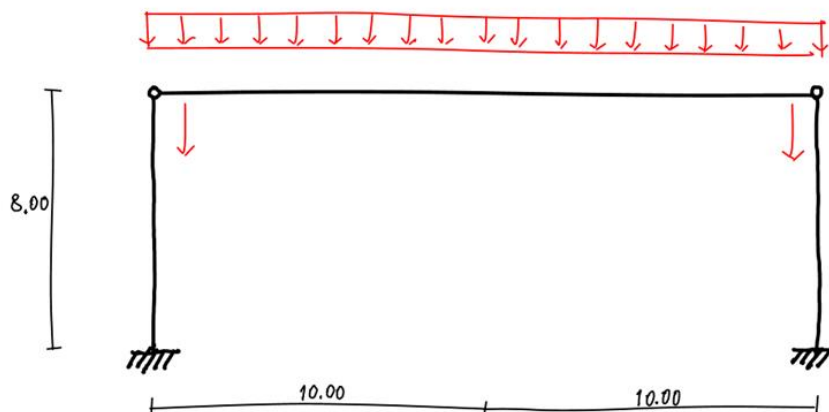
Sembrerà strano ma, ancora oggi, profani e non pochi professionisti ritengono che uno degli **aspetti più temuti** dell'acciaio sia la sua **resistenza al fuoco** ed i costi da sostenere per rispettare i requisiti delle normative antincendio.

In realtà, tali paure sono infondate! Occorrono pochi accorgimenti per poter realizzare un edificio sicuro e con ridotti costi di costruzione e gestione. Una risposta ottimale a tale esigenza la si ritrova nelle travi laminate.

Cercheremo di chiarire questo concetto con qualche esempio.

Si supponga di dover progettare un edificio industriale monopiano in acciaio, dovendone curare anche gli aspetti di resistenza al fuoco.

Per facilità di analisi si può tranquillamente immaginare uno schema statico caratterizzato da colonne incastrate al piede e travi di copertura incernierate agli elementi sottostanti.



Un'ottima copertura per un capannone industriale può essere realizzata con **lamiera grecata** o con pannelli **sandwich**. Si può così immaginare che agisca, sulle travi di copertura, un carico indicativo di $0,20 \text{ kN/m}^2$.

Consideriamo i carichi accidentali: quelli derivanti dalla manutenzione, per cui basterà aggiungere $0,5 \text{ kN/m}^2$, e la neve, con un carico medio di $1,2 \text{ kN/m}^2$. Per semplicità non vengono messi in conto gli effetti del vento, in modo da rendere agevole un approccio "manuale" all'intera procedura di calcolo. Questa modalità è però sufficiente a definire il problema e identificare l'ordine di grandezza delle variabili che entrano in gioco.

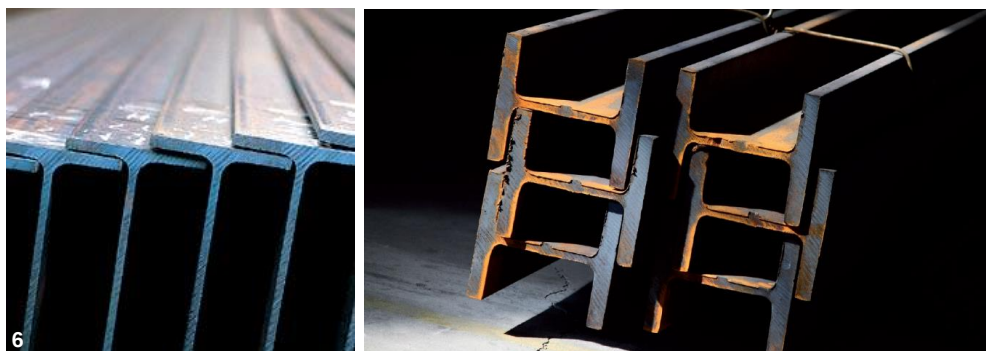
In fase di progettazione, ovviamente, è possibile tener conto di ogni altro carico agente mediante l'impiego dei software normalmente in commercio.

