CORSO DI AGGIORNAMENTO ACAI-ACS

VERONA

12-13 Marzo 2013 – 26-27 Marzo 2013

LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE IN ACCIAIO

RELATORI

SERGIO FOA - VALTER CARNI - BENEDETTO CORDOVA

26 MARZO 2014

1. SICUREZZA STRUTTURALE E CODICI DI CALCOLO (NTC08-EC3)

2. ESEMPI APPLICATIVI DI VERIFICHE (confronto con le vecchie norme CNR 10011)

3. PRINCIPALI CONNESSIONI (bullonature o saldature: descrizione e verifiche)

4. DISCUSSIONE FINALE

1. SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

- SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO (T.A., S.L.)

- NTC08 ED EUROCODICE 3

2. ESEMPI APPLICATIVI DI VERIFICHE (CON CONFRONTO CNR 10011)

- VERIFICHE A TRAZIONE
- VERIFICHE A COMPRESSIONE
- VERIFICHE A FLESSIONE MONOASSIALE (RETTA)
- VERIFICHE A TAGLIO

2. ESEMPI APPLICATIVI DI VERIFICHE (CON CONFRONTO CNR 10011)

- PRESSO O TENSO FLESSIONE RETTA
- PRESSO O TENSO FLESSIONE BIASSIALE
- FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE

3. PRINCIPALI CONNESSIONI (bullonature/saldature, scelta e verifica)

- UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE

- UNIONI A TAGLIO PER ATTRITO CON BULLONI AD ALTA RESISTENZA

3. PRINCIPALI CONNESSIONI (bullonature/saldature, scelta e verifica)

- UNIONI CON SALDATURE A PIENA PENETRAZIONE

- UNIONI CON SALDATURE A PARZIALE PENETRAZIONE

- UNIONI CON SALDATURE A CORDONI D'ANGOLO

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

Sollecitazione ≤ Resistenza

METODO DELLE TENSIONI AMMISSIBILI →

$$\sigma \le \sigma_{amm.}$$
$$\tau \le \tau_{amm.}$$
$$\sigma_{id.} \le \sigma_{amm.}$$

METODO DEGLI STATI LIMITE →

$$F_{Ed} \le F_{Rd}$$

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

METODO DELLE TENSIONI AMMISSIBILI

- CALCOLO ELASTICO-LINEARE
- SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI $\sigma - \tau$
- FORMULAZIONI “SEMPLICI”, MA “EFFICACI”
- CONTROLLABILITA’ DEI RISULTATI PASSO-PASSO
- POSSIBILITA’ DI SVOLGERE “CALCOLI MANUALI” SENZA GROSSE DIFFICOLTA’

ATT.! IL CALCOLO ALLE T.A. E’ AMMESSO SOLO IN ZONA 4 PER COSTRUZIONI DI TIPO 1 E 2 E CLASSE D’USO I e II (con S = 5) (vedere § 2.7 NTC). NON E’ CONTEMPLATO NEGLI EUROCODICI.

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO
METODO DEGLI STATI LIMITE

- VERIFICHE AGLI SLU (COMPORTAMENTO PLASTICO DELLE SEZIONI): RESISTENZA, STABILITA'.
- VERIFICHE AGLI SLE (COMPORTAMENTO ELASTICO DELLE SEZIONI): DEFORMABILITA', VIBRAZIONI.
- FORMULAZIONI "PIU' COMPLESSE".
- DIFFICOLTA' NELL'ESEGUIRE CALCOLAZIONI MANUALI E NECESSITA' DELL'IMPIEGO DEL CALCOLATORE.
- MIGLIORE SFRUTTAMENTO DELLE PROPRIETA' MECCANICO-GEOMETRICHE DEI PROFILI STRUTTURALI.

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

PRINCIPALI VARIAZIONI DAL PASSAGGIO DEL CALCOLO ALLE TA AGLI SL

TENSIONI AMMISSIBILI	→ STATI LIMITE
CARICHI REALI COMBINATI NEL MODO PIU' SVAVOREVOLE	→ CARICHI COMBINATI CON COEFFICIENTI PARZIALI E DI CONTEMPORANEITA'
DETERMINAZIONE DELLE AZIONI INTERNE E DEGLI SFORZI NELLE SEZIONI PIU' SOLLECITATE DEI PROFILI	→ DETERMINAZIONE DELLE AZIONI INTERNE PER LE COMBINAZIONI ALLO SLU

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

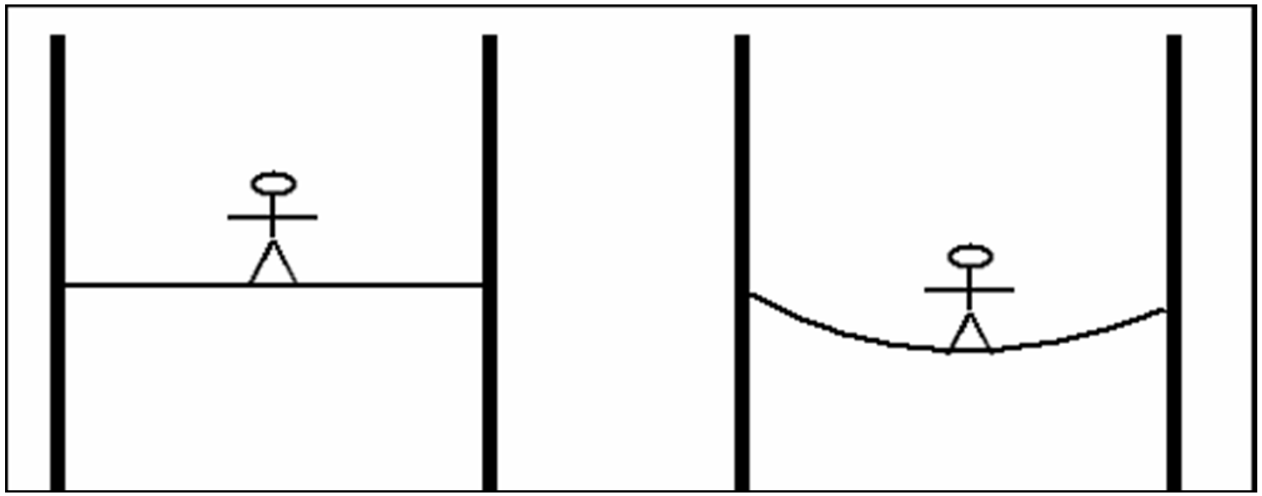
PRINCIPALI VARIAZIONI DAL PASSAGGIO DEL CALCOLO ALLE TA AGLI SL

TENSIONI AMMISSIBILI	→	STATI LIMITE
CALCOLO DELLO SFORZO IDEALE MASSIMO (CAMPO ELASTICO) PER CIASCUNA SEZIONE DI VERIFICA	→	CALCOLO DELLE AZIONI RESISTENTI (CAMPO ELASTICO O PLASTICO) PER CIASCUNA SEZIONE DI VERIFICA
CONFRONTO DEGLI SFORZI MASSIMI CON LA TENSIONE AMMISSIBILE (ATT! STABILITA')	→	CONFRONTO DELLE AZIONI SOLLECITANTI CON LE RESISTENTI (ATT! STABILITA')

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

PRINCIPALI VARIAZIONI DAL PASSAGGIO DEL CALCOLO ALLE TA AGLI SL

TENSIONI AMMISSIBILI	→ STATI LIMITE
VERIFICA A DEFORMABILITA' IN CAMPO ELASTICO	→ VERIFICA DEFORMABILITA' IN CAMPO ELASTICO



SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

CONFRONTO NUMERICO SUL CALCOLO ALLE TA AGLI SL (CAMPO ELASTICO)

$$\sigma \le \sigma_{amm.}$$

$$\tau \le \tau_{amm.} = \frac{\sigma_{amm.}}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma_{id.} \le \sigma_{amm.}$$

$$\sigma_{id.} = \sqrt{\sigma_x^{\,2} + \sigma_y^{\,2} - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^{\,2}}$$

$$\rightarrow$$

$$F_{Ed} \le F_{Rd}$$

$$(\gamma_G \div \gamma_Q) \cdot F_{Ek} \le \frac{F_{Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$(1.30 \div 1.50) \cdot F_{Ek} \le \frac{F_{Rk}}{1.05}$$

CONSIDERANDO UN ACCIAIO S275 (ex Fe 430), CONFRONTANDO TA E SL, SI AVREBBE:

$$\sigma \le 190\ MPa \rightarrow f_{Ek} \le \frac{f_{Rk}}{1.05 \cdot (1.30 \div 1.50)} = \frac{275 MPa}{1.05 \cdot (1.30 \div 1.50)} = 175 \div 201 MPa$$

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

CLASSIFICAZIONE DEI PROFILI E FENOMENI DI INSTABILITA' LOCALE

- **NOVITA' DEGLI STATI LIMITE RISPETTO ALLE TA.**
- **PERMETTE DI VALUTARE SE E' POSSIBILE O MENO METTERE IN CONTO UN COMPORTAMENTO PLASTICO DELLA SEZIONE.**
- **SONO DEFINITITE 4 CLASSI DI COMPORTAMENTO.**

SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

CLASSIFICAZIONE DEI PROFILI E FENOMENI DI INSTABILITA' LOCALE

- **CLASSE 1 (compatte): permettono comportamento plastico con capacità rotazionale significativa senza riduzione di resistenza ($C_\vartheta \geq 3$);**

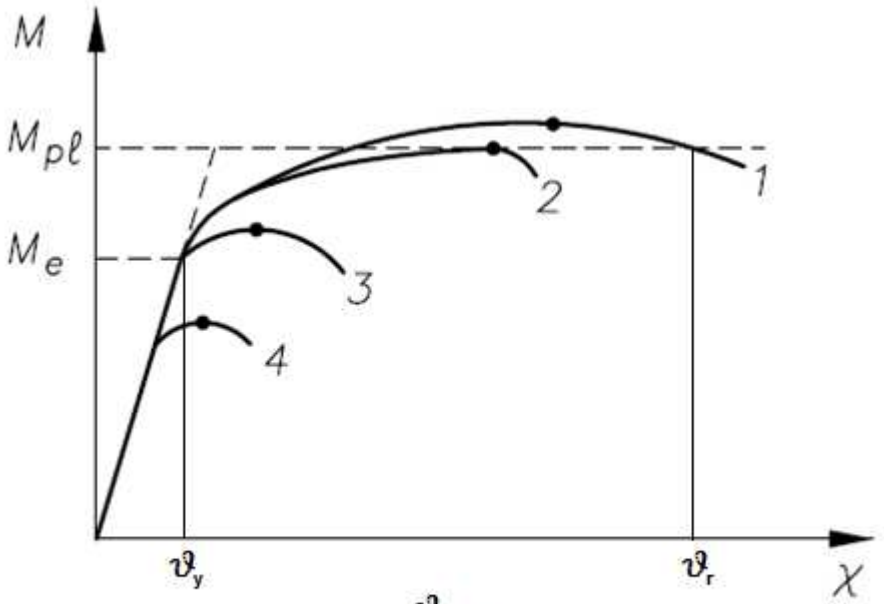
- **CLASSE 2 (compatte): permettono comportamento plastico con capacità rotazionale limitata ($C_\vartheta \geq 1.5$);**

- **CLASSE 3 (moderatamente snelle): non permettono comportamento plastico perché l'instabilità locale impedisce lo sviluppo di plasticità;**

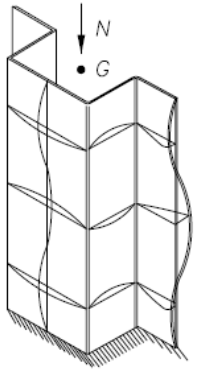
- **CLASSE 4 (snelle): fenomeni di instabilità locale già in fase elastica: caratteristiche geometriche penalizzate: si considerano le sezioni "efficaci".**

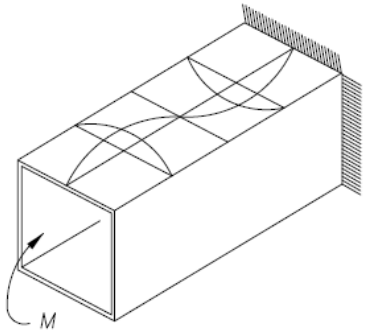
SICUREZZA STRUTTURALE E METODI DI CALCOLO

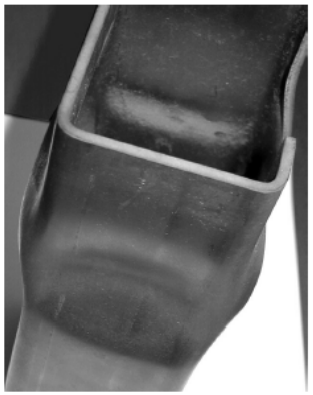
CLASSIFICAZIONE DEI PROFILI E FENOMENI DI INSTABILITA' LOCALE

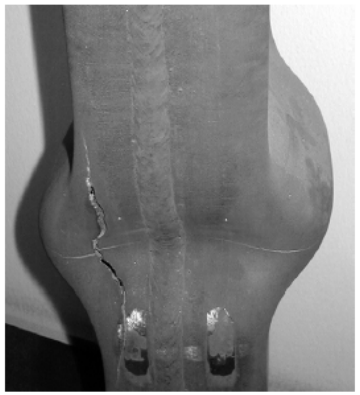


$$C_\vartheta = \frac{\vartheta_r}{\vartheta_y} - 1$$









CLASSIFICAZIONE DEI PROFILI

(da "Edifici in acciaio" – Bernuzzi, Mazzolani)

Profilo	Compressione					Flessione				
	S 235	S 275	S 355	S 420	S 460	S 235	S 275	S 355	S 420	S 460
IPE 80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IPE 100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IPE 120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
IPE 140	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
IPE 160	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1
IPE 180	1	1	2	2	3	1	1	1	1	1
IPE 200	1	1	2	2	3	1	1	1	1	1
IPE 220	1	1	2	3	4	1	1	1	1	1
IPE 240	1	2	2	3	4	1	1	1	1	1
IPE 270	2	2	3	4	4	1	1	1	1	1
IPE 300	2	2	4	4	4	1	1	1	1	1
IPE 330	2	3	4	4	4	1	1	1	1	1
IPE 360	2	3	4	4	4	1	1	1	1	1
IPE 400	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1
IPE 450	3	4	4	4	4	1	1	1	1	1
IPE 500	3	4	4	4	4	1	1	1	1	1
IPE 550	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
IPE 600	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1

CLASSIFICAZIONE DEI PROFILI

(da "Edifici in acciaio" – Bernuzzi, Mazzolani)

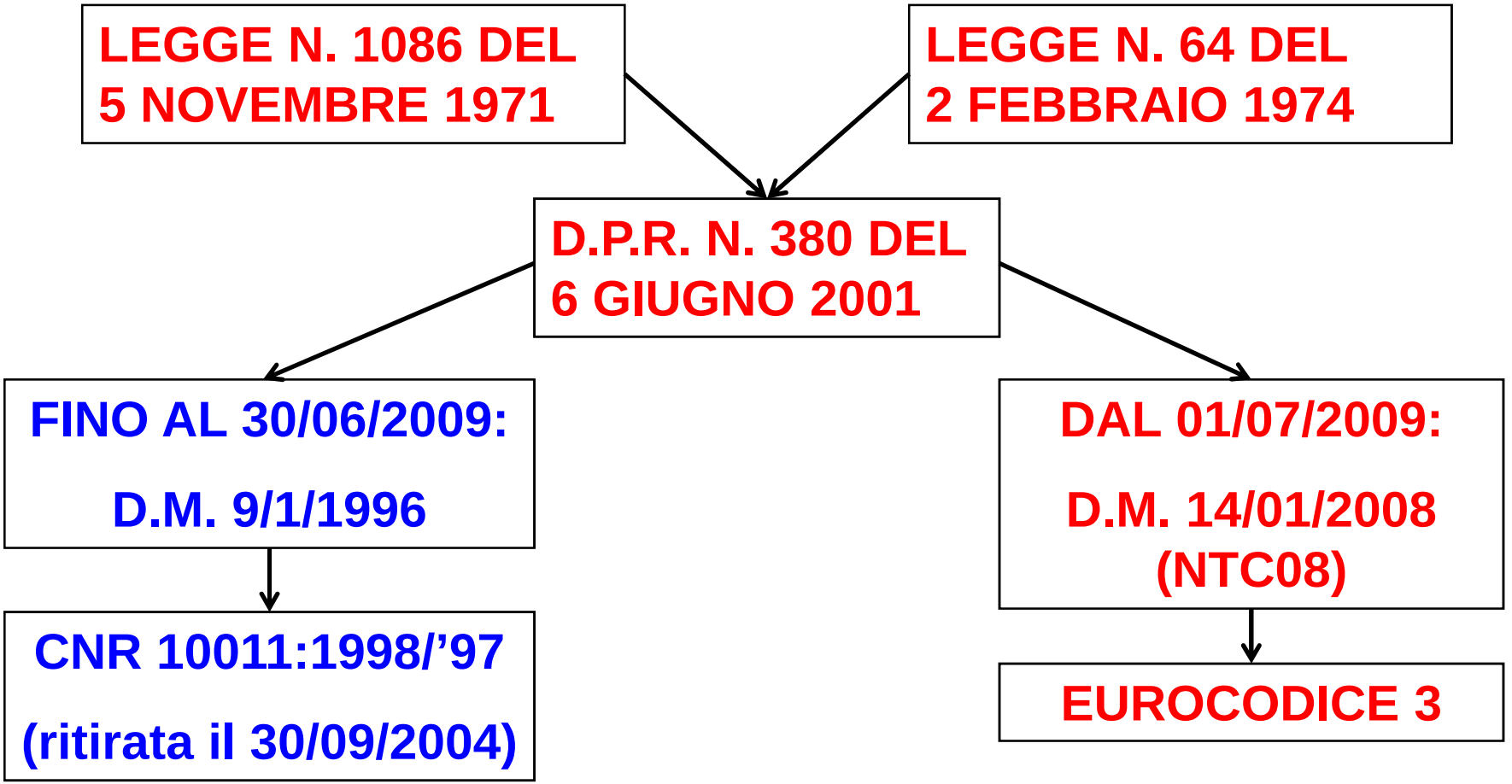
Profilo	Compressione					Flessione				
	S 235	S 275	S 355	S 420	S 460	S 235	S 275	S 355	S 420	S 460
HEA 100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEA 120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEA 140	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2
HEA 160	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2
HEA 180	1	1	2	3	3	1	1	2	3	3
HEA 200	1	1	2	3	3	1	1	2	3	3
HEA 220	1	1	2	3	3	1	1	2	3	3
HEA 240	1	1	2	3	3	1	1	2	3	3
HEA 260	1	1	3	3	3	1	1	3	3	3
HEA 280	1	2	3	3	3	1	2	3	3	3
HEA 300	1	2	3	3	3	1	2	3	3	3
HEA 320	1	1	2	3	3	1	1	2	3	3
HEA 340	1	1	1	2	3	1	1	1	2	3
HEA 360	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2
HEA 400	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
HEA 450	1	1	2	3	3	1	1	1	1	1
HEA 500	1	2	3	4	4	1	1	1	1	1
HEA 550	2	2	4	4	4	1	1	1	1	1
HEA 600	2	3	4	4	4	1	1	1	1	1
HEA 650	3	4	4	4	4	1	1	1	1	1
HEA 700	3	4	4	4	4	1	1	1	1	1
HEA 800	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
HEA 900	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
HEA1000	4	4	4	4	4	1	1	1	1	2
HEA1100	4	4	4	4	4	1	1	1	1	2

CLASSIFICAZIONE DEI PROFILI

(da “Edifici in acciaio” – Bernuzzi, Mazzolani)

Profilo	Compressione					Flessione				
	S 235	S 275	S 355	S 420	S 460	S 235	S 275	S 355	S 420	S 460
HEB 100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 140	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 160	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 180	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 220	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 240	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 260	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 280	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 300	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 320	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 340	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 360	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 400	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HEB 450	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
HEB 500	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
HEB 550	1	1	2	3	3	1	1	1	1	1
HEB 600	1	2	3	3	4	1	1	1	1	1
HEB 650	2	2	3	4	4	1	1	1	1	1
HEB 700	2	2	4	4	4	1	1	1	1	1
HEB 800	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1
HEB 900	3	4	4	4	4	1	1	1	1	1
HEB1000	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
HEB 1100	4	4	4	4	4	1	1	1	2	2

NORMATIVE DI RIFERIMENTO (territorio italiano)



VERIFICHE A TRAZIONE

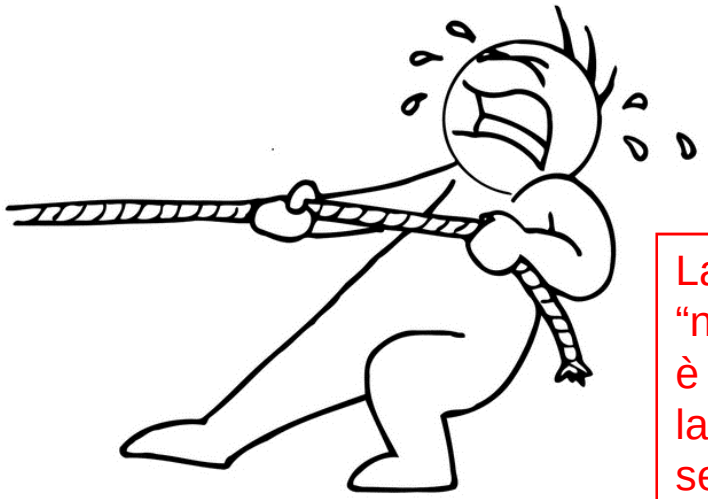
CNR 10011

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leqslant f_d \qquad \text{stati limite}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leqslant \sigma_{adm} \qquad \text{tensioni ammissibili}$$

N l'azione assiale di trazione;

A_{eff} l'area effettiva.



NTC08 – EC3

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$N_{t,Rd}$ pari al minore dei valori seguenti:

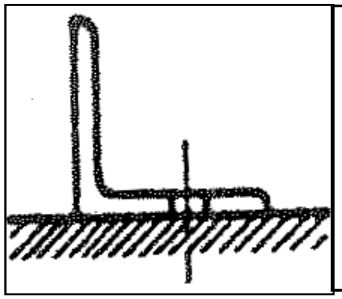
$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$ **resistenza sezione lorda**

$$N_{u,Rd} = \frac{0{,}9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}}$$ **· resistenza sez. netta**

In zona sismica: $N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd}$

La capacità portante dell'elemento teso è legata all'area "netta". Se l'azione è baricentrica al profilo, l'area netta è quella lorda depurata dai fori. Se i fori sono sfalsati è la minima tra quella della sezione netta e quella di sezioni passanti per i fori depurata dagli stessi.

VERIFICHE A TRAZIONE - ESEMPIO



L 70x5: A=684 mm^2; M20: d_{foro}=21 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=80 kN; N_{Ed}=110 kN

CNR 10011

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leqslant f_d \qquad \text{stati limite}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leqslant \sigma_{adm} \qquad \text{tensioni ammissibili}$$

N l'azione assiale di trazione;

A_{eff} l'area effettiva.

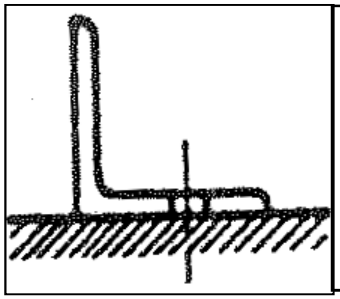
$$A_{eff} = A_1 + \frac{3\,A_1}{3\,A_1 + A_2} A_2$$

A_1 è l'area netta dell'ala collegata;

A_2 è l'area dell'ala non collegata.

A_1=70x5-21x5=245 mm^2
A_2=684-70x5=334 mm^2
$A_{eff.}$= 475 mm^2

VERIFICHE A TRAZIONE - ESEMPIO



L 70x5: A=684 mm^2; M20: d_{foro}=21 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=80 kN; N_{Ed}=110 kN

CNR 10011

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leqslant f_d \qquad \text{stati limite}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A_{eff}} \leqslant \sigma_{adm} \qquad \text{tensioni ammissibili}$$

N l'azione assiale di trazione;

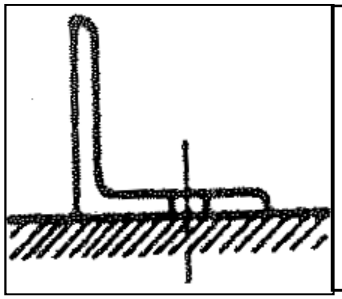
A_{eff} l'area effettiva.

σ_N=232 MPa < f_d (FS=0.855)

σ_N=168 MPa < σ_{amm} (FS=0.886)

$A_{eff.}$= 475 mm^2

VERIFICHE A TRAZIONE - ESEMPIO



L 70x5: A=684 mm^2; M20: d_{foro}=21 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=80 kN; N_{Ed}=110 kN

NTC08 (γ_{M0}=1.05; γ_{M2}=1.25;)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$N_{t,Rd}$ pari al minore dei valori seguenti:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0{,}9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}}.$$

$N_{pl,Rd}$ = 179.14 kN

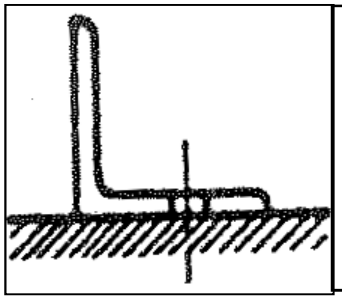
A_{net}=684-21x5=579 mm^2

$N_{u,Rd}$ = 179.26 kN

$N_{pl,Rd}$ = 179.14 kN

FS=0.614

VERIFICHE A TRAZIONE - ESEMPIO



L 70x5: A=684 mm^2; M20: d_{foro}=21 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=80 kN; N_{Ed}=110 kN

NTC08 (γ_{M0}=1.05; γ_{M2}=1.25;)

Nel caso particolare di angolare singolo, $N_{u.Rd}$ dipende dal numero di bulloni (cfr. UNI EN 1993-1-8):

- 1 bullone (figura a):

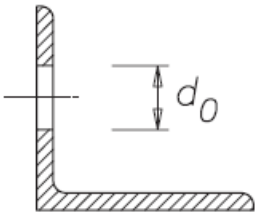
$$N_{u,Rd} = \frac{2{,}0 \cdot (e_2 - 0{,}5 d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

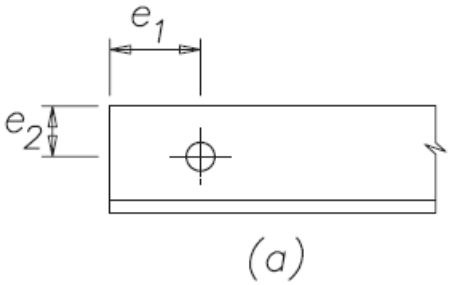
- 2 bulloni (figura b):

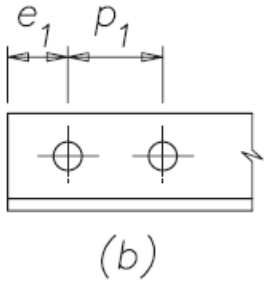
$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

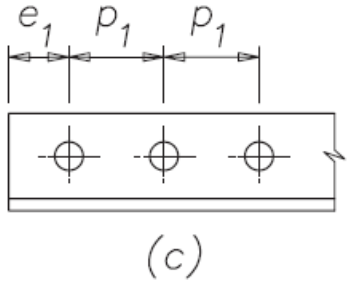
- 3 bulloni (figura c):

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

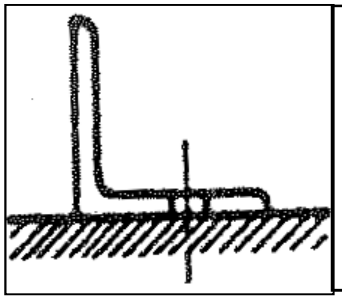








VERIFICHE A TRAZIONE - ESEMPIO



L 70x5: A=684 mm^2; M20: d_{foro}=21 mm – f=40 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=80 kN; N_{Ed}=110 kN

NTC08 (γ_{M0}=1.05; γ_{M2}=1.25;)

- 1 bullone (figura a):

$$N_{u,Rd} = \frac{2.0 \cdot (30 - 0.5 \cdot 21) \cdot 5 \cdot 430}{1.25} = 67.1 kN$$

Passo p_1	$\leq 2{,}5\ d_0$	$\geq 5\ d_0$
2 bulloni	$\beta_2 = 0{,}4$	$\beta_2 = 0{,}7$
3 bulloni o più	$\beta_3 = 0{,}5$	$\beta_3 = 0{,}7$

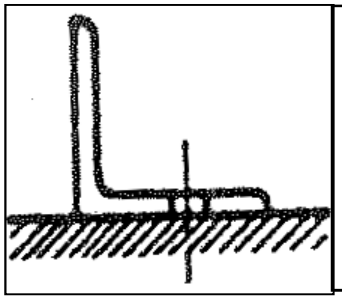
- 2 bulloni (figura b):

$$N_{u,Rd} = \frac{(0.40 \div 0.70) \cdot 579 \cdot 430}{1.25} = 79.7 \div 139.4 kN$$

- 3 bulloni (figura c):

$$N_{u,Rd} = \frac{(0.50 \div 0.70) \cdot 579 \cdot 430}{1.25} = 99.6 \div 139.4 kN$$

VERIFICHE A TRAZIONE - ESEMPIO



L 70x5: A=684 mm^2; M20: d_{foro}=21 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=80 kN; N_{Ed}=110 kN

NTC08 (γ_{M0}=1.05; γ_{M2}=1.25;)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \le 1$$

$N_{t,Rd}$ pari al minore dei valori seguenti:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

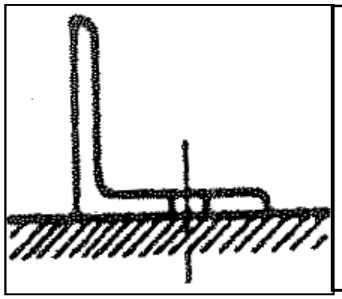
$$N_{u,Rd} = \frac{0{,}9 \cdot A_{net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} .$$

$N_{Ed}/N_{t,Rd}$=0.789÷1.640 (!!!)

$N_{u,Rd}$ = 67.1÷139.4 kN

$N_{pl,Rd}$ = 179.14 kN

VERIFICHE A TRAZIONE - ESEMPIO



L 70x5: A=684 mm^2; M20: d_{foro}=21 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=80 kN; N_{Ed}=110 kN

CNR 10011

TA: FS=0.886

SLU: FS=0.855

NTC08 (γ_{M0}=1.05; γ_{M2}=1.25)

EC3: FS = 0.789÷1.640

NTC: FS = 0.614

Oss.: Col passaggio alle **NTC**, nel caso specifico (angolare singolo), la **variazione del FS dipende fortemente dal tipo di collegamento (con 1, 2 o 3 bulloni).**

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Resistenza)

CNR 10011

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \leq f_d \qquad \text{stati limite}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \leq \sigma_{adm} \qquad \text{tensioni ammissibili}$$

essendo:

N l'azione assiale di compressione;

A l'area nominale del profilo al netto degli eventuali fori.

NTC08 – EC3

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

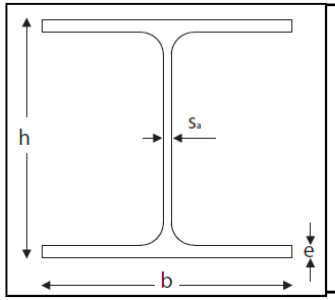
$N_{c,Rd} = A\, f_{yk} / \gamma_{M0}$ per le sezioni di classe 1, 2 e 3,

$N_{c,Rd} = A_{eff}\, f_{yk} / \gamma_{M0}$ per le sezioni di classe 4.

Non è necessario dedurre l'area dei fori per i collegamenti purché in tutti i fori siano presenti gli elementi di collegamento e non siano presenti fori sovradimensionati o asolati.

ATT! DI SOLITO SONO I FENOMENI DI INSTABILITA' QUELLI DIMENSIONANTI IN ASTE COMPRESSE.

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Resistenza) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=900 kN; N_{Ed}=1200 kN

CNR 10011

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \leqslant f_d \quad \text{stati limite}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \leqslant \sigma_{adm} \quad \text{tensioni ammissibili}$$

essendo:

N l'azione assiale di compressione;

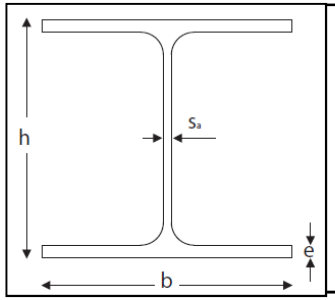
A l'area nominale del profilo al netto degli eventuali fori.

σ_N=221 MPa < f_d (FS=0.804)

σ_N=166 MPa < σ_{amm} (FS=0.872)

$A_{eff.}$= 5430 mm²

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Resistenza) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=900 kN; N_{Ed}=1200 kN

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$N_{c,Rd} = A\, f_{yk} / \gamma_{M0}$ per le sezioni di classe 1, 2 e 3,

$N_{c,Rd} = A_{eff}\, f_{yk} / \gamma_{M0}$ per le sezioni di classe 4.

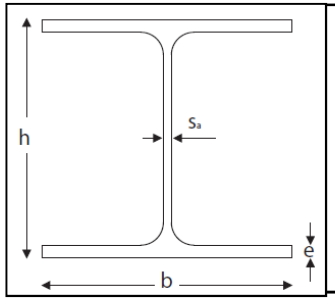
Non è necessario dedurre l'area dei fori per i collegamenti purché in tutti i fori siano presenti gli elementi di collegamento e non siano presenti fori sovradimensionati o asolati.

$N_{Ed}/N_{pl,Rd}$=0.843<1.00

$N_{c,Rd}$ = 1422 kN

(profilo in classe 1)

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Resistenza) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=900 kN; N_{Ed}=1200 kN

CNR 10011

TA: FS=0.872

SLU: FS=0.804

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

FS = 0.843

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è un non c'è variazione significativa del fattore di sfruttamento.

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Stabilità)

CNR 10011

$$\frac{\omega N}{A} \leqslant f_d \; ; \left[N_c = \frac{f_d \cdot A}{\omega} \right] \text{ stati limite}$$

$$\frac{\omega N}{A} \leqslant \sigma_{adm} \; ; \left[N_c = \frac{\sigma_{adm} \cdot A}{\omega} \right] \text{ tensioni ammissibili}$$

I valori dei coefficienti ω in funzione di λ

$$\lambda = \frac{L_c}{i} \qquad L_c = \beta L$$

$\beta = 1$ se i vincoli dell'asta possono assimilarsi a cerniere;
$\beta = 0.7$ se i vincoli possono assimilarsi a incastri;
$\beta = 0.8$ se un vincolo è assimilabile all'incastro ed uno alla cerniera;
$\beta = 2$ se l'asta è vincolata ad un solo estremo con incastro perfetto; in tal caso L è la distanza tra la sezione incastrata e quella di applicazione del carico.

NTC08 – EC3

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 ,$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}} \quad \text{per le sezioni di classe 1, 2 e 3,}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M1}} \quad \text{per le sezioni di classe 4.}$$

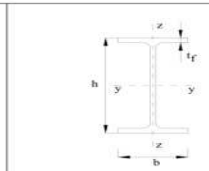
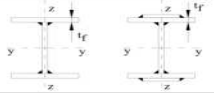
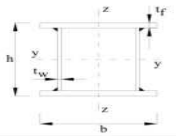
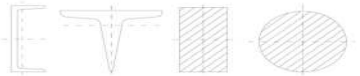
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \overline{\lambda}^2}} \leq 1.0 \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\overline{\lambda} - 0.2) + \overline{\lambda}^2\right]$$

$$\overline{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \quad \text{per le sezioni di classe 1, 2 e 3.}$$

$$\overline{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \quad \text{per le sezioni di classe 4.}$$

www.legislazionetecnica.it

Tabella 4.2.VI *Curve d'instabilità per varie tipologie di sezioni e classi d'acciaio, per elementi compressi.*

Sezione trasversale		Limiti		Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità S235, S275, S355, S420	Curva di instabilità S460
Sezioni laminate		h/b > 1,2	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	a_0 a_0
			40 mm < $t_f \leq$ 100 mm	y-y z-z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
			$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c
Sezioni ad I saldate		$t_f \leq 40$ mm		y-y z-z	b c	b c
		$t_f > 40$ mm		y-y z-z	c d	c d
Sezioni cave		Sezione formata "a caldo"		qualunque	a	a_0
		Sezione formata "a freddo"		qualunque	c	c
Sezioni scatolari saldate		In generale		qualunque	b	b
		saldature "spesse": a>0.5t_f; b/t_f<30; h/t_w<30		qualunque	c	c
Sezioni piene, ad U e T				qualunque	c	c
Sezioni ad L				qualunque	b	b

Curva di instabilità	a_0	a	b	c	d
Fattore di imperfezione α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Stabilità)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,$$

$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$ per le sezioni di classe 1, 2 e 3,

$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M1}}$ per le sezioni di classe 4.