Con queste premesse, diventa ancor più interessante analizzare cosa può accadere con diverse conformazioni dei telai, variando luci e interassi.

Ad esempio, se si avesse un edificio monopiano con una **luce di 10m** e telai posti a un **interasse di 4m**, cosa accadrebbe se si impiegassero elementi strutturali **senza alcuna protezione al fuoco**?

Impiegando colonne del tipo IPE 300, si riuscirebbe a raggiungere una classe di resistenza al fuoco di **R45**.

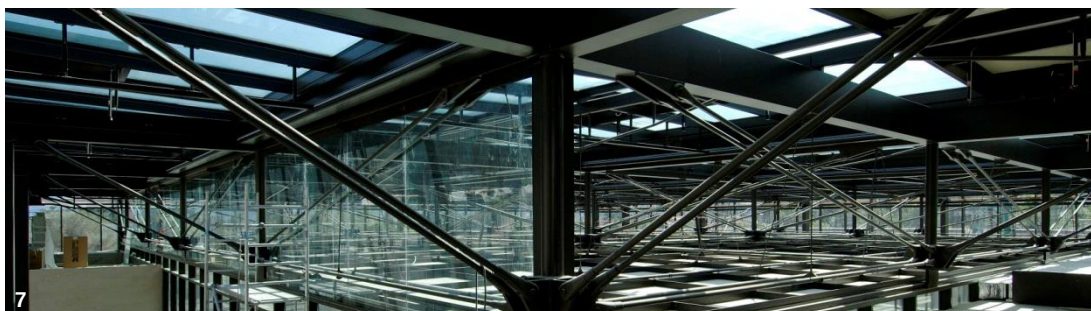
Con lo stesso profilo per le travi di copertura, si può tranquillamente arrivare a una classe di **R30**.



Mantenendo **inalterate luci e interassi dei telai**, si può dare all'intera struttura una resistenza al fuoco pari a **R45**, intervenendo esclusivamente sulle travi mediante una vernice intumescente con spessore dell'ordine dei 500 micron.

Volendo fornire una resistenza al fuoco di R60, entrambi gli elementi strutturali possono essere protetti con uno spessore minimo di fibre minerali a spruzzo o con adeguato spessore di vernici ignifughe.

Aumentando lo spessore di fibre minerali a spruzzo, è facile superare la resistenza di R120 per l'intero edificio.



Variando l'**interasse tra i telai**, incrementandolo a **5,5m** (lasciando invariata la luce di 10m), come sarebbe la nostra struttura?

Per le colonne, un profilo HEA 160 ci garantisce resistenza al fuoco di **R45** ancora **senza applicare alcuna protezione**.

Un profilo IPE O 300 per le travi, invece, consente di arrivare agevolmente a **R30**, sempre **senza protezione**.

Per ottenere una resistenza al fuoco pari a R45 per l'intera struttura, basterà intervenire esclusivamente sulle travi mediante una vernice intumescente con spessore dell'ordine dei 500 micron.

L'applicazione di un adeguato spessore della stessa vernice ignifuga (o uno spessore minimo di fibre minerali a spruzzo) consente di ottenere una classe di resistenza al fuoco pari a R60 per travi e pilastri.

Se si volesse giungere a una resistenza di almeno R120 per tutti gli elementi, basterà proteggere la struttura con fibre minerali a spruzzo come visto nel precedente esempio.



8

Infine, consideriamo un capannone di medie dimensioni, con una **luce di 20m** e **interasse** dei telai pari a **5,5m**.

Utilizzando colonne con profili HEB 220 **senza protezione**, si ottiene una classe di resistenza al fuoco ancora **R45**.

Se per le travi si impiegano profili del tipo IPE 550, si riesce ad ottenere una classe di resistenza al fuoco pari a **R30, senza protezione aggiuntiva**.

Impiegando una protezione con vernice ignifuga (spessore dell'ordine dei 500 micron) solamente sulle travi, l'intera struttura potrà guadagnare una classe di resistenza al fuoco di **R45**.

Analogamente ai casi precedenti, è semplice, per l'intero edificio, giungere a una resistenza al fuoco di R60 (applicando vernici intumescenti o il minimo di fibre minerali a spruzzo) o superare il valore di R120 (mediante protezione in fibre minerali a spruzzo).



Quanto visto finora si basa su ipotesi di calcolo molto cautelative, con schemi statici dei telai semplificati (colonne incastrate alla base e travi incernierate), senza sollecitazioni orizzontali, in modo da usare un semplice strumento grafico quale il “nomogramma”, di facile lettura e impiego, unicamente per lo scopo di questo “quaderno”.

→ **Nomogramma – metodo di valutazione della resistenza al fuoco di strutture in acciaio**

→ **Pubblicazioni relative alla sicurezza in caso di incendio per le strutture in acciaio e composte**

Tutto ciò, sebbene in maniera approssimata, dimostra come sia semplice, per una struttura in acciaio, arrivare a classi di resistenza al fuoco di tutto rispetto impiegando una minima protezione antincendio (quali intonaci o vernici intumescenti), **se non addirittura eliminandola del tutto.**

L'uso di appositi software di calcolo, che tengono conto delle sollecitazioni meccaniche in funzione del carico e del tempo di incendio e per ogni schema statico scelto, **consente di ridimensionare ed ottimizzare** ampiamente **le geometrie dei profili in acciaio, mantenendone inalterate o incrementando le caratteristiche di resistenza al fuoco.**

➔ Per approfondire l'argomento è possibile visitare questo link su www.promozioneacciaio.it

Gli esempi visti **confermano così la flessibilità e la convenienza** (sia economica che costruttiva) di un sistema costruttivo basato sull'utilizzo di travi laminate rispetto ad altri sistemi costruttivi.

➔ Allegato tecnico: analisi numerica effettuata

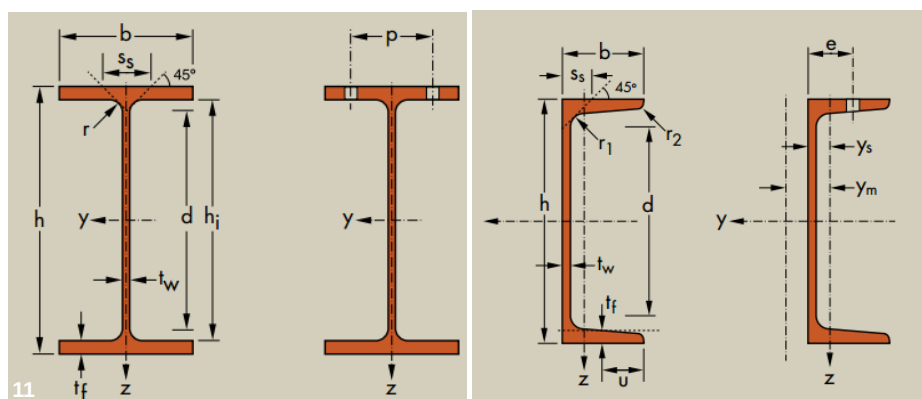


Questa breve panoramica è servita a dimostrare l'utilità dell'uso delle travi laminate in edilizia. Si tratta di un impiego che non si limita all'ambito degli edifici monopiano, bensì raggiunge l'apice negli edifici multipiano e nelle infrastrutture.

Approfondiamo, allora, la conoscenza di questa gamma di prodotti.

Le travi laminate, largamente impiegate nelle strutture portanti, sono dei *“prodotti lunghi laminati a caldo la cui sezione ricorda quella delle lettere I, U e H (poligoni concavi) e la cui anima ha un'altezza uguale o superiore a 80 mm...”* (tratto dalle documentazioni diffuse dalla *“Comunità europea del carbone e dell'acciaio”* (CECA) riguardo ai prodotti in acciaio).

Questi profili condividono le seguenti caratteristiche: la superficie delle anime è raccordata mediante arrotondamenti alle facce interne delle ali, le quali sono parallele, simmetriche e di spessore costante o decrescente all'allontanarsi dall'anima (norme UNI EN 10034 e UNI EN 10279).