$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 \quad \Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$

dipende dal tipo di acciaio e dalla sezione

α (fattore imperfezione) da tab. 4.2.VI

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}}$ per le sezioni di classe 1, 2 e 3.

Snellezza adimensionalizzata

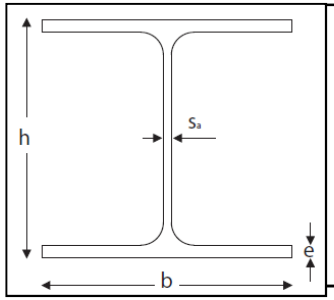
$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yk}}{N_{cr}}}$ per le sezioni di classe 4.

$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{min}}{l_0^2}$

Se $\lambda_{soprasegnato} < 0.20$ oppure $N_{Ed} < 0.04 N_{cr} \rightarrow$ NO INSTABILITA'

ATT! $\lambda < 200$ per profili principali; < 250 per secondari

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Stabilità) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²; H=3000 mm (β=1.00); i=40.5 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=550 kN; N_{Ed}=750 kN

CNR 10011

$$\frac{\omega N}{A} \leqslant f_d \; ; \left[N_c = \frac{f_d \cdot A}{\omega} \right] \text{ stati limite}$$

$$\frac{\omega N}{A} \leqslant \sigma_{adm} \; ; \left[N_c = \frac{\sigma_{adm} \cdot A}{\omega} \right] \text{ tensioni ammissibili}$$

$$\lambda = \frac{L_c}{i}$$

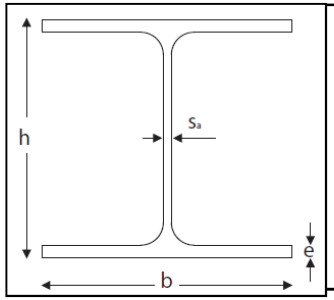
σ=224 MPa < f_d (FS=0.815)

σ=164 MPa < σ_{amm} (FS=0.864)

λ= 3000/40.5=74→ω=1.62

(curva c, prospetto 7-IIIc)

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Stabilità) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²; H=3000 mm (β=1.00)

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=550 kN; N_{Ed}=750 kN

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \le 1,$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}} \quad \text{per le sezioni di classe 1, 2 e 3,}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1.0 \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \quad \text{per le sezioni di classe 1, 2 e 3.}$$

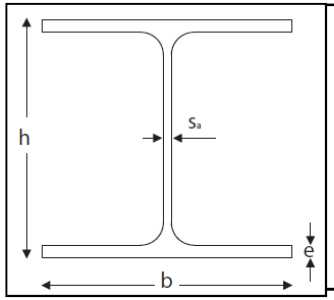
$N_{Ed}/N_{b,Rd}$=0.840<1.00

$N_{b,Rd}$ = 893 kN

$\lambda_{soprasegnato}$=0.854; Φ=1.025; α=0.49 (curva c); χ=0.628 (=1/1.59 ≈ ω=1.62)

N_{cr}=3.14²·210000·8890000/3000² =2045kN

VERIFICHE A COMPRESSIONE (Stabilità) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²; H=3000 mm (β=1.00)

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=550 kN; N_{Ed}=750 kN

CNR 10011

TA: FS=0.864

SLU: FS=0.815

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

FS = 0.840

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è un non c'è variazione significativa del fattore di sfruttamento.

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Resistenza)

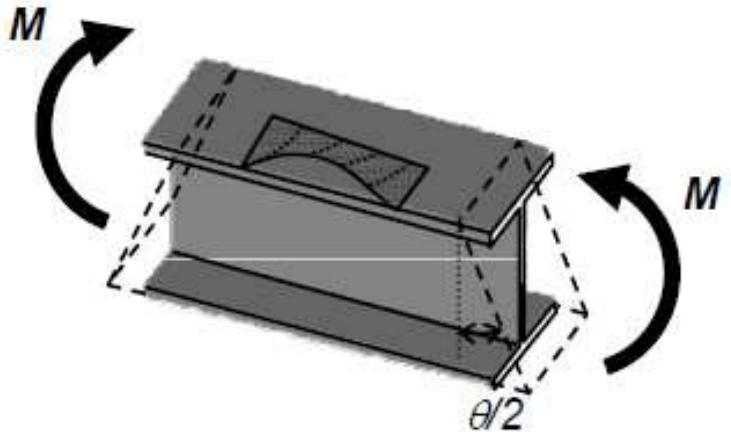
CNR 10011

$\sigma_M \leq f_d$ stati limite

$\sigma_M \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_M = \frac{M}{\psi W}$$

M il valore del momento flettente;
W il modulo resistente elastico della sezione netta
$\psi \geq 1$ un coefficiente di parziale adattamento plastico



NTC08 – EC3

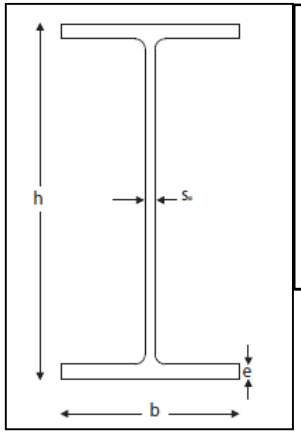
$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$ per le sezioni di classe 1 e 2;

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$ per le sezioni di classe 3;

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$ per le sezioni di classe 4;

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Resistenza) - ESEMPIO



IPE200: W_X=194 cm³;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

M_{sls}=35 kNm; M_{Ed}=49 kNm

CNR 10011

$\sigma_M \leqslant f_d$ stati limite

$\sigma_M \leqslant \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_M = \frac{M}{\psi W}$$

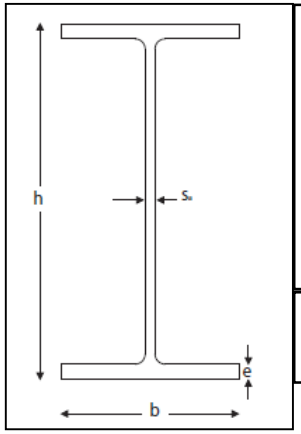
M il valore del momento flettente;
W il modulo resistente elastico della sezione netta
$\psi \geqslant 1$ un coefficiente di parziale adattamento plastico

σ_M=253 MPa < f_d (FS=0.918)

σ_M=180 MPa < σ_{amm} (FS=0.950)

ψ= 1.00 (generalmente assunto a favore di sicurezza)

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Resistenza) - ESEMPIO



IPE200: $W_{X,el.}$=194 cm³; $W_{X,pl.}$=221 cm³;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

M_{sls}=35 kNm; M_{Ed}=49 kNm

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$M_{c,Rd}=M_{pl,Rd}=\frac{W_{pl}\cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$ per le sezioni di classe 1 e 2;

$M_{c,Rd}=M_{el,Rd}=\frac{W_{el,min}\cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$ per le sezioni di classe 3;

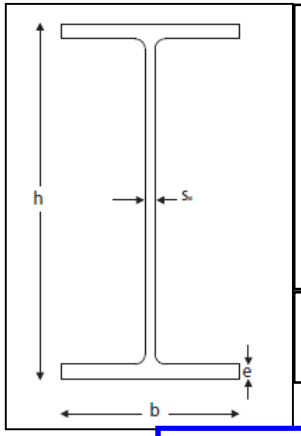
$M_{Ed}/M_{c,Rd}$=0.847<1.00

$M_{c,Rd}$ = 57.88 kNm

(profilo in classe 1)

$$\frac{0,9\cdot A_{f\,netta}\cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} > \frac{A\cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Resistenza) - ESEMPIO



IPE200: $W_{X,el.}$=194 cm³; $W_{X,pl.}$=221 cm³;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

M_{sls}=35 kNm; M_{Ed}=49 kNm

CNR 10011

TA: FS=0.950

SLU: FS=0.918

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

FS = 0.847

Oss.: Col passaggio alle **NTC**, nel caso specifico, c'è una **diminuzione del fattore di sfruttamento pari al 5÷10%.**

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)

CNR 10011

$$\sigma = \frac{\omega_1 M_{eq}}{\psi_x W} \leq \begin{cases} f_d & \text{stati limite} \\ \sigma_{adm} & \text{tensioni ammissibili} \end{cases}$$

$$\omega_1 = \frac{f_y}{0.585\ E} \quad \frac{h\ L}{b\ t_f}$$

h è l'altezza della trave;

b è la larghezza delle ali;

t_f lo spessore delle ali;

L è la lunghezza di un campo di trave fra due ritegni torsionali successivi, che impediscano cioè la rotazione della sezione intorno all'asse longitudinale. Nel caso di mensole o travi con sbalzi non munite di ritegni siffatti all'estremo libero, si assume per L il doppio dello sbalzo.

NTC08 – EC3

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,$$

M_{Ed} è il massimo momento flettente di calcolo

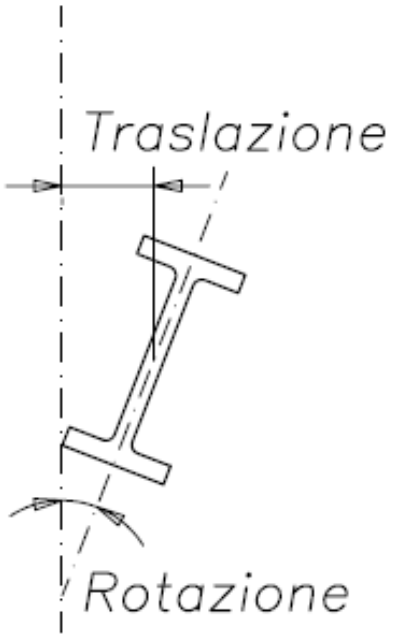
$M_{b,Rd}$ è il momento resistente di progetto per l'instabilità.

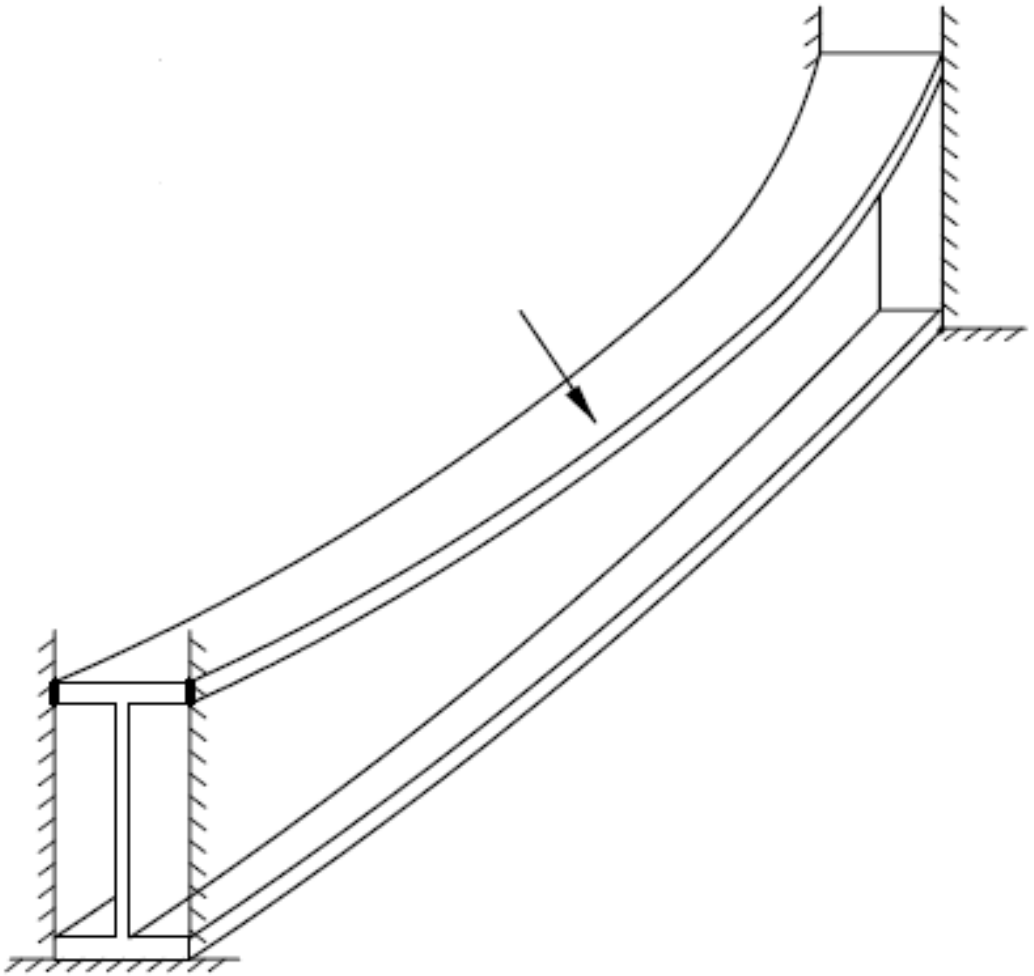
$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}},$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1,0 \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

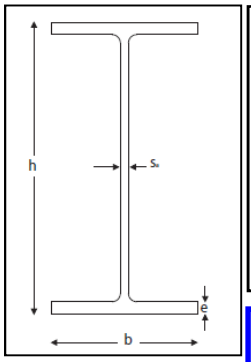
$$\lambda_{LT,soprasegnato} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yk}}{M_{cr}}}$$

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)





VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)



IPE200: W_X=194 cm^3; L= 3000 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

$M_{sls,max}$=24 kNm; $M_{ed,max}$=34 kNm

$$\sigma = \frac{\omega_1 M_{eq}}{\psi_x W} \leq \begin{cases} f_d & \text{stati limite} \\ \sigma_{adm} & \text{tensioni ammissibili} \end{cases}$$

$$\omega_1 = \frac{f_y}{0.585\ E} \quad \frac{h\ L}{b\ t_f}$$

h è l'altezza della trave;
b è la larghezza delle ali;
t_f lo spessore delle ali;

L è la lunghezza di un campo di trave fra due ritegni torsionali successivi, che impediscano cioè la rotazione della sezione intorno all'asse longitudinale. Nel caso di mensole o travi con sbalzi non munite di ritegni siffatti all'estremo libero, si assume per L il doppio dello sbalzo.

σ_{SL}=342 MPa < f_d (FS=1.24)

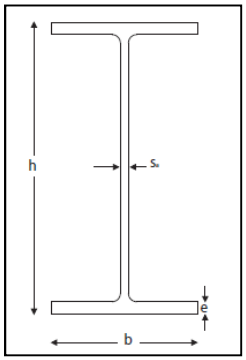
σ_{TA}=242 MPa < σ_{amm} (FS=1.27)

ω_1= 1.61*(1.40)(carichi estradosso)

M_{eq}=1.30*M_m=1.30*(16;22.6)=

=20.8;29.5 kNm

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)



IPE200: W_y=194 cm³; L= 3000 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

$M_{sls,max}$=24 kNm; $M_{ed,max}$=34 kNm

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \le 1,$$

M_{Ed} è il massimo momento flettente di calcolo

$M_{b,Rd}$ è il momento resistente di progetto per l'instabilità.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}},$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \overline{\lambda}_{LT}^2}} \le \begin{cases} 1,0 \\ \dfrac{1}{\overline{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1,0 \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

Dipende dal profilo

$$\Phi_{LT} = 0.5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}\right) + \beta \cdot \bar{\lambda}^2\right]$$

β=1 (generalmente); non inferiore a 0.75
k_c da tab. 4.2.VIII NTC; $\lambda_{LT,0}$=0.20÷0.40

$$f = 1 - 0,5\left(1 - k_c\right)\left[1 - 2,0\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8\right)^2\right]$$

Dipende dal profilo

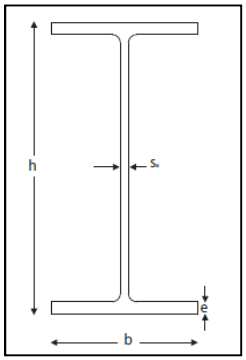
$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yk}}{M_{cr}}}$$

$$M_{cr} = \psi \cdot \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot \sqrt{EJ_y \cdot GJ_T} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{cr}}\right)^2 \cdot \frac{EJ_\omega}{GJ_T}}$$

$$\psi = 1.75 - 1.05 \cdot \frac{M_B}{M_A} + 0.3 \cdot \left(\frac{M_B}{M_A}\right)^2$$

$M_A > M_B$

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)



IPE200: W_y=194 cm³; $W_{y,pl.}$=221 cm³; L= 3000 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

$M_{sls,max}$=24 kNm; $M_{ed,max}$=34 kNm

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

$$\psi = 1.75 - 1.05 \cdot \frac{M_B}{M_A} + 0.3 \cdot \left(\frac{M_B}{M_A}\right)^2$$

ψ= 1.75

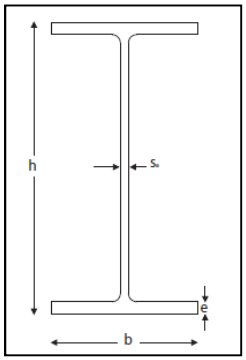
$$M_{cr} = \psi \cdot \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot \sqrt{EJ_y \cdot GJ_T} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{cr}}\right)^2 \cdot \frac{EJ_\omega}{GJ_T}}$$

M_{cr} = 93.06 KNm
J_y = 142 cm⁴; J_T = 6.98 cm⁴;
J_ω = 12990 cm⁶

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yk}}{M_{cr}}}$$

$\lambda_{LT,soprasegnato}$= 0.757152

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)



IPE200: W_y=194 cm^3; L= 3000 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

$M_{sls,max}$=24 kNm; $M_{ed,max}$=34 kNm

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)\left[1 - 2,0\left(\overline{\lambda}_{LT} - 0,8\right)^2\right]$$

f (k_c=0.94)=0.97011

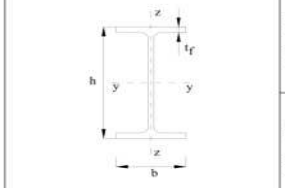
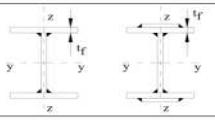
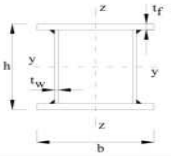
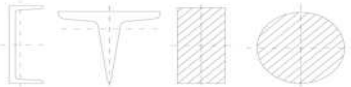
$$\Phi_{LT} = 0.5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\overline{\lambda}_{LT} - \overline{\lambda}_{LT,0}\right) + \beta \cdot \overline{\lambda}^2\right]$$