La normativa che definisce le condizioni tecniche di per i prodotti lunghi di acciai laminati a caldo per impieghi strutturali è la UNI EN 10025. E' bene sottolineare che **tutti questi elementi sono sottoposti a marcatura CE, garanzia di qualità e sicurezza.**

La normativa UNI EN 10025 distingue cinque tipologie di acciai in funzione del procedimento produttivo utilizzato, della classe di acciaio e delle condizioni di fornitura:

- acciaio non legato "As rolled" (AR) (parte 2);
- acciaio non legato a grano fine con trattamento di normalizzazione (N) (parte 3);
- acciaio non legato a grano fine ottenuto mediante laminazione termomeccanica (M) (parte 4);
- acciaio con resistenza migliorata alla corrosione atmosferica "Weathering" (W) (parte 5);
- acciaio ad alto limite di snervamento bonificato "Quench and tempered" (Q) (parte 6).

E' interessante evidenziare che anche le Norme Tecniche (NTC 2018), al capitolo 11, richiamano questi prodotti:

"... Gli acciai laminati di uso generale per la realizzazione di strutture metalliche e per le strutture composte comprendono: Prodotti lunghi [...]; travi ad ali parallele del tipo HE e IPE, travi IPN; laminati ad U)... OMISSIS".

Ne esiste una **varietà davvero elevata**, che ne consente un impiego ottimizzato per prestazioni meccaniche, ingombri geometrici e accoppiamenti dimensionali tra elementi diversi.



Quanto scritto finora è semplicemente un “assaggio” delle potenzialità di questa tipologia di elementi strutturali in acciaio. Per andare oltre, basterebbe richiamare alla memoria i capolavori dei grandi architetti del passato e contemporanei, i quali, nella costante ricerca di eleganza e leggerezza, si sono affidati alle incredibili possibilità offerte dal mondo dell'acciaio.

➔ **Sagomario dei profili**



CREDITS FOTOGRAFICI

Copertina: Palazzo Tendenza – Complesso “Net Center” – Aurelio Galfetti con Carola Barchi e AU Studio Architetturaurbanistica – Foto: Enrico Cano

1 a sinistra: ArcelorMittal; a destra: Peiner Träger

2 Duferdofin-Nucor

3 Stefana

4 Stahlbau Pichler

5 a sinistra: Bauforumstahl; a destra: Poly Costruzioni

6 a sinistra: Peiner Träger; a destra: Commerciale Siderurgica Bresciana

7 Terme di Merano – Matteo Thun

8 Florim Gallery – Luigi Romanelli Architetto

9 Sede Dexia – Vasconi Associes

10 Palazzo Tendenza – Complesso “Net Center” Padova – Aurelio Galfetti con Carola Barchi e AU Studio Architetturaurbanistica – Foto: Enrico Cano

11 ArcelorMittal

12 a sinistra: Fondazione Promozione Acciaio; a destra: Astori

13 Edificio “La Serenissima” – Park Associati – foto: Andrea Martiradonna

QUADERNI DI PROGETTAZIONE

STRUTTURALE

2: PROGETTAZIONE CON PROFILI APERTI LAMINATI A

CALDO - TRAVI

ALLEGATO TECNICO

In questo allegato tecnico verranno mostrate in dettaglio le modalità di calcolo di quanto già sinteticamente esposto nel “quaderno” sulle travi laminate.

Le ipotesi di partenza sono quelle di un capannone industriale, con sistema portante in acciaio e copertura in pannelli sandwich.

Lo schema statico dei telai è quello di colonne incastrate alla base e travi di copertura incernierate alla sommità dei pilastri.

Si sceglie di far variare la luce tra i 10 e i 20 metri e l'interasse dei telai tra i 4 e i 5,5 metri, in modo da dimensionare gli elementi strutturali.