Φ_{LT} = 0.844648

α_{LT}=0.34 (tab. 4.2.VII-curva b);
$\lambda_{LT,0}$=0.40 (per sez. laminate);
β=0.75)

www.legislazionetecnica.it

Tabella 4.2.VI *Curve d'instabilità per varie tipologie di sezioni e classi d'acciaio, per elementi compressi.*

Sezione trasversale		Limiti		Inflessione intorno all'asse	Curva di instabilità S235, S275, S355, S420	Curva di instabilità S460
Sezioni laminate		h/b > 1,2	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	a_0 a_0
			40 mm < $t_f \leq$ 100 mm	y-y z-z	b c	a a
		h/b ≤ 1,2	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
			$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c
Sezioni ad I saldate		$t_f \leq 40$ mm		y-y z-z	b c	b c
		$t_f > 40$ mm		y-y z-z	c d	c d
Sezioni cave		Sezione formata "a caldo"		qualunque	a	a_0
		Sezione formata "a freddo"		qualunque	c	c
Sezioni scatolari saldate		In generale		qualunque	b	b
		saldature "spesse": a>0.5t_f; b/t_f<30; h/t_w<30		qualunque	c	c
Sezioni piene, ad U e T				qualunque	c	c
Sezioni ad L				qualunque	b	b

Curva di instabilità	a_0	a	b	c	d
Fattore di imperfezione α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

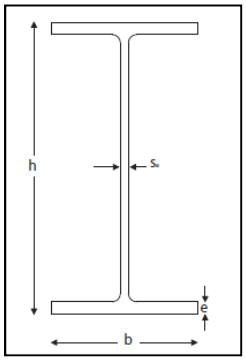
Tabella 4.2.VII *Definizione delle curve d'instabilità per le varie tipologie di sezione e per gli elementi inflessi.*

Sezione trasversale	Limiti	Curva di instabilità da Tab. 4.2.VI
Sezione laminata ad I	h/b≤2 h/b>2	b c
Sezione composta saldata	h/b≤2 h/b>2	c d
Altre sezioni trasversale	-	d

Tabella 4.2.VIII *Coefficiente correttivo del momento flettente per la verifica a stabilità delle travi inflesse.*

Distribuzione del momento flettente	Fattore correttivo k_c
M_{sx} M_{dx} $\psi = M_{dx}/M_{sx} = 1$	1,0
M_{sx} M_{dx} $-1 \le \psi \le 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)



IPE200: W_y=194 cm³; $W_{PL,y}$=211 cm³ ; L= 3000 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

$M_{sls,max}$=24 kNm; $M_{ed,max}$=34 kNm

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \overline{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1,0 \\ \dfrac{1}{\overline{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

χ_{LT} = 0.7485

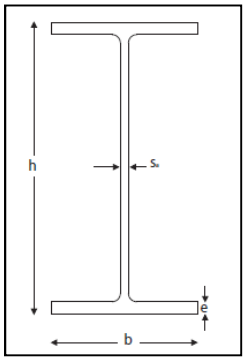
$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}},$$

$M_{b,Rd}$ = 43.33 kNm

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,$$

M_{Ed} /$M_{b,Rd}$ = 0.785

VERIFICHE A FLESSIONE RETTA (Stabilità)



IPE200: W_y=194 cm^3; L= 3000 mm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

$M_{sls,max}$=24 kNm; $M_{ed,max}$=34 kNm

CNR 10011

TA: FS=1.27 (0.91)

SLU: FS=1.24 (0.89)

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

FS = 0.785

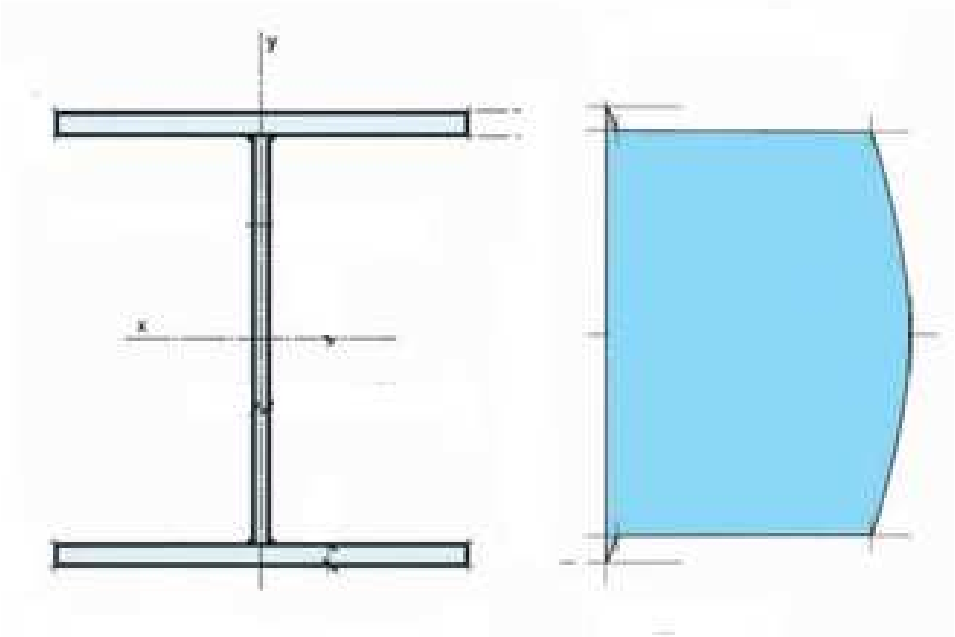
Oss.: Col passaggio alle **NTC**, nel caso specifico, c'è una **diminuzione** del **FS** pari a circa **13%.**

VERIFICHE A TAGLIO

CNR 10011

$\tau \leqslant f_d / \sqrt{3}$ stati limite

$\tau \leqslant \frac{\sigma_{adm}}{\sqrt{3}}$ tensioni ammissibili



NTC08 – EC3

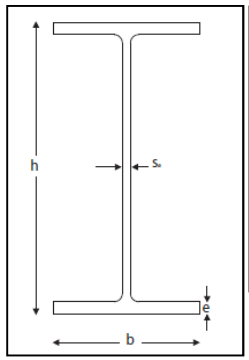
$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,$$

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2\,b\,t_f + (t_w + 2\,r)\,t_f$$

verifica instabilità anima $\quad \frac{h_w}{t} > \frac{72}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}}$

VERIFICHE A TAGLIO - ESEMPIO



IPE200: I=1943cm^4; b=5.6mm; S_x=110cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

V_{sls}=95 kN; V_{ed}=133 kN

CNR 10011

$\tau \leqslant f_d / \sqrt{3}$ stati limite

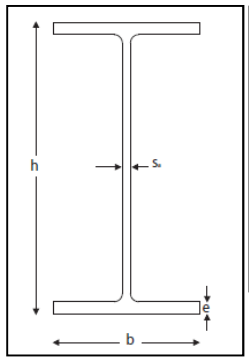
$\tau \leqslant \frac{\sigma_{adm}}{\sqrt{3}}$ tensioni ammissibili

τ_{SL}=135 MPa < $f_d/\sqrt{3}$=159 MPa (FS=0.850)

τ_{TA}= 96MPa< $\sigma_{amm}/\sqrt{3}$=110 MPa (FS=0.876)

τ=V*S_x/I*b

VERIFICHE A TAGLIO - ESEMPIO



IPE200: I=1943cm^4; b=5.6mm; S_x=110cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

V_{sls}=95 kN; V_{ed}=133 kN

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \le 1,$$

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2\,b\,t_f + (t_w + 2\,r)\,t_f$$

verifica instabilità anima $\quad \frac{h_w}{t} > \frac{72}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}}$

$V_{Ed}/V_{c,Rd}$=0.627<1.00

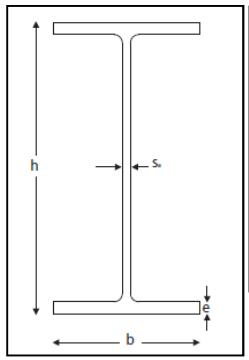
$V_{c,Rd}$ = 212 kN

A_V = 1402 mm^2

$$\frac{h_w}{t} > \frac{72}{\eta}\sqrt{\frac{235}{f_{yk}}}\ ; \frac{h_w}{t} = 32.68; \frac{72}{\eta}\sqrt{\frac{235}{f_{yk}}} = 66.56$$

$\rightarrow$ NO INSTABILITA' DELL'ANIMA

VERIFICHE A TAGLIO - ESEMPIO



IPE200: I=1943cm^3; b=5.6mm; S_x=110cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

V_{sls}=95 kN; V_{ed}=133 kN

CNR 10011

TA: FS=0.876

SLU: FS=0.850

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

FS = 0.627

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è un diminuzione del fattore di sfruttamento pari a circa il 20÷25% (rispetto al calcolo con la formula di Jourawsky).

VERIFICHE A FLESSIONE E TAGLIO

CNR 10011

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

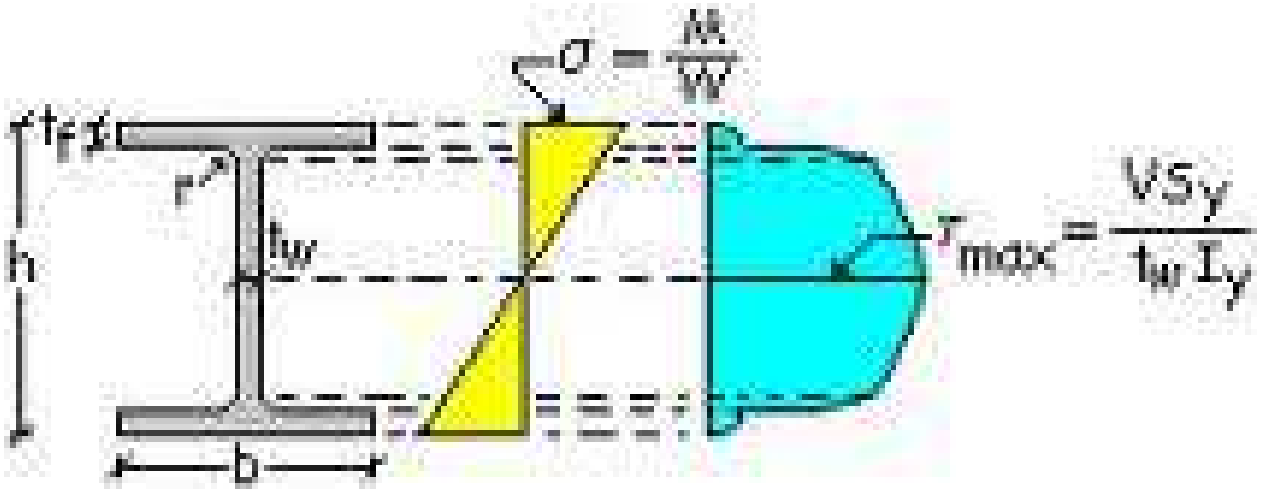
$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\,\tau_{xy}^2}$$

NTC08 – EC3

Se $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow$ Trascura influenza V su M.

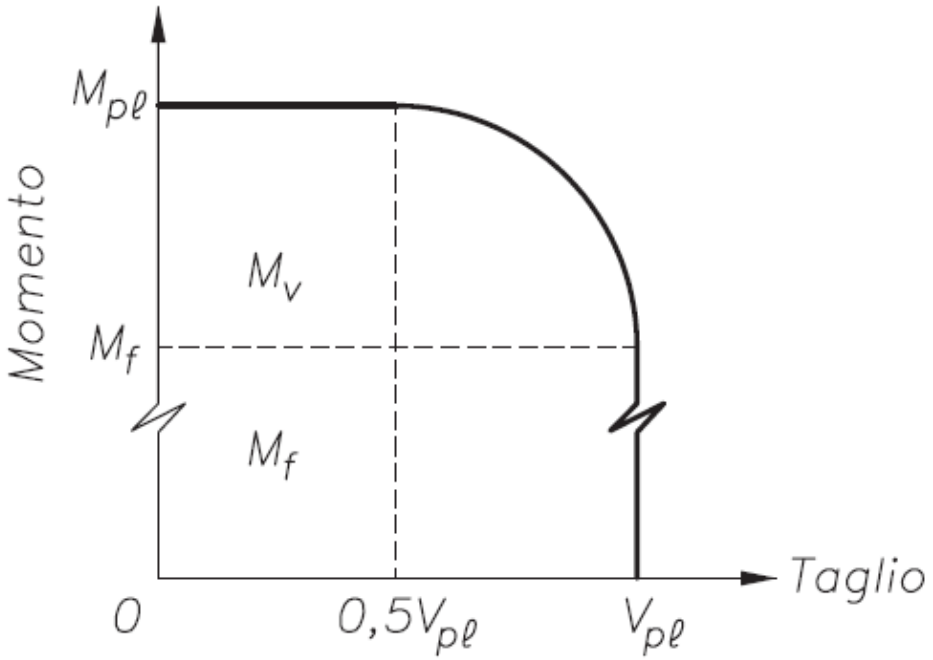
Se $V_{Ed} > 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow$ C'è interazione V - M

$$\rho = \left[\frac{2V_{Ed}}{V_{c,Rd}} - 1\right]^2 ; \; f_{yk,verifica\ \ flessione} = (1-\rho) f_{yk}$$



VERIFICHE A FLESSIONE E TAGLIO

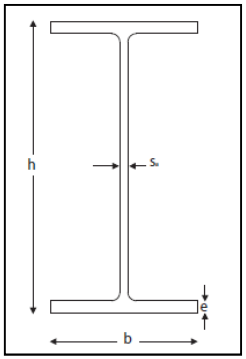
Se $V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow$ Trascura influenza V su M. Se $V_{Ed} > 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow$ C'è interazione V - M



Nel caso di sezioni trasversali a doppio T aventi ali uguali, con flessione attorno all'asse forte (asse *y*), il momento flettente resistente ridotto viene definito, con riferimento alla simbologia introdotta relativamente ai casi di flessione e taglio, come:

$$M_{y,V,Rd} = \left(W_{pl,y} - \frac{\rho \cdot A_w^2}{4 \cdot t_w}\right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

VERIFICHE A FLESSIONE E TAGLIO
ESEMPIO



IPE200: A_{anima}=1025 mm²; W=194 cm³

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

V_{sls}=95 kN; V_{ed}=133 kN

M_{sls}=30 kNm; M_{ed}=42 kNm

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

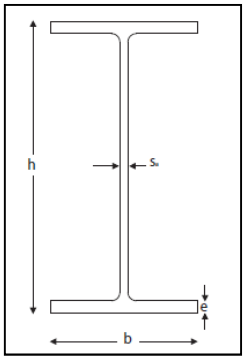
$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

$\sigma_{id,SL}$=198 MPa < f_d(FS=0.720)

$\sigma_{id,TA}$= 141MPa< σ_{amm} (FS=0.742)

Si considera lo sforzo presente sotto ala.

VERIFICHE A FLESSIONE E TAGLIO
ESEMPIO



IPE200: A_{anima}=1402 mm²; W_{el}=194 cm³; W_{pl}=221 cm³

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

V_{sls}=95 kN; V_{ed}=133 kN

M_{sls}=30 kNm; M_{ed}=42 kNm

Se $V_{Ed} \le 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow$ Trascura influenza V su M.

Se $V_{Ed} > 0.5 \cdot V_{c,Rd} \rightarrow$

$$\rho = \left[\frac{2V_{Ed}}{V_{c,Rd}} - 1\right]^2 ; \; f_{yk,verifica\ \ flessione} = (1-\rho) f_{yk}$$

$$V_{Ed}/V_{c,Rd} = 0.627 \rightarrow V_{Ed} > 0.5 \cdot V_{c,Rd}$$

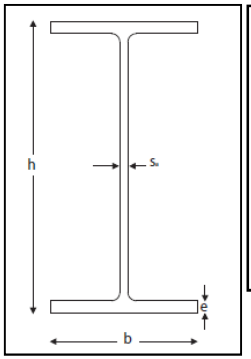
$$\rightarrow \rho = \left[\frac{2V_{Ed}}{V_{c,Rd}} - 1\right]^2 = 0.065$$

$$f_{yk,verifica\ \ flessione} = (1-0.065) f_{yk} = 257 MPa$$

$V_{c,Rd}$ = 212 kN

$M_{Ed}/M_{c,Rd}$=0.776<1.00 - $M_{c,Rd}$ = 54.10 kNm (profilo in classe 1)

VERIFICHE A FLESSIONE E TAGLIO
ESEMPIO



IPE200: A_{anima}=1025 mm²; W_{el}=194 cm³; W_{pl}=221 cm³

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

CALCOLO ALTERNATIVO

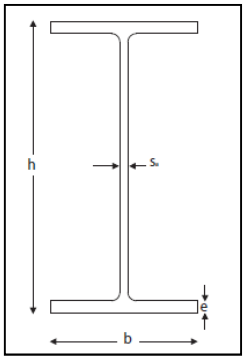
V_{sls}=95 kN; V_{ed}=133 kN

M_{sls}=30 kNm; M_{ed}=42 kNm

$$M_{c,Rd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}\left(W_{pl.} - \frac{\rho \cdot A_v^{\,2}}{4 \cdot t_w}\right) = \frac{275}{1.05}\left(221000 - \frac{0.05 \cdot 1402^2}{4 \cdot 5.6}\right) = 56.73 kNm$$

Si osserva che con questo secondo calcolo il momento resistente aumenta del 5%. FS=0.740

VERIFICHE A FLESSIONE E TAGLIO
ESEMPIO



IPE200: A_{anima}=1025 / 1402 mm²; W=194 cm³

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

V_{sls}=95 kN; V_{ed}=133 kN - M_{sls}=30 kN; M_{ed}=42 kN

CNR 10011

TA: FS=1.13

SLU: FS=1.08

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

FS = 0.776; 0.740

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è una sensibile diminuzione del fattore di sfruttamento, circa il 30%

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (RESISTENZA)

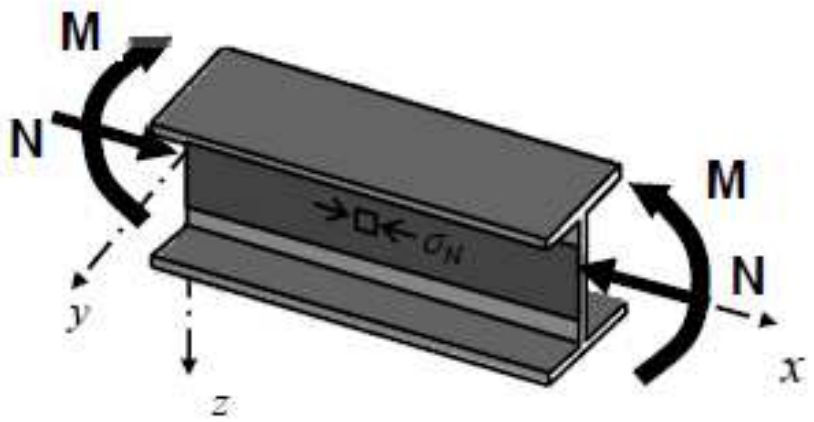
CNR 10011

$\sigma_N + \sigma_M \leq f_d$ stati limite

$\sigma_N + \sigma_M \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

σ_N lo sforzo normale causato da azioni assiali di trazione e compressione e valutato secondo i punti 6.2. o 6.3.;

σ_M lo sforzo normale causato dal momento flettente e valutato secondo il punto 6.5.