DEFINIZIONE DEI CARICHI

I carichi agenti sull'edificio monopiano sono:

- peso proprio di travi e pilastri;
- peso proprio dei pannelli sandwich e relativa sottostruttura di supporto, pari a $0,20 \text{ kN/m}^2$;
- manutenzione, pari a $0,50 \text{ kN/m}^2$;
- azione della neve, con un carico medio al suolo pari a $1,20 \text{ kN/m}^2$; considerando un coefficiente di forma $\mu_1=0,8$ (inclinazione della falda tra 0° e 30°), si ha un carico neve in copertura pari a $0,96 \text{ kN/m}^2$;
- le azioni del vento non vengono qui considerate, in modo da facilitare un predimensionamento strutturale di tipo “manuale”.

VERIFICHE

In base al D.M. 14/01/2008 – NTC 2008, le combinazioni delle azioni elementari sono esprimibili in modo simbolico come:

$$F_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_{Q1} Q_{k1}$$

dove G_{kj} sono i carichi permanenti, mentre con Q_{k1} si indicano i carichi variabili (in questo caso solo la neve).

I coefficienti parziali di sicurezza, per il *calcolo agli S.L.U.*, valgono:

$$\gamma_{Gj} = 1,3; \quad \gamma_{Q1} = 1,5$$

Il carico agente sulla singola trave di copertura sarà pertanto nella forma:

$$F_d = 1,3 \cdot G_{pesotrave} + 1,3 \cdot G_{pesopannelli} + 1,5 \cdot Q_{neve}$$

Il corrispondente carico distribuito è legato all'interasse tra i telai i :

$$q_d = 1,3 \cdot G_{pesotrave} + (1,3 \cdot G_{pesopannelli} + 1,5 \cdot Q_{neve}) \cdot i$$

Alla sommità dei corrispondenti pilastri, si avrà, avendo una luce l :

$$N'_d = 1/2 \cdot q_d \cdot l$$

Alla base della colonna di altezza h , il carico varrà pertanto:

$$N_d = N'_d + 1,3 \cdot G_{pesopilaastro} \cdot h$$

Per quanto riguarda le *verifiche agli S.L.E.*, nel caso studiato le azioni elementari sono esprimibili come:

$$F_d = G_k + Q_{k1} + \sum_{j=2}^m \psi_{0j} Q_{kj} \text{ per le combinazioni caratteristiche (rare).}$$

Avendo come unico carico variabile la neve, la combinazione più gravosa sarà quella caratteristica (rara).

Il carico agente sulla singola trave di copertura sarà allora:

$$F_d = G_{pesotrave} + G_{pesopannelli} + Q_{neve}$$

Il corrispondente carico distribuito sarà, analogamente a come scritto sopra:

$$q_d = G_{pesotrave} + (G_{pesopannelli} + Q_{neve}) \cdot i, \text{ dove } i \text{ è l'interasse tra i telai.}$$

Per le travi di copertura, la verifica allo S.L.E. va eseguita sulla freccia, e dovranno essere rispettati i limiti:

$$\frac{\delta_{max}}{L} < \frac{1}{200}; \quad \frac{\delta_2}{L} < \frac{1}{250}$$

dove $\delta_{\max}$ è lo spostamento nello stato finale (depurato dall'eventuale monta iniziale), mentre δ_2 è lo spostamento elastico dovuto ai carichi variabili.

Le verifiche in presenza di *incendio* vanno eseguite considerando le combinazioni di carico eccezionali che, in questo caso, sono nella forma:

$$F_d = G_k + A_d + Q_{k1} + \sum_{j=1}^m \psi_{2j} Q_{kj}, \text{ dove con } A_d \text{ si intendono le azioni eccezionali di progetto.}$$

Per il carico neve (quota > 1000 m s.l.m.), si ha $\psi_{2j} = 0,2$.

Entrando in dettaglio, per la generica trave di copertura si ha:

$$F_d = G_{\text{pesotrave}} + G_{\text{pesopannelli}} + A_{\text{incendio}} + 0,2 \cdot Q_{\text{neve}}$$

che comporterà un carico distribuito pari a:

$$q_d = G_{\text{pesotrave}} + (G_{\text{pesopannelli}} + 0,2 \cdot Q_{\text{neve}}) \cdot i, \text{ dove } i \text{ è l'interasse tra i telai.}$$

E' bene notare come, trattandosi di un telaio isostatico, il carico incendio non generi ulteriori azioni sulla struttura.