NTC08 – EC3

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}\,(1-n) / (1-0{,}5\,a) \leq M_{pl,y,Rd}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad \text{per } n \leq a,$$

$$\text{o } M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}\left[1-\left(\frac{n-a}{1-a}\right)^2\right] \quad \text{per } n > a$$

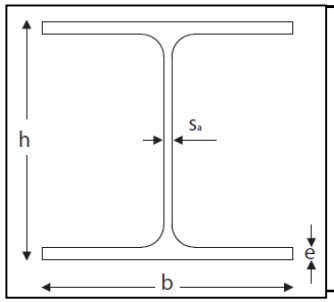
$M_{pl,y,Rd}$ il momento resistente plastico a flessione semplice nel piano dell'anima,
$M_{pl,z,Rd}$ il momento resistente plastico a flessione semplice nel piano delle ali.

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} \qquad N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$a = (A - 2\,b\,t_f) / A \leq 0{,}5$$

A è l'area lorda della sezione,
b è la larghezza delle ali,
t_f è lo spessore delle ali.

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_{el}=311 cm^3; W_{pl}=354 cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=400 kN; N_{ed}=560 kN

M_{sls}=30 kNm; M_{ed}=42 kNm

$\sigma_N + \sigma_M \leqslant f_d$ stati limite

$\sigma_N + \sigma_M \leqslant \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

σ_N lo sforzo normale causato da azioni assiali di trazione e compressione e valutato secondo i punti 6.2. o 6.3.;

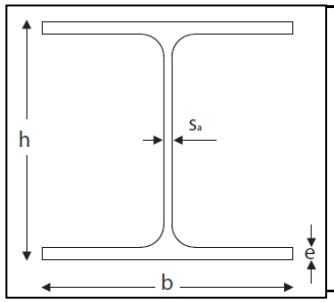
σ_M lo sforzo normale causato dal momento flettente e valutato secondo il punto 6.5.

$\sigma_{N+M,SL}$=238 MPa<f_d(FS=0.866)

$\sigma_{N+M,TA}$=171 MPa<σ_{amm} (FS=0.895)

ψ=1.00

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_{el}=311 cm^3; W_{pl}=354 cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

N_{sls}=400 kN; N_{ed}=560 kN

M_{sls}=30 kNm; M_{ed}=42 kNm

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}\,(1\text{-}n) / (1\text{-}\,0{,}5\,a) \le M_{pl,y,Rd}$$

$$n = N_{Ed} / N_{pl.Rd}$$

$$a = (\,A - 2\,b\,t_f\,) / A \le 0{,}5$$

A è l'area lorda della sezione,
b è la larghezza delle ali,
t_f è lo spessore delle ali.

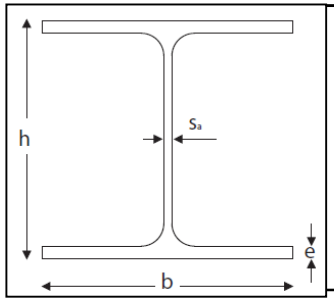
$$M_{N,y,Rd} = 92.71 \cdot \frac{1-0.394}{1-0.5 \cdot 0.234} = 63.63 kNm$$

$$n = 0.394 (= 560/1422)$$

$$a = 0.234 (= (54.30 - 2 \cdot 16 \cdot 1.3)/54.30)$$

$$M_{Ed} / M_{N,y,Rd} = 0.660$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_{el}=311 cm^3; W_{pl}=354 cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

TA: FS=0.895

SLU: FS=0.866

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

FS = 0.660

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è una diminuzione del fattore di sfruttamento di circa il 20%.

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA')

CNR 10011

$$\omega \frac{N}{A} + \frac{M}{\psi W \left(1 - \nu \frac{N}{N_{cr}}\right)} \leqslant \begin{cases} f_d & \text{Stati limite} \\ \sigma_{adm} & \text{Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

ψ fattore di forma definito al punto 6.5.3.

ν coefficiente definito al punto 7.1.

$N_{cr} = \sigma_{cr} A$ con σ_{cr} tensione critica calcolata con la formula di Eulero anche in campo plastico, per la snellezza relativa al piano di flessione, riportata nel prospetto 7-VII.

ω si ricava dai prospetti 7-II, 7-III e 7-IV.

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{M_{x,eq} \cdot \frac{f_y}{\sigma_D}}{\psi_x W_x \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq}}{\psi_y W_y \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,y}}\right)} \leqslant \begin{cases} f_d & \text{Stati limite} \\ \sigma_{adm} & \text{Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

SVERGOLAMENTO

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA')

CIRCOLARE NTC - EC3

Metodo A

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

χ_{min} è il minimo fattore χ

W_y e W_z sono i moduli resistenti

$N_{cr,y}$ e $N_{cr,z}$ carichi critici euleriani

$M_{yeq,Ed}$ e $M_{zeq,Ed}$ valori equivalenti dei momenti flettenti

In presenza di fenomeni di instabilità flesso-torsionali bisogna verificare che sia:

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

ATT! Nelle NTC non sono presenti formulazioni di verifica, ma si rimanda alla circolare (o Eurocodice 3). Le formule sono relative solo al caso generale di presso flessione deviata.

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA')

CIRCOLARE NTC - EC3

Metodo B

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{yy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{yz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_z\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{zy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{zz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

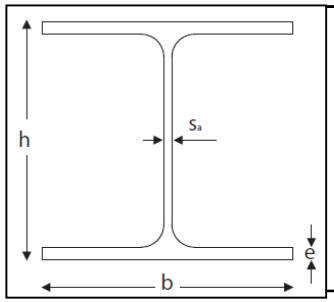
k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} e k_{zz} coefficienti di interazione

χ_y, χ_z coefficienti di riduzione per l'instabilità a compressione

χ_{LT} coefficiente di riduzione per l'instabilità flessotorsionale

ATT! Nelle NTC non sono presenti formulazioni di verifica, ma si rimanda alla circolare (o Eurocodice 3). Le formule sono relative solo al caso generale di presso flessione deviata.

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=300 kN; N_{ed}=420 kN – $M_{sls,eq.}$=30 kNm; $M_{Ed,eq.}$=42 kNm

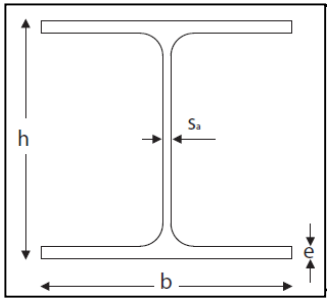
CNR 10011

$$\omega \frac{N}{A} + \frac{M}{\psi W\left(1 - \nu \frac{N}{N_{cr}}\right)} \leqslant \begin{cases} f_d & \text{Stati limite} \\ \sigma_{adm} & \text{Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

$\sigma_{N+M,SL}$= 271 MPa<f_d(FS=0.986) $\sigma_{N+M,TA}$= 194MPa>$\sigma_{amm.}$ (FS=1.019)

$\omega(\lambda_{min}=74)=1.62$; $\psi=1.00$; $\upsilon=1$ (SL)/1.5(TA); $N_{cr}(\lambda_{"M"}=44)=5701$ kN

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

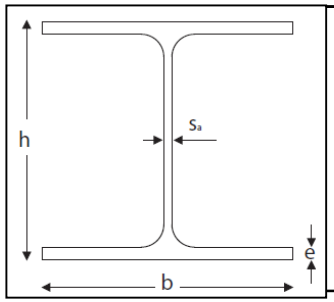
N_{sls}=300 kN; N_{ed}=420 kN – $M_{sls,eq.}$=30 kNm; $M_{Ed,eq.}$=42 kNm

CNR 10011

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{M_{x,eq} \cdot \frac{f_y}{\sigma_D}}{\psi_x W_x \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq}}{\psi_y W_y \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,y}}\right)} \leqslant \begin{cases} f_d \text{ Stati limite} \\ \sigma_{adm} \text{ Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

$f_y/\sigma_D = f_y/(M_{cr}/W_{PL,Y}) = 275/893 = 0.31 < 1 \rightarrow$ NO SVERGOLAMENTO!

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=300 kN; N_{ed}=420 kN – $M_{sls,eq.}$=30 kNm; $M_{Ed,eq.}$=42 kNm

Metodo A

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

χ_{min} è il minimo fattore χ
W_y e W_z sono i moduli resistenti
$N_{cr,y}$ e $N_{cr,z}$ carichi critici euleriani
$M_{yeq,Ed}$ e $M_{zeq,Ed}$ valori equivalenti dei momenti flettenti

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

F_{Ed}/F_{Rd} = 0.971 < 1

χ_{min}=0.629;

$N_{cr,y}$=5739 kN

$N_{cr,z}$=2045 kN

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$$\chi_{\min} = \min(\chi_y; \chi_z)$$

$$\lambda_{soprasegnato} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \rightarrow \lambda_{soprasegnato,y} = 0.510; \lambda_{soprasegnato,z} = 0.854$$

$$\phi = 0.50\left[1 + \alpha\left(\lambda_{soprasegnato} - 0.20\right) + \lambda_{soprasegnato}^{\ 2}\right] \rightarrow \phi_y = 0.682; \phi_z = 1.024$$

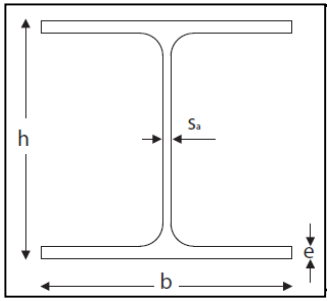
$$\alpha_y = 0.34; \alpha_z = 0.49 \ \text{(fattori d'imperfezione)}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{soprasegnato}^{\ 2}}} \rightarrow \chi_y = 0.881; \chi_z = 0.629$$

$$\chi_{\min} = 0.629$$

$$F_{Ed} / F_{Rd} = \frac{420000 \cdot 1.05}{0.629 \cdot 275 \cdot 5430} + \frac{42000000 \cdot 1.05}{275 \cdot 354000 \cdot \left(1 - \frac{420000}{5739000}\right)} = 0.469 + 0.488 = 0.958$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=300 kN; N_{ed}=420 kN – $M_{sls,eq.}$=30 kNm; $M_{Ed,eq.}$=42 kNm

Valutiamo ora i possibili fenomeni di instabilità LATERALE

Metodo A

In presenza di fenomeni di instabilità flesso-torsionali bisogna verificare che sia:

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO

… riportiamo le formule per determinare i vari coefficienti in gioco…

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1{,}0 \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

$$\Phi_{LT} = 0.5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}\right) + \beta \cdot \bar{\lambda}^2\right]$$

$$f = 1 - 0{,}5\left(1 - k_c\right)\left[1 - 2{,}0\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}8\right)^2\right]$$

$$\psi = 1.75 - 1.05 \cdot \frac{M_B}{M_A} + 0.3 \cdot \left(\frac{M_B}{M_A}\right)^2$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yk}}{M_{cr}}}$$

$$M_{cr} = \psi \cdot \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot \sqrt{EJ_y \cdot GJ_T} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{cr}}\right)^2 \cdot \frac{EJ_\omega}{GJ_T}}$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO

… e svilupppiamo il calcolo passo-passo…

$$\psi = 1.75 - 1.05 \cdot \frac{M_B}{M_A} + 0.3 \cdot \left(\frac{M_B}{M_A} \right)^2$$

ψ= 1.75

$$M_{cr} = \psi \cdot \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot \sqrt{EJ_y \cdot GJ_T} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{cr}} \right)^2 \cdot \frac{EJ_\omega}{GJ_T}}$$

M_{cr} = 797 KNm

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yk}}{M_{cr}}}$$

λ_{LT}= 0.349

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)\left[1 - 2,0\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8\right)^2\right]$$

f (k_c=0.94)=0.982

$$\Phi_{LT} = 0.5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}\right) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$$

$Ø_{LT}$ = 0.571

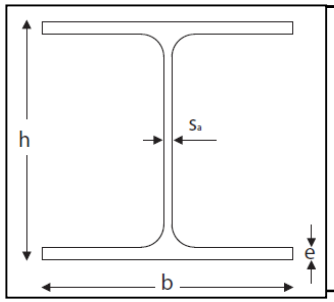
α_{LT}=0.34; $\lambda_{LT,0}$=0.20; β=0.75

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \le \begin{cases} 1,0 \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

χ_{LT} = 0.836

ATT! Ci sono fenomeni di instabilità laterale (o "svergolamento").

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

Ed ecco il calcolo finale:

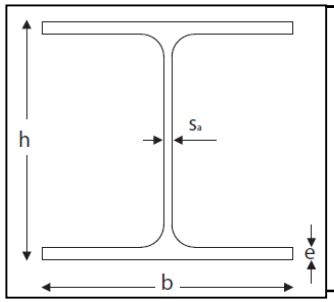
Metodo A

In presenza di fenomeni di instabilità flesso-torsionali bisogna verificare che sia:

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

$$F_{Ed}/F_{Rd}=\frac{420000\cdot 1.05}{0.629\cdot 275\cdot 5430}+\frac{42000000\cdot 1.05}{0.836\cdot 275\cdot 354000\cdot\left(1-\frac{420000}{5739000}\right)}=0.469+0.502=0.971$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=300 kN; N_{ed}=420 kN – $M_{sls,eq.}$=30 kNm; $M_{Ed,eq.}$=42 kNm

Metodo B

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{yy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{yz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_z\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{zy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{zz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} e k_{zz} coefficienti di interazione
χ_y, χ_z coefficienti di riduzione per l'instabilità a compressione
χ_{LT} coefficiente di riduzione per l'instabilità flessotorsionale

F_{Ed}/F_{Rd} = 0.963 < 1

χ_z=0.629; χ_y=0.881;

k_{yy}=1.048; k_{yz}=0.000;

(vedere *slides* seguenti)

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$\chi_y = 0.881; \chi_z = 0.629$

$\chi_{LT} = 0.836$

$\lambda_{soprasegnato,y} = 0.349$

$M_{z,Ed} = 0$ (flessione retta)

$$k_{yy} = \alpha_{my}\left(1+\left(\lambda_{soprasegnato,y}-0.20\right)\cdot\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}\right) \le \alpha_{my}\left(1+0.80\cdot\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}\right)$$

α_{my} (Trave sempl. appoggiata con carico distribuito (tab. C4.2.VI) : $\alpha_h = 0; \psi = 0$) $= 0.95$

$$k_{yy} = 0.95\left(1+\left(0.349-0.20\right)\cdot\frac{420000\cdot 1.05}{0.881\cdot 5430\cdot 275}\right) = 0.9975$$

$k_{zy} = 0$ (vedere tabella C4.2.IV Circolare NTC)

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$\chi_y = 0.881; \chi_z = 0.629$

$\chi_{LT} = 0.9305$

$k_{yy} = 1.04872$

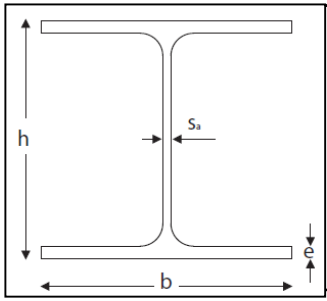
$k_{zy} = 0$

$$F_{Ed} / F_{Rd} = \frac{420000 \cdot 1.05}{0.881 \cdot 5430 \cdot 275} + 0.9975 \frac{42000000 \cdot 1.05}{0.836 \cdot 275 \cdot 354000} = 0.335 + 0.540 = 0.875$$

$$F_{Ed} / F_{Rd} = \frac{420000 \cdot 1.05}{0.629 \cdot 5430 \cdot 275} + 0.000 \frac{42000000 \cdot 1.05}{0.836 \cdot 275 \cdot 354000} = 0.469 + 0.000 = 0.469$$

Quindi FS risulta pari a 0.875

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE RETTA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=300 kN; N_{ed}=420 kN – $M_{sls,eq.}$=30 kNm; $M_{Ed,eq.}$=42 kNm

CNR 10011

TA: FS=1.019

SLU: FS=0.986

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

FS = 0.971 (Metodo A)

FS = 0.875 (Metodo B)

Oss.: Col passaggio alle NTC sono impiegabili due metodi distinti che forniscono risultati differenti del 10% (!!!).

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (RESISTENZA)

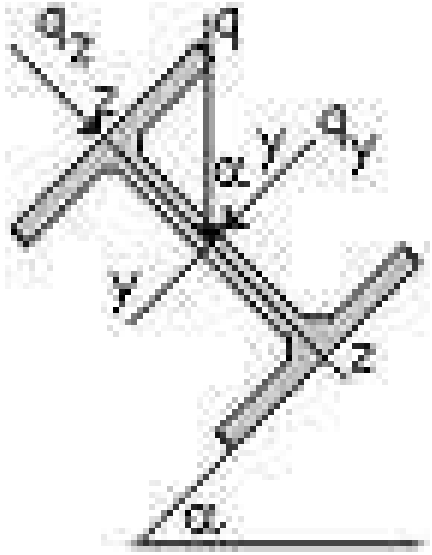
CNR 10011

$\sigma_N + \sigma_M \leq f_d$ stati limite

$\sigma_N + \sigma_M \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

σ_N lo sforzo normale causato da azioni assiali di trazione e compressione e valutato secondo i punti 6.2. o 6.3.;

σ_M lo sforzo normale causato dal momento flettente e valutato secondo il punto 6.5.



NTC08 – EC3

sezioni ad I o ad H di classe 1 e 2 doppiamente simmetriche.