Alla sommità dei corrispondenti pilastri, si avrà, avendo una luce l :

$$N'_d = 1/2 \cdot q_d \cdot l$$

Alla base della colonna di altezza h , il carico varrà pertanto:

$$N_d = N'_d + G_{\text{pesopilastra}} \cdot h$$

Verranno qui di seguito esposti i calcoli per trave e colonna di uno dei casi analizzati in maniera dettagliata, per poi riportare le rimanenti possibilità in forma tabellare. Le modalità di calcolo saranno le medesime, mentre cambieranno solo i valori delle grandezze in gioco.

CASO DI STUDIO: LUCE DA 10 M, ALTEZZA TELAIO DA 8 M, INTERASSE TRA I TELAI PARI A 4 M

Supponendo di avere un telaio di luce 10 m e un interasse tra telai pari a 4 m, si eseguono le verifiche ipotizzando di impiegare profili IPE300 S275 sia per le travi di copertura che per i pilastri.

VERIFICHE AGLI S.L.U.

Sulla trave di copertura si avrà un carico uniforme pari a:

$$q_d = 1,3 \cdot G_{pesotrave} + (1,3 \cdot G_{pesopannelli} + 1,5 \cdot Q_{neve}) \cdot 4m$$

Nell'ipotesi di adottare un profilo IPE300 per la trave di copertura (peso proprio pari a 0,42 kN/m), si ricava:

$$q_d = 1,3 \cdot 0,42 \text{ kN/m} + (1,3 \cdot 0,20 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 0,96 \text{ kN/m}^2) \cdot 4,00m = 7,35 \text{ kN/m}$$

con un momento in mezzzeria pari a:

$$M_d = q_d \cdot l^2 / 8 = 91,86 \text{ kNm}$$

Alla sommità del singolo pilastro vi sarà, inoltre:

$$N'_d = 1/2 \cdot (7,35 \text{ kN/m} \cdot 10,00m) = 36,74 \text{ kN}$$

Alla base della colonna si ha, nel caso di un profilo IPE300 (peso proprio pari a 3,31 kN) di altezza 8 m:

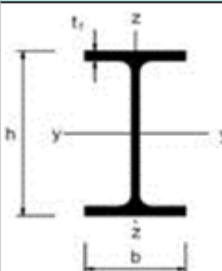
$$N_d = N'_d + 1,3 \cdot (0,42 \text{ kN/m} \cdot 8m) = 41,05 \text{ kN}$$

E' facile appurare che, con tali carichi agenti, la trave di copertura risulta verificata a flessione, se soggetta al momento in mezzzeria pari a 91,86 kNm, in quanto $M_R = 164,58 \text{ kNm}$.

IPE - HE - HL = verifica di resistenza a flessione retta			
(Flessione nel piano dell'anima)			
$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$	$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,yk} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$	M_{Ed} = momento flettente di calcolo $M_{pl,Rd}$ = momento resistente	W_{pl} = modulo resistente plastico f_{yk} = tensione caratteristica a snervamento γ_{M0} = coefficiente di sicurezza
Fondazione Promozione Acciaio			
INPUT			
Definizione dell'azione sollecitante	M = 91,86 [kNm]		
Sceita del profilo	IPE 300		
Classe dell'acciaio	S275JO - S275JR - S275J2		
OUTPUT			
(VERIFICA Punto 4.2.4.1.2.3 NTC 2018)			
$M_{Ed} = 91,86 \text{ [kNm]}$ $M_{c,Rd} = 164,58 \text{ [kNm]}$	$M_{Ed} / M_{c,Rd} = 0,56$	Verifica soddisfatta	
Torna al Menu Principale			

➔ [**Scarica la scheda di calcolo "Verifica di resistenza e stabilità dei singoli profili"**](#)

Analogamente, la *colonna IPE300*, soggetta a carico di compressione pari a 41,05 kN, soddisfa le verifiche richieste, così come mostrato di seguito.