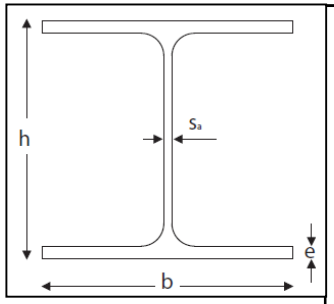
$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right)^{2} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right)^{5n} \leq 1,$$

$n \geq 0,2$ essendo $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$.

Nel caso in cui $n < 0,2$, e comunque per sezioni generiche classe 1 e 2

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right) + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right) \leq 1.$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; $W_{y,el.}$=311cm^3; $W_{z,el.}$=111cm^3; $W_{y,pl.}$=354cm^3; $W_{z,el.}$=170cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $M_{sls,z}$=10 kNm
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $M_{Ed,z}$=14 kNm

$\sigma_N + \sigma_M \leq f_d$ stati limite

$\sigma_N + \sigma_M \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

σ_N lo sforzo normale causato da azioni assiali di trazione e compressione e valutato secondo i punti 6.2. o 6.3.;

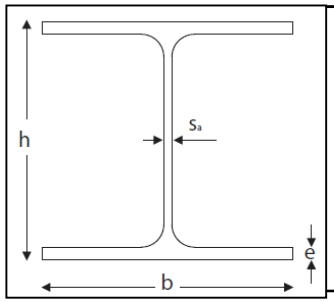
σ_M lo sforzo normale causato dal momento flettente e valutato secondo il punto 6.5.

$\sigma_{N+M,SL}$=255 MPa<f_d(FS=0.927)

$\sigma_{N+M,TA}$=182 MPa<σ_{amm} (FS=0.958)

ψ_y=1.00; ψ_z=1.00

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_y=311cm^3; W_z=111cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $M_{sls,z}$=10 kNm
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $M_{Ed,z}$=14 kNm

sezioni ad I o ad H di classe 1 e 2 doppiamente simmetriche.

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right)^{2}+\left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right)^{5n}\le 1,$$

$n \ge 0,2$ essendo $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$.

Nel caso in cui $n < 0,2$, e comunque per sezioni generiche classe 1 e 2

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right)+\left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right)\le 1.$$

$$M_{N,y,Rd} = 92.71\cdot\frac{1-0.148}{1-0.5\cdot 0.234}48 = 89.46kNm$$

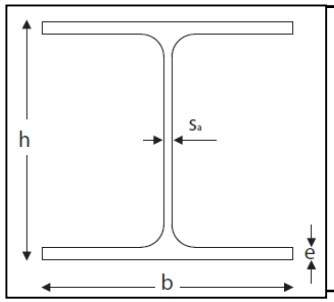
$$n = 0.148 (= 210/(54.30\cdot 27.5/1.05))$$

$$a = 0.234 (= (54.30 - 2\cdot 16\cdot 1.3/54.3))$$

$n < a$:

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = 170\cdot 0.275/1.05 = 44.52kNm$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_y=311cm^3; W_z=111cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $M_{sls,z}$=10 kNm
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $M_{Ed,z}$=14 kNm

sezioni ad I o ad H di classe 1 e 2 doppiamente simmetriche.

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right)^{2}+\left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right)^{5n}\le 1,$$

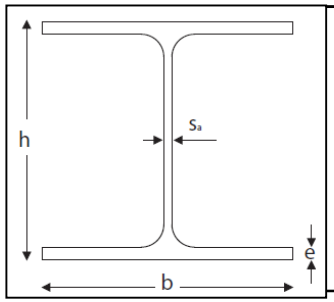
$n \ge 0{,}2$ essendo $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$.

Nel caso in cui $n < 0{,}2$, e comunque per sezioni generiche classe 1 e 2

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right)+\left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right)\le 1.$$

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})+(M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})=$$
$$=(28/89.46)+(14/44.52)=$$
$$=0.627<1$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_y=311cm^3; W_z=111cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

TA: FS=0.958

SLU: FS=0.927

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

FS = 0.627

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è un diminuzione del fattore di sfruttamento pari al 30%.

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA')

CNR 10011

7.4.1.2. Nel caso di aste prismatiche soggette ad un carico di compressione N e a momenti flettenti M_x ed M_y agenti in due piani principali d'inerzia, in mancanza di verifiche più sofisticate, si potrà controllare che sia:

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{M_{x,eq}}{\psi_x W_x \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq}}{\psi_y W_y \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,y}}\right)} \leq \begin{cases} f_d & \text{Stati limite} \\ \sigma_{adm} & \text{Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

SVERGOLAMENTO

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{M_{x,eq} \cdot \frac{f_y}{\sigma_D}}{\psi_x W_x \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq}}{\psi_y W_y \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,y}}\right)} \leq \begin{cases} f_d & \text{Stati limite} \\ \sigma_{adm} & \text{Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA')

CIRCOLARE NTC - EC3

Metodo A

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

χ_{min} è il minimo fattore χ

W_y e W_z sono i moduli resistenti

$N_{cr,y}$ e $N_{cr,z}$ carichi critici euleriani

$M_{yeq,Ed}$ e $M_{zeq,Ed}$ valori equivalenti dei momenti flettenti

In presenza di fenomeni di instabilità flesso-torsionali bisogna verificare che sia:

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

ATT! Nelle NTC non sono presenti formulazioni di verifica, ma si rimanda alla circolare (o Eurocodice 3).

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA')

CIRCOLARE NTC - EC3

Metodo B

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{yy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{yz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_z\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{zy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{zz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} e k_{zz} coefficienti di interazione

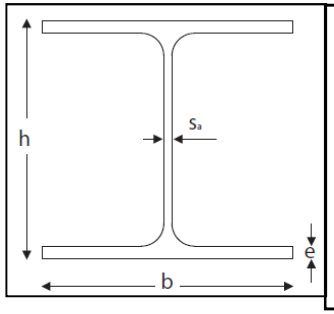
χ_y, χ_z coefficienti di riduzione per l'instabilità a compressione

χ_{LT} coefficiente di riduzione per l'instabilità flessotorsionale

ATT! Nelle NTC non sono presenti formulazioni di verifica, ma si rimanda alla circolare (o Eurocodice 3).

ATT! I coefficienti k_{zz} presenti nella circolare sono SBAGLIATI (sono riportati χ_y-λ_y invece di χ_z-λ_z. Utilizzare i coefficienti di EC3 (annex B).

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²; W_x=311cm³; W_y=111cm³; L=300cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa

f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,x}$=15 kNm; $M_{sls,y}$=7 kNm

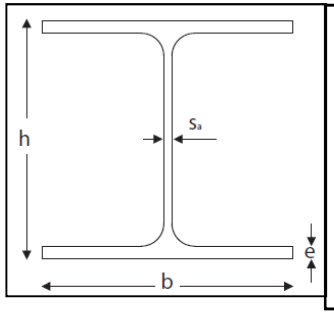
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,x}$=21 kNm; $M_{Ed,y}$=10 kNm

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{M_{x,eq}}{\psi_x W_x \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq}}{\psi_y W_y \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,y}}\right)} \leq \begin{cases} f_d & \text{Stati limite} \\ \sigma_{amm} & \text{Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

$\omega(\lambda_{min}=74)=1.62$; υ=1 (SL)/1.5(TA); ψ_x=1.00; ψ_y=1.00;

$N_{cr,x}(\lambda_{"Mx"}=44)=5701$ kN; $N_{cr,y}(\lambda_{"My"}=74)=2014$ kN

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_x=311cm^3; W_y=111cm^3; L=300cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa

f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,x}$=15 kNm; $M_{sls,y}$=7 kNm

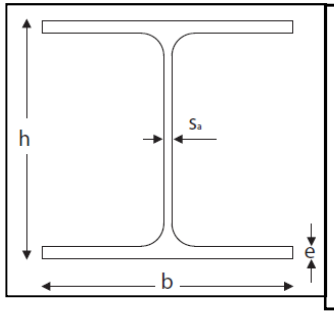
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,x}$=21 kNm; $M_{Ed,y}$=10 kNm

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{M_{x,eq}}{\psi_x W_x \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq}}{\psi_y W_y \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,y}}\right)} \leq \begin{cases} f_d & \text{Stati limite} \\ \sigma_{amm} & \text{Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

$\sigma_{N+M,SL}$= 240 MPa<f_d(FS=0.872)

$\sigma_{N+M,TA}$= 170 MPa<$\sigma_{amm.}$ (FS=0.893)

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²; W_x=311cm³; W_y=111cm³; L=300cm
S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

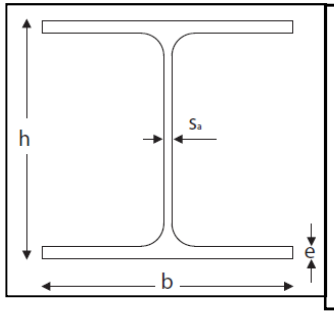
N_{sls}=150 kN; $M_{sls,x}$=15 kNm; $M_{sls,y}$=7 kNm
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,x}$=21 kNm; $M_{Ed,y}$=10 kNm

CNR 10011

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{M_{x,eq} \cdot \frac{f_y}{\sigma_D}}{\psi_x W_x \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq}}{\psi_y W_y \left(1 - \frac{\nu N}{N_{cr,y}}\right)} \leq \begin{cases} f_d \text{ Stati limite} \\ \sigma_{adm} \text{ Tensioni ammissibili} \end{cases}$$

$f_y/\sigma_D = \omega_1 < 1 \rightarrow$ NO SVERGOLAMENTO!

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²; W_y=311cm³; W_z=111cm³; L=300cm
S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,y}$=15 kNm; $M_{sls,z}$=7 kNm
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,y}$=21 kNm; $M_{Ed,z}$=10 kNm

Metodo A

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

χ_{min} è il minimo fattore χ
W_y e W_z sono i moduli resistenti
$N_{cr,y}$ e $N_{cr,z}$ carichi critici euleriani
$M_{yeq,Ed}$ e $M_{zeq,Ed}$ valori equivalenti dei momenti flettenti

F_{Ed}/F_{Rd} = 0.720 < 1

χ_{min}=0.629;

$N_{cr,y}$=5739 kN

$N_{cr,z}$=2045 kN

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$$\chi_{\min} = \min(\chi_y; \chi_z)$$

$$\lambda_{soprasegnato} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \rightarrow \lambda_{soprasegnato,y} = 0.510; \lambda_{soprasegnato,z} = 0.854$$

$$\phi = 0.50\left[1 + \alpha\left(\lambda_{soprasegnato} - 0.20\right) + \lambda_{soprasegnato}^{\ 2}\right] \rightarrow \phi_y = 0.682; \phi_z = 1.024$$

$$\alpha_y = 0.34; \alpha_z = 0.49 \ \text{(fattori d'imperfezione)}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{soprasegnato}^{\ 2}}} \rightarrow \chi_y = 0.881; \chi_z = 0.629$$

$$\chi_{\min} = 0.629$$

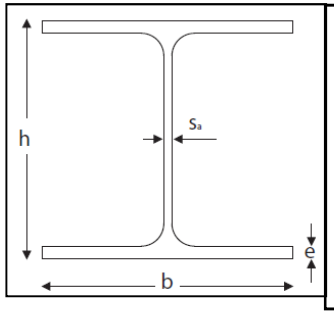
VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$$F_{Ed} / F_{Rd} = \frac{210000 \cdot 1.05}{0.629 \cdot 275 \cdot 5430} + \frac{21000000 \cdot 1.05}{275 \cdot 354000 \cdot \left(1 - \frac{210000}{5739000}\right)} +$$

$$+ \frac{10000000 \cdot 1.05}{275 \cdot 170000 \cdot \left(1 - \frac{210000}{2045000}\right)} = 0.235 + 0.235 + 0.250 = 0.720$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm²; W_y=311cm³; W_z=111cm³; L=300cm
S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,y}$=15 kNm; $M_{sls,z}$=7 kNm
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,y}$=21 kNm; $M_{Ed,z}$=10 kNm

Valutiamo ora i possibili fenomeni di instabilità LATERALE

Metodo A

In presenza di fenomeni di instabilità flesso-torsionali bisogna verificare che sia:

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

… riportiamo le formule per determinare i vari coefficienti in gioco…

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1{,}0 \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

$$\Phi_{LT} = 0.5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}\right) + \beta \cdot \bar{\lambda}^2\right]$$

$$f = 1 - 0{,}5\left(1 - k_c\right)\left[1 - 2{,}0\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}8\right)^2\right]$$

$$\psi = 1.75 - 1.05 \cdot \frac{M_B}{M_A} + 0.3 \cdot \left(\frac{M_B}{M_A}\right)^2$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yk}}{M_{cr}}}$$

$$M_{cr} = \psi \cdot \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot \sqrt{EJ_y \cdot GJ_T} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{cr}}\right)^2 \cdot \frac{EJ_\omega}{GJ_T}}$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

… e svilupppiamo il calcolo passo-passo…

$$\psi = 1.75 - 1.05 \cdot \frac{M_B}{M_A} + 0.3 \cdot \left(\frac{M_B}{M_A} \right)^2$$

ψ= 1.75

$$M_{cr} = \psi \cdot \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot \sqrt{EJ_y \cdot GJ_T} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{L_{cr}} \right)^2 \cdot \frac{EJ_\omega}{GJ_T}}$$

M_{cr} = 797 KNm

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_{yk}}{M_{cr}}}$$

λ_{LT}= 0.349

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)\left[1 - 2,0\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8\right)^2\right]$$

$f\ (k_c=0.94)=0.982$

$$\Phi_{LT} = 0.5\left[1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}\right) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$$

$\emptyset_{LT} = 0.571$

$\alpha_{LT}=0.34;\ \lambda_{LT,0}=0.20;\quad \beta=0.75$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \le \begin{cases} 1,0 \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

$\chi_{LT} = 0.836$

ATT! Ci sono fenomeni di instabilità laterale (o "svergolamento").

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

Ed ecco il calcolo finale:

Metodo A

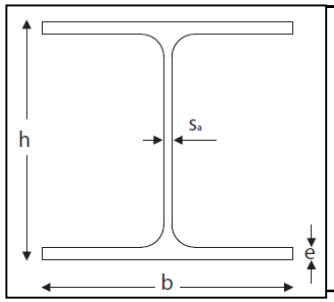
In presenza di fenomeni di instabilità flesso-torsionali bisogna verificare che sia:

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{min}\cdot f_{yk}\cdot A}+\frac{M_{yeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot f_{yk}\cdot W_y\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}+\frac{M_{zeq,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{f_{yk}\cdot W_z\cdot\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}\le 1$$

$$F_{Ed}/F_{Rd}=\frac{210000\cdot 1.05}{0.629\cdot 275\cdot 5430}+\frac{21000000\cdot 1.05}{0.836\cdot 275\cdot 354000\cdot\left(1-\frac{210000}{5739000}\right)}+$$

$$+\frac{10000000\cdot 1.05}{275\cdot 170000\cdot\left(1-\frac{210000}{2045000}\right)}=0.235+0.281+0.250=0.766$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

N_{sls}=150 kN; $M_{sls,y}$=15 kNm; $M_{sls,z}$=7 kNm
N_{ed}=210 kN; $M_{Ed,y}$=21 kNm; $M_{Ed,z}$=10 kNm

Metodo B

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{yy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{yz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_z\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{zy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{zz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} e k_{zz} coefficienti di interazione
χ_y, χ_z coefficienti di riduzione per l'instabilità a compressione
χ_{LT} coefficiente di riduzione per l'instabilità flessotorsionale

Nelle pagine seguenti sviluppiamo il calcolo

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$$\chi_y = 0.881; \chi_z = 0.629$$

$$\chi_{LT} = 0.836$$

$$\lambda_{soprasegnato,y} = 0.349; \lambda_{soprasegnato,z} = 0.242$$

$$k_{yy} = C_{my}\left(1+\left(\lambda_{soprasegnato,y}-0.20\right)\cdot\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}\right) \le C_{my}\left(1+0.80\cdot\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}\right)$$

$$k_{zz} = C_{mz}\left(1+\left(2\lambda_{soprasegnato,z}-0.60\right)\cdot\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_z\cdot A\cdot f_{yk}}\right) \le C_{mz}\left(1+1.40\cdot\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_z\cdot A\cdot f_{yk}}\right)$$

$$C_{my}(\text{Trave sempl. appoggiata con carico distribuito (tab. B.1 EC3)}: \alpha_h = 0; \psi = 0) = 0.95$$

$$C_{mz}(\text{Trave sempl. appoggiata con carico distribuito (tab. B.1 EC3)}: \alpha_h = 0; \psi = 0) = 0.95$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$$k_{yy} = 0.95\left(1+(0.349-0.20)\cdot\frac{210000\cdot 1.05}{0.881\cdot 5430\cdot 275}\right) = 0.974 < 1.134$$

$$k_{zz} = 0.95\left(1+(2\cdot 0.242-0.60)\cdot\frac{210000\cdot 1.05}{0.629\cdot 5430\cdot 275}\right) = 0.924 < 1.26$$

$$k_{yz} = 0.60\cdot k_{zz} = 0.584$$

$$k_{zy} = 0.60\cdot k_{yy} = 0.554$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO

Vediamo i calcoli di dettaglio:

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_y\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{yy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{yz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

$$\frac{N_{Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_z\cdot A\cdot f_{yk}}+k_{zy}\cdot\frac{M_{y,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{\chi_{LT}\cdot W_y\cdot f_{yk}}+k_{zz}\cdot\frac{M_{z,Ed}\cdot\gamma_{M1}}{W_z\cdot f_{yk}}\le 1$$

$$F_{Ed}/F_{Rd}=\frac{210000\cdot 1.05}{0.881\cdot 5430\cdot 275}+0.974\frac{21000000\cdot 1.05}{0.836\cdot 275\cdot 354000}+0.584\frac{10000000\cdot 1.05}{275\cdot 170000}=$$

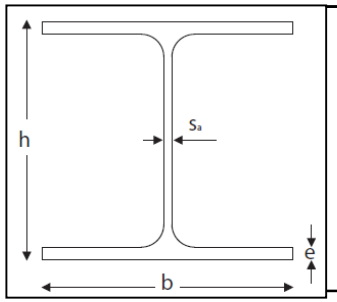
$$=0.168+0.264+0.131=0.563$$

$$F_{Ed}/F_{Rd}=\frac{210000\cdot 1.05}{0.629\cdot 5430\cdot 275}+0.5554\frac{21000000\cdot 1.05}{0.836\cdot 275\cdot 354000}+0.924\frac{10000000\cdot 1.05}{275\cdot 170000}=$$

$$=0.235+0.150+0.208=0.593$$

Quindi FS risulta pari a 0.593

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (STABILITA') - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W=311 cm^3; L=300 cm

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

TA: FS=0.893

SLU: FS=0.872

NTC08 (γ_{M1}=1.05)

FS = 0.766 (Metodo A)

FS = 0.554 (Metodo B)

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è una diminuzione del fattore di sfruttamento (del 15% col metodo A e del 30% col metodo B).

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA)

CNR 10011

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

NTC08 – EC3

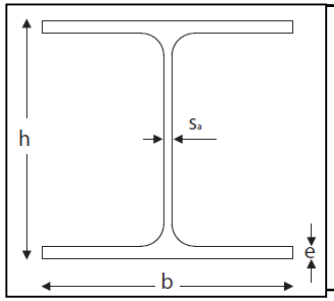
Se $V_{Ed} \leq 0{,}5\, V_{c,Rd}$

si può trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza

Se la sollecitazione di taglio supera il 50% della resistenza

$$f_{y,red} = (1 - \rho)\, f_{yk} \qquad \rho = \left[\frac{2V_{Ed}}{V_{c,Rd}} - 1\right]^2$$

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

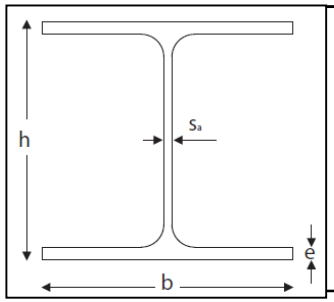
CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

Si analizzano tre situazioni:

- **Calcolo τ secondo Jourawsky. Determinazione $\sigma_{id.}$ sotto ala.**
- **Calcolo τ secondo Jourawsky. Determinazione $\sigma_{id.}$ in mezzeria (azione flettente ininfluente) .**
- **Calcolo τ con V/A_{anima}. Determinazione $\sigma_{id.}$ Sotto ala.**

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

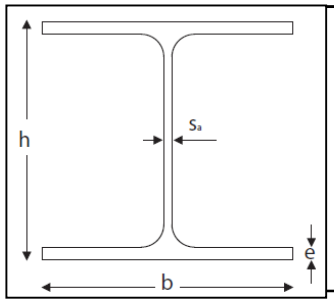
$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\,\tau_{xy}^2}$$

Si considera sezione sotto ala. Si calcola lo sforzo di taglio con formula di Jourawsky:

$\sigma_{x,SL}$=26+75=101 MPa; $\tau_{xy,SL}$=11.53 MPa $\sigma_{id.,SL}$=103 MPa<f_d (FS=0.375)

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

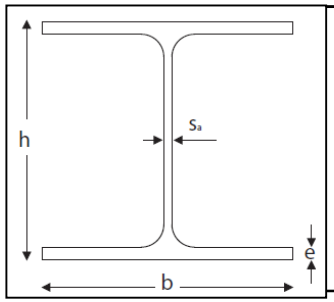
$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\,\tau_{xy}^2}$$

Si considera sezione sotto ala. Si calcola lo sforzo di taglio con formula di Jourawsky:

$\sigma_{x,TA}$=18+53=71 MPa; $\tau_{xy,TA}$=8.14 MPa $\sigma_{id.}$=72.4 MPa<σ_{amm} (FS=0.301)

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

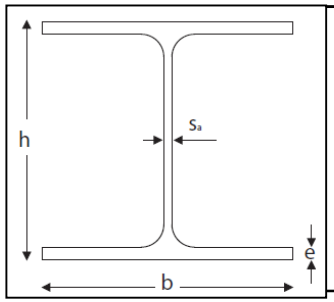
$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\,\tau_{xy}^2}$$

Si considera la sezione di mezzeria ($\sigma^{(M)}$=0). Si calcola lo sforzo di taglio con formula di Jourawsky:

$\sigma_{x,SL}$=26 MPa; $\tau_{xy,SL}$=150.9 MPa
$\sigma_{id.,SL}$=263 MPa<f_d (FS=0.955)

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

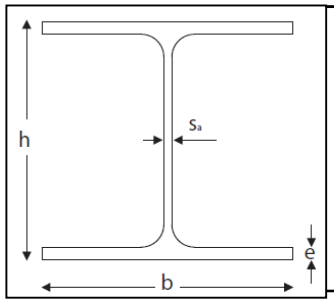
$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Si considera la sezione di mezzeria ($\sigma^{(M)}$=0). Si calcola lo sforzo di taglio con formula di Jourawsky:

$\sigma_{x,TA}$=18.4 MPa; $\tau_{xy,TA}$=106.5 MPa
$\sigma_{id.,TA}$=185 MPa<σ_{amm} (FS=0.976)

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

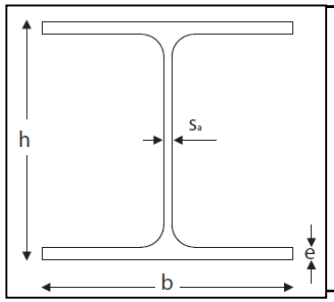
$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Si considera la sezione sotto ala. Si calcola lo sforzo di taglio come rapporto tra azione e area dell'anima:

$\tau_{xy,TA;SL}$=V/A_V=112 MPa;159MPa

A_V=1072 mm^2

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

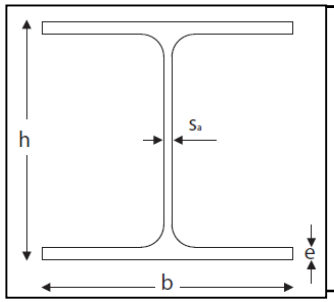
$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Si considera la sezione sotto ala. Si calcola lo sforzo di taglio come rapporto tra azione e area dell'anima:

$\sigma_{x,SL}$=26+75=101 MPa; $\tau_{xy,SL}$=159 MPa $\sigma_{id.,SL}$=293 MPa>f_d (!!! NO !!!)

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$\sigma_{id} \leq f_d$ stati limite

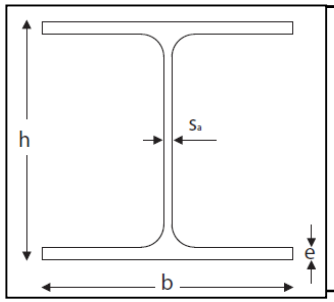
$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$ tensioni ammissibili

$$\sigma_{id} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 3\,\tau_{xy}^2}$$

Si considera la sezione sotto ala. Si calcola lo sforzo di taglio come rapporto tra azione e area dell'anima:

$\sigma_{x,TA}$=18+53=71 MPa; $\tau_{xy,TA}$=112 MPa $\sigma_{id.}$ =207MPa>σ_{amm} (!!! NO !!!)

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

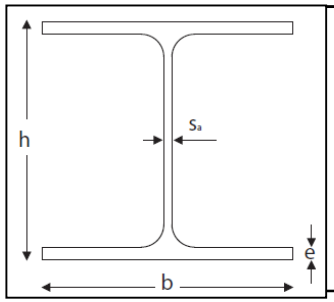
CNR 10011

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

In base ai calcoli sviluppati si osserva che:
A) col calcolo delle τ secondo Jourawsky, la sezione più sollecitata è quella di mezzeria, dove gli effetti flettenti sono nulli;
B) col calcolo delle τ con la formula V/A_{anima}, la sezione più sollecitata è quella "sotto-ala" (che risulterebbe NON verificata).

Per i successivi confronti si considerano gli FS del calcolo A).

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

Se $V_{Ed} \leq 0{,}5\, V_{c,Rd}$
si può trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza
Se la sollecitazione di taglio supera il 50% della resistenza

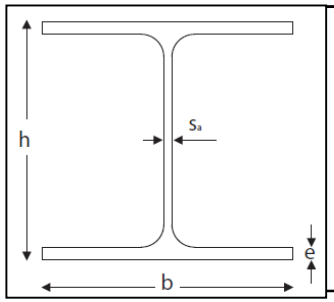
$f_{y,red}=(1-\rho)\, f_{yk}$ $\qquad \rho=\left[\frac{2V_{Ed}}{V_{c,Rd}}-1\right]^2$

$$V_{c,Rd}=\frac{A_v\cdot f_{yk}}{\sqrt{3}\cdot\gamma_{M0}}=266kN$$

$$\rho=\left[\frac{2\cdot V_{Ed}}{V_{c,Rd}}-1\right]^2=0.527$$

$$f_{y,red}=(1-\rho)\, f_{yk}=130MPa$$

VERIFICHE A FLESSIONE, TAGLIO E SFORZO ASSIALE (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; I_y=2492cm^4; W_y=311cm^3;

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

N_{sls}=100 kN; $M_{sls,y}$=20 kNm; $V_{sls,z}$=120 kN;
N_{Ed}=140 kN; $M_{Ed,y}$=28 kNm; $V_{Ed,z}$=170 kN

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}\,(1-n) / (1-0{,}5\,a) \le M_{pl,y,Rd}$$

$$n = N_{Ed} / N_{pl.Rd}$$

$$a = (A - 2\,b\,t_f) / A \le 0{,}5$$

A è l'area lorda della sezione,
b è la larghezza delle ali,
t_f è lo spessore delle ali.

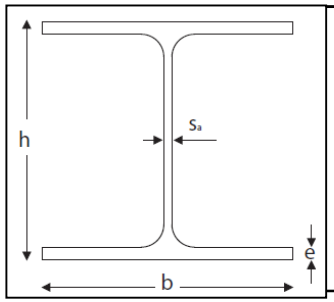
$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{y,red}}{\gamma_{M0}} = \frac{354000 \cdot 130}{1.05} = 43.82$$

$$M_{N,y,Rd} = 43.82 \cdot \frac{1-0.0985}{1-0.5 \cdot 0.234} = 43.82 kNm$$

$$n = 140/1421 = 0.0985; a = 0.234$$

$$M_{Ed} / M_{N,y,Rd} = 0.639$$

VERIFICHE A TENSO O PRESSO FLESSIONE DEVIATA (RESISTENZA) - ESEMPIO



HE160B: A=5430 mm^2; W_y=311cm^3; W_z=111cm^3

S 275 (ex Fe 430): σ_{amm}=190 MPa; f_d=275 MPa
f_{yk}=275 MPa; f_{tk}=430 MPa

CNR 10011

TA: FS=0.976

SLU: FS=0.955

NTC08 (γ_{M0}=1.05)

FS = 0.639

Oss.: Col passaggio alle NTC, nel caso specifico, c'è un diminuzione del fattore di sfruttamento pari al 30%.

PRINCIPALI CONNESSIONI

- UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE - PER ATTRITO CON BULLONI AD ALTA RESISTENZA

- UNIONI CON SALDATURE A PIENA PENETRAZIONE - PARZIALE PENETRAZIONE - A CORDONI D'ANGOLO

Unioni bullonate e saldate

Nell'ambito delle norme NTC come riportato al paragrafo 4.2.8 delle stesse si trattano sistemi di unione elementari, in quanto parti costituenti i collegamenti struttura tra membrature in acciaio.

Le sollecitazioni impiegate per la verifica delle unioni sono valutate con i criteri indicati in 4.2.2 "Valutazione della sicurezza". Inoltre tali sollecitazioni possono essere distribuite tra le componenti dell'unione a mezzo di criteri elastici oppure plastici.

Le condizioni alla base delle verifiche delle unioni, ovvero le condizioni che determinano le modalità con le quali si distribuiscono le sollecitazioni di calcolo fra le varie componenti l'unione, poste dalle NTC preliminarmente, sono:

a)le azioni da ripartire fra le componenti dell'unione devono costituire un sistema in e con le azioni risultanti applicate e soddisfino la condizione di resistenza imposta per ognuno di essi;

b)le deformazioni che derivano da tale distribuzione delle sollecitazioni all'interno degli elementi di unione non superino la loro capacità di deformazione;

In EC3 al punto 2.0 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE si forniscono informazioni più puntuali, pare utile segnalare quanto segue rimandando poi ad una letture completa del testo:

a) dove si impieghino dispositivi di giunzione con diversa rigidezza per equilibrare forze taglianti, i dispositivi di maggior rigidezza sono da dimensionare (la norma tradotta impiega il termine "dovrebbero essere progettati") per l'intero carico di progetto (p.to 2.4 EC3).
Fa eccezione solo il caso particolare di connessioni ibride (EC3 p.to 3.9.3) con bulloni 8.8 e 10.9 per connessioni progettate ad attrito allo s.l.u., ove è possibile assumere una ripartizione del carico con eventuali saldature presenti purché il serraggio finale sia eseguito dopo l'esecuzione della saldatura.

b)per collegamenti a taglio soggetti a impatto o vibrazione è raccomandato l'impiego di saldature o bulloni precaricati, (p.to 2.6 EC3), per i controventi (unioni soggette a possibili inversioni di carico) si possono impiegare bulloni per connessioni a contatto (ovvero dette a rifollamento) cat. A, purchè il taglio limite ultimo di progetto non superi la resistenza di progetto a taglio e la resistenza a rifollamento calcolate secondo prospetto 3.4
c)laddove la trasmissione delle azioni in una unione sia affetta da eccentricità nelle intersezioni, l'unione e le membrature devono essere verificate per i momenti e forze risultanti, (p.to 2.7 EC3).

Per il calcolo della resistenza delle unioni si adottano i fattori parziali γ_M indicati nella tabella Tab.4.2.XII. delle NTC

ovvero:

$\gamma_{M2} = 1.25$	ver. resistenza dei bulloni, chiodi, connessioni a perno, resistenza saldature a parziale penetrazione e a cordone d'angolo, resistenza dei piatti a contatto
$\gamma_{M3} = 1.25$	ver. a scorrimento per SLU
$\gamma_{M3} = 1.10$	ver. a scorrimento per SLE
$\gamma_{M6,se} = 1.00$	ver. resistenza delle connessioni a perno allo stato limite di esercizio
$\gamma_{M7} = 1.10$	ver. resistenza di bulloni ad alta resistenza

Unioni realizzate con bulloni

Il materiale

Bulloni dadi e rondelle devono rispettare dimensionalmente le norme UNI EN 15048-1, inoltre devono appartenere alle classi normate con UNI EN ISO 898-1:2001, distinte in normali e ad alta resistenza.

Classi normali per bulloni: 4.6, 5.6, 6.8 a cui si associano dadi: 4, 5, 6. Classi ad alta resistenza: 8.8 e 10.9 a cui si associano dadi: 8, 10.

I valori delle tensioni di snervamento f_{yb} e di rottura f_{tb} sono direttamente ricavabili dalla classe secondo il criterio che deduce la rottura dal primo numero che contraddistingue la classe e lo snervamento con il secondo numero che individua f_{yb} come percentuale di f_{tb}.

Esempio : classe 5.6 $\Rightarrow$ $f_{tb} = 500$ N/mm^2 , $f_{yb} = 0.6\, f_{tb} = 300$ N/mm^2

Detti valori di snervamento e rottura sono da impiegarsi nei calcoli di progetto come valori caratteristici.

Per i bulloni impiegati in unioni ad attrito, sono limitati alla classe 8.8 e 10.9; visto il tipo di impiego sono previste una serie di specifiche integrative che riguardano le componenti ovvero viti, dadi , rosette e piastrine da accoppiare.

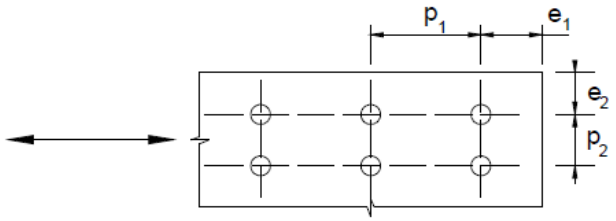
Nell'ambito delle norme NTC si distinguono le unioni bullonate come "precaricate" o " non precaricate".
Si precisa poi che nelle unioni non precaricate si possono impiegare tutte le classi normate di bulloni mentre per le unioni con bulloni precaricati si deve far riferimento a le classi 8.8 e 10.9.

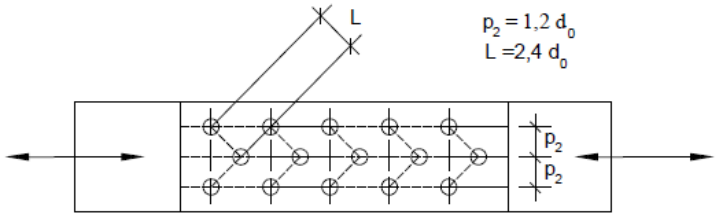
Per il calcolo della resistenza al taglio si adottano i fattori parziali γ_M indicati della tabella Tab.4.2XII. delle NTC sopra riportati.