IPE - HE - HL = verifica di stabilità a carico di punta			
(Instabilità attorno all'asse z-z)			
	$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}}$ N_{Ed} = azione di compressione di calcolo $N_{b,Rd}$ = resistenza all'instabilità nell'asta compressa χ = coefficiente che dipende dal tipo di sezione e dal tipo di acciaio impiegato A = area lorda della sezione f_{yk} = tensione caratteristica a snervamento γ_{M1} = coefficiente di sicurezza Attenzione: la scheda vale solo per sezioni di classe 1, 2 e 3		
INPUT			
Definizione dell'azione sollecitante		N = 41,05 [kN]	
Caratteristiche del profilo		IPE 300	L_{cr} [m] = 5,60
Classe dell'acciaio		S275JO - S275JR - S275J2	
OUTPUT			
(VERIFICA Punto 4.2.4.1.3.1 NTC 2018)			
N_{Ed} =	41,05 [kN]	$N_{Ed} / N_{b,Rd}$ =	0,13 ↑
$N_{b,Rd}$ =	315,65 [kN]	Verifica soddisfatta	
Torna al Menu Principale			

VERIFICHE AGLI S.L.E.

Sulla trave di copertura si avrà un carico uniforme pari a:

$$q_d = G_{pesotrave} + (G_{pesopannelli} + Q_{neve}) \cdot 4m, \text{ ovvero:}$$

$$q_{dvar} = (0,96 \text{ kN/m}^2) \cdot 4,00m = 3,84 \text{ kN/m per i soli carichi variabili;}$$

$$q_d = 0,42 \text{ kN/m} + (0,2 \text{ kN/m}^2 + 0,96 \text{ kN/m}^2) \cdot 4,00m = 5,06 \text{ kN/m per tutti i carichi in gioco.}$$

Trattandosi di trave su due appoggi, la freccia in mezzzeria si ricava con la nota relazione:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q_d \cdot l^4}{E \cdot J}, \text{ dove } E \text{ è il modulo di Young e } J \text{ è il momento di inerzia della sezione.}$$

Con la simbologia vista sopra, si ha:

$$\delta_{\max} = 37,56 \text{ mm} < 50 \text{ mm} = 1/200 \text{ della luce}$$

$$\delta_2 = 28,49 \text{ mm} < 40 \text{ mm} = 1/250 \text{ della luce}$$

Il profilo risulta quindi verificato.

VERIFICHE AL CARICO DI INCENDIO

Per le travi di copertura, il carico distribuito sarà:

$$q_d = 0,42 \text{ kN/m} + (0,2 \text{ kN/m}^2 + 0,2 \cdot 0,96 \text{ kN/m}^2) \cdot 4,00 \text{ m} = 1,99 \text{ kN/m}$$

con un momento in mezzzeria pari a:

$$M_d = q_d \cdot l^2 / 8 = 24,88 \text{ kNm}$$

Alla sommità del singolo pilastro giungerà il carico:

$$N'_d = 1/2 \cdot (1,99 \text{ kN/m} \cdot 10,00 \text{ m}) = 9,95 \text{ kN}$$

Alla base della colonna si avrà, pertanto:

$$N_d = N'_d + (0,42 \text{ kN/m} \cdot 8 \text{ m}) = 13,26 \text{ kN}$$

Quelli appena trovati costituiscono i dati di ingresso, insieme alle caratteristiche meccaniche dei profili, per il nomogramma (a cui si rimanda per i grafici e i valori tabellati).

→ [Scarica il nomogramma](#)

Si propongono, qui di seguito, le verifiche per travi e pilastri con le rispettive classi di resistenza al fuoco, ottenute anche in presenza di eventuale protezione ignifuga.

Trave IPE300 in acciaio S275 – nessuna protezione al fuoco

Si calcola, innanzitutto, il fattore di utilizzazione:

$$\mu_0 = \frac{M_d}{W_{pl} \cdot f_y} = \frac{24,88 \cdot 10^6 \text{ kNmm}}{628,40 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 275 \text{ N/mm}^2} = 0,144$$

Si determina $K=K_1 \cdot K_2 = 0,7$ (sezione non protetta ed esposta su tre lati)

Dal nomogramma si ottiene una temperatura critica $T_{cr}=825 \text{ }^\circ\text{C}$.

Il fattore di sezione può essere calcolato o ricavato da apposite tabelle, e vale 188 m^{-1} .

Per sezioni a doppio T si può però impiegare il fattore di sezione modificato per tenere conto dello “shadow effect”:

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh} = 0,9 \cdot \left[\frac{A_m}{V} \right]_b = 169 m^{-1}$$

Utilizzando il nomogramma, incrociando il fattore di utilizzazione, la curva per $K=0,7$, la temperatura critica e il fattore di sezione modificato, si vede che la temperatura critica è raggiunta con un tempo di esposizione pari a $t_{es}=31$ min. Questo permette di classificare la sezione come R30, senza l'impiego di alcuna protezione.

Trave IPE300 in acciaio S275 – con protezione al fuoco

Si decide di applicare alla trave uno spessore minimo (10 mm) di fibre minerali a spruzzo (conducibilità termica $\lambda_p = 0,10$ W/m°C) e di ricavare la corrispondente classe di resistenza al fuoco.

Si determina $K = K_1 \cdot K_2 = 0,85$ (sezione protetta ed esposta su tre lati)

Dal nomogramma si ottiene una temperatura critica $T_{cr}=795$ °C.

Il fattore di sezione modificato corrispondente alla protezione scelta, sarà

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 169 m^{-1} \cdot \frac{0,10 \text{ W/m}^\circ\text{C}}{0,01m} = 1690 \text{ W/(m}^3 \cdot K)$$

Utilizzando il nomogramma nella parte relativa alle sezioni protette, si ricava che la temperatura critica è raggiunta con un tempo di esposizione pari a $t_{es}=120$ min. Questo permette di classificare la sezione come R120.

Colonna IPE300 in acciaio S275 – nessuna protezione al fuoco

La lunghezza libera di inflessione, per tale elemento, è $l_{fi} = 0,7 \cdot 8m = 5,6m$.

Lo sforzo normale in caso di incendio è, per come visto sopra:

$$N_d = 13,26kN$$

Ricavato

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 86,8$$

si ottiene la snellezza adimensionale

$$\bar{\lambda}_{(20^\circ\text{C})} = \frac{l_{fi}}{i \cdot \lambda_1} = \frac{5,6m}{0,0335m \cdot 86,8} = 1,93, \text{dove } i \text{ è il raggio di inerzia della sezione.}$$

Si calcola, quindi, la tensione critica di compressione:

$$f'_{y,\theta,\lambda} = \frac{N_d}{A} = 2,46 \text{ N/mm}^2, \text{ dove } A \text{ è l'area della sezione.}$$

Dalle tabelle sulle temperature critiche per elementi compressi, si ricava una T_{cr} che supera i 900 °C.

Dal nomogramma si ottiene così un tempo di esposizione pari a $t_{es}=46$ min, che permette di classificare la sezione come R45, senza l'impiego di alcuna protezione.

Gli altri casi di studio vengono qui riportati solo in forma tabellare, in quanto le procedure di calcolo sono analoghe. A seconda della luce e dell'interasse dei telai, si mostreranno i profili scelti per travi e colonne, insieme alla loro classe di resistenza al fuoco.

Luce telaio (m)	Interasse telai (m)	Travi e classe di resistenza al fuoco	Pilastrini e classe di resistenza al fuoco
10	4	IPE 300 (R30)	IPE 300 (R45)
10	5,5	IPE O 300 (R30)	HEA 160 (R45)
20	5,5	IPE 550 (R30)	HEB 220 (R45)

Tabella 1: Profili scelti in funzione dei telai, senza l'impiego di protezione al fuoco

Luce telaio (m)	Interasse telai (m)	Travi e classe di resistenza al fuoco con protezione	Spessore protezione in fibre minerali a spruzzo
10	4	IPE 300 (R120)	10 mm
10	5,5	IPE O 300 (R120)	10 mm
20	5,5	IPE 550 (R120)	10 mm

Tabella 2: Profili scelti in funzione dei telai con l'impiego di protezione al fuoco esclusivamente sulle travi