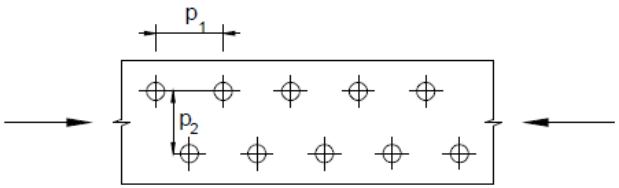
Si integra quanto detto, evidenziando che nelle unioni "precaricate" la resistenza ad attrito dipende da:
le modalità di preparazione delle superfici a contatto le modalità di esecuzione
il gioco foro-bullone
e si esprime la forza di precarico: $F_{p,Cd} = 0.7\ f_{tb}\ A_{res}$ (nel caso di serraggio controllato), a cui si associa il momento di serraggio $M = k \cdot d \cdot F_{p,Cd}$

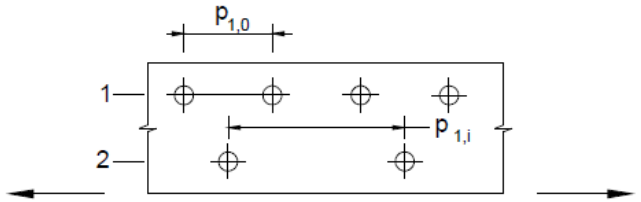
Si rileva che viene introdotto un valore k non più fissato pari a 0.2, allo scopo di evitare possibili danneggiamenti alla vite per serraggi sbagliati, tale valore k sarà individuato sulle confezioni dei bulloni in ragione delle differenti classi funzionali secondo la Tab. C4.2.XIX

UNIONI CON BULLONI
LIMITI NELLA POSIZIONE DEI FORI







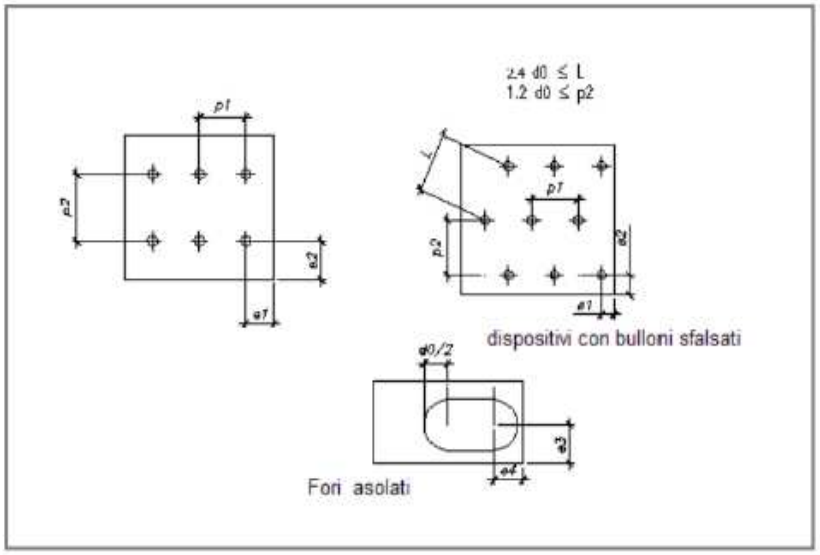


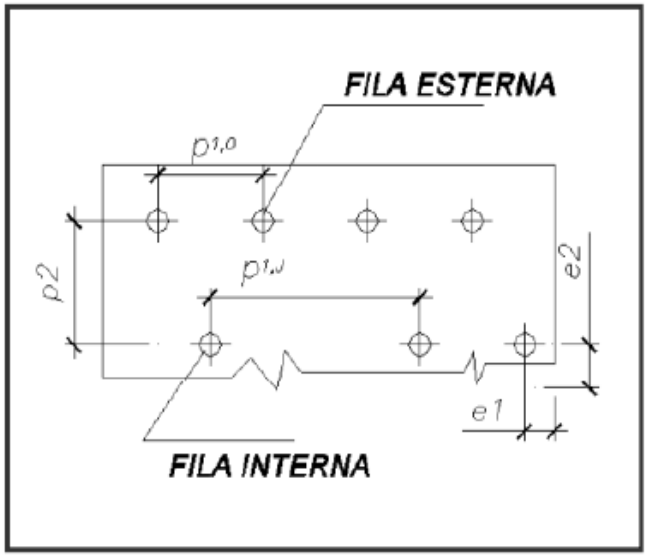
Distanze e interassi (Fig. 4.2.3)	Minimo	Massimo		
		Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (EN10025-5)
e_1	1,2 d_0	4t+40mm	-	max(8t;125mm)
e_2	1,2 d_0	4t+40mm	-	max(8t;125mm)
p_1	2,2 d_0	min(14t;200mm)	min(14t;200mm)	min(14t;175mm)
$p_{1,0}$	-	min(14t;200mm)	-	-
$p_{1,i}$	-	min(28t;400mm)	-	-
p_2	2,4 d_0	min(14t;200mm)	min(14t;200mm)	min(14t;175mm)

Nella EC3 si precisa che nei casi A e B i valori massimi riportati per il passo e la distanza dai margini non hanno limiti eccetto nei seguenti casi:

-per le membrature compresse, allo scopo di evitare l'instabilità locale e prevenire la corrosione delle membrature esposte

- per le membrature tese esposte per prevenire la corrosione





Per fori asolati nelle EC3 si indicano le distanze $e_3 = e_4 \geq 1.5\ d_0$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE

RESISTENZA A TAGLIO – BULLONI:

PIANO DI TAGLIO INTERESSA PARTE FILETTATA

$F_{v,Rd} = 0{,}6\ f_{tb}\ A_{res} / \gamma_{M2}$, bulloni classe 4.6, 5.6 e 8.8;

$F_{v,Rd} = 0{,}5\ f_{tb}\ A_{res} / \gamma_{M2}$, bulloni classe 6.8 e 10.9;

A_{res} indica l'area resistente della vite

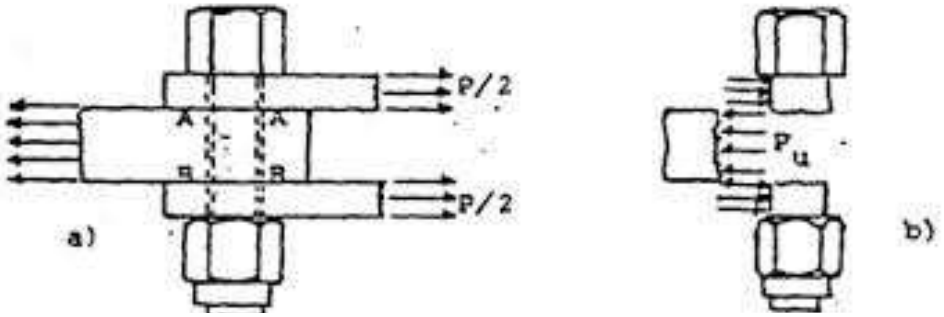
$\gamma_{M2} = 1{,}25$

PIANO DI TAGLIO INTERESSA GAMBO NON FILETTATO

$F_{v,Rd} = 0{,}6\ f_{tb}\ A/\gamma_{M2}$,

A indica l'area nominale del gambo

f_{tb} indica la resistenza a rottura del materiale



UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE

RESISTENZA A TAGLIO – RIFOLLAMENTO:

$$F_{b,Rd} = k\,\alpha\,f_{tk}\,d\,t\,/\,\gamma_{M2}$$

d è il diametro nominale del gambo del bullone,

t è lo spessore della piastra collegata,

f_{tk} è la resistenza a rottura del materiale della piastra collegata,

α=min $\{e_1/(3\,d_0)\,;\,f_{tb}/f_t;\,1\}$ per bulloni di bordo nella direzione del carico applicato,

α=min $\{p_1/(3\,d_0) - 0{,}25\,;\,f_{tb}/f_t\,;\,1\}$ per bulloni interni nella direzione del carico applicato,

k=min $\{2{,}8\,e_2/d_0 - 1{,}7\,;\,2{,}5\}$ per bulloni di bordo nella direzione perpendicolare al carico applicato,

k=min $\{1{,}4\,p_2\,/\,d_0 - 1{,}7\,,\,2{,}5\}$ per bulloni interni nella direzione perpendicolare al carico applicato,

essendo e_1 , e_2 , p_1 e p_2 indicati in Fig. 4.2.3 e d_0 il diametro nominale del foro di alloggiamento del bullone,

$$\gamma_{M2} = 1{,}25$$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE

RESISTENZA A TRAZIONE – BULLONI:

$$F_{t,Rd} = 0{,}9\ f_{tb}\ A_{res} / \gamma_{M2}, \text{ per i bulloni}$$

A_{res} indica l'area resistente della vite

f_{tb} indica la resistenza a rottura del materiale

$\gamma_{M2} = 1{,}25$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE

RESISTENZA A TRAZIONE - PUNZONAMENTO:

$$B_{p,Rd} = 0{,}6\ \pi\ d_m\ t_p\ f_{tk} / \gamma_{M2}$$

d_m è il minimo tra il diametro del dado e il diametro medio della testa del bullone

t_p è lo spessore del piatto

f_{tk} è la tensione di rottura dell'acciaio del piatto

$\gamma_{M2} = 1{,}25$

La resistenza dell'unione è fornita dal valore minimo tra $F_{t,Rd}$ e $B_{p,Rd}$

Esempio

Si considera un bullone M16 classe 10.9

A_{res}.= 157 mm^2 f_{tb}=1000 N/mm2

Piatto sp. 20mm in acciaio f_{yk} =275 N/mm2 f_{tk} = 430 N/mm2

Resistenza a trazione del bullone:

$F_{t,Rd} = 0.9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}/\gamma_{M2} = 0.9 \cdot 1000 \cdot 157/1.25 = 113$ kN

Punzonamento del piatto:

$B_{p,Rd} = 0.6 \pi f_{tk} d_m t_p /\gamma_{M2} = 0.6 \cdot \pi \cdot 430 \cdot 16 \cdot 20/1.25 = 207$ kN

In via cautelativa d_m è stato posto pari al diametro del bullone .

Si rileva che $F_{t,Rd} = 0.54 B_{p,R d}$

Solo se il piatto risulta di spessore t<12 mm allora la verifica a punzonamento diventa significativa.

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE

RESISTENZA A TAGLIO + TRAZIONE:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1 \quad \textbf{E} \quad \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

$F_{v,Ed}$ ed $F_{t,Ed}$ sono le sollecitazioni di taglio e di trazione

$F_{v,Rd}$ ed $F_{t,Rd.}$ sono le resistenze a taglio ed a trazione

UNIONI A TAGLIO PER ATTRITO CON BULLONI AD ALTA RESISTENZA

RESISTENZA ALLO SCORRIMENTO:

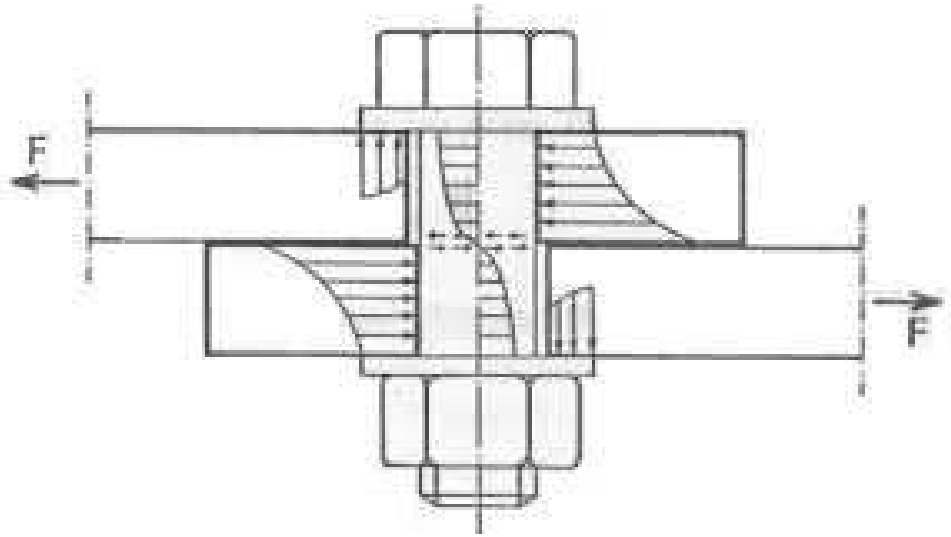
$$F_{s,Rd} = n\,\mu\,F_{p,C} / \gamma_{M3}$$

n è il numero delle superfici di attrito,

μ è il coefficiente di attrito di cui al § 4.2.8.1.1,

$F_{p,C}$ è la forza di precarico del bullone che, in caso di serraggio controllato, può essere assunta pari a $0{,}7\ f_{tb}\ A_{res}$, invece che pari a $0{,}7\ f_{tb}\ A_{res} / \gamma_{M7}$.

$\gamma_{M3} = 1{,}25$



UNIONI A TAGLIO PER ATTRITO CON BULLONI AD ALTA RESISTENZA

RESISTENZA ALLO SCORRIMENTO:

IN PRESENZA DI TRAZIONE ($F_{t,Ed}$) NEI BULLONI:

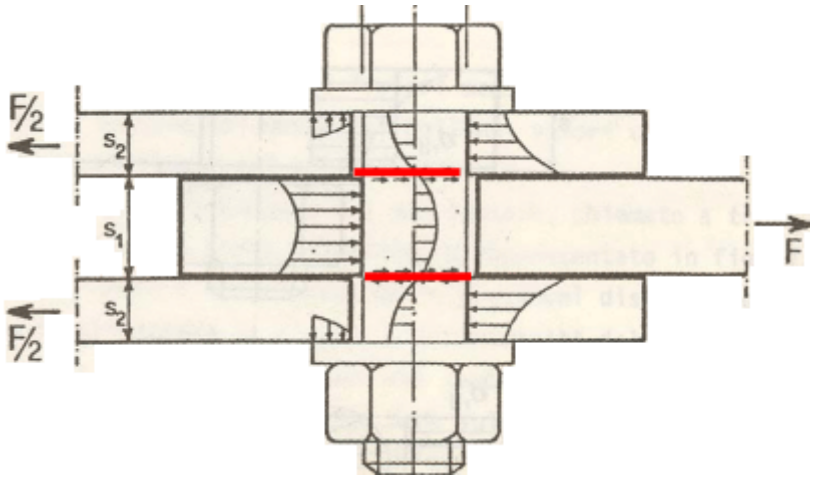
$$F_{s,Rd} = n\,\mu\,(F_{p,C} - 0{,}8\,F_{t,Ed}) / \gamma_{M3}$$

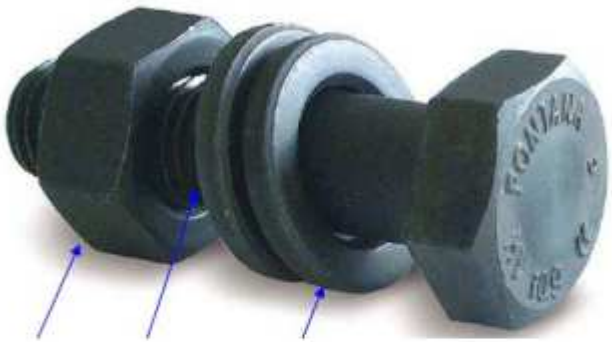
n è il numero delle superfici di attrito,

μ è il coefficiente di attrito di cui al § 4.2.8.1.1,

$F_{p,C}$ è la forza di precarico del bullone che, in caso di serraggio controllato, può essere assunta pari a $0{,}7\,f_{tb}\,A_{res}$, invece che pari a $0{,}7\,f_{tb}\,A_{res} / \gamma_{M7}$.

$\gamma_{M3} = 1{,}25$





- I bulloni HV e HR si serrano con chiave dinamometrica
- I bulloni HRC con apposita pistola avvitatrice coassiale

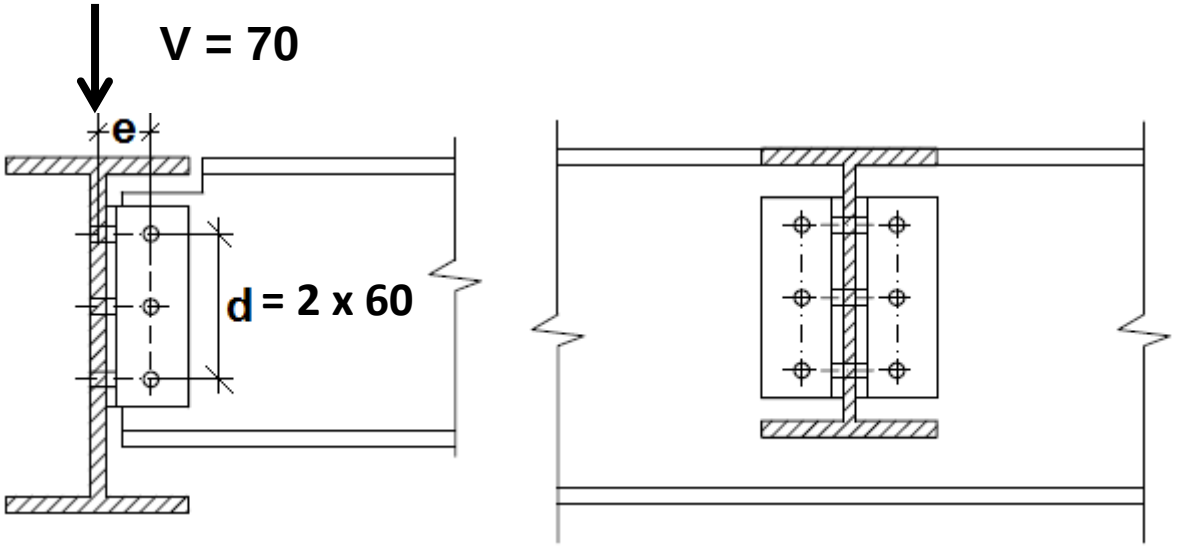
UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO – ESEMPIO DI CALCOLO

GIUNTO A SQUADRETTA:

$V_{Ed,z}$=200 kN

NTC08 (γ_{M2}=1.25)

M_t=V·e=200·0.07=14 kNm (Momento dovuto al "trasporto" del taglio nel baricentro della bullonatura).



$$V_{Ed,z_b} = \frac{V_{Ed}}{3} = 66,6\ kN$$

$$V_{Ed} = \frac{Mt}{d} = \frac{14}{0,2} = 116,6\ kN$$

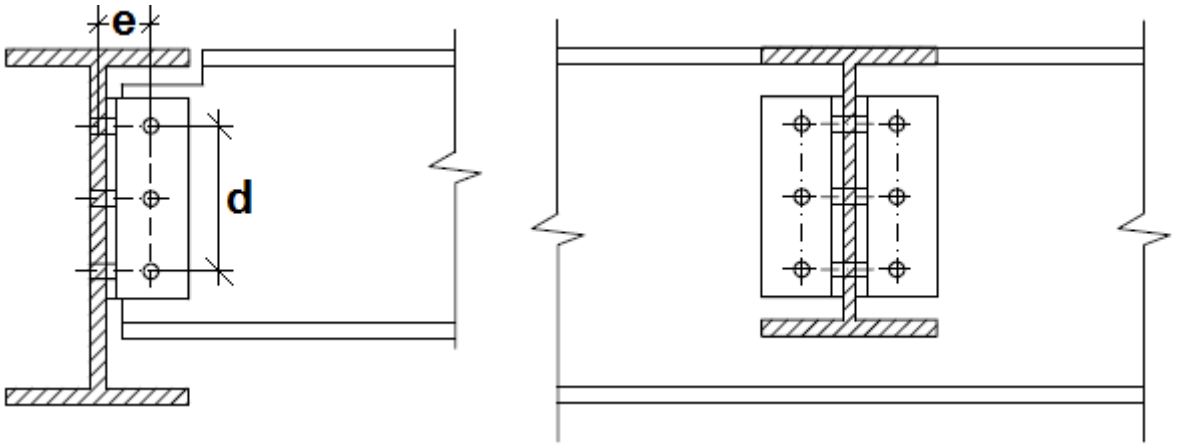
$$F_{v,ED} = \sqrt{(V_{Ed,z_b})^2 + (V_{Ed})^2} = 134,4\ kN$$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO – ESEMPIO DI CALCOLO

GIUNTO A SQUADRETTA:

$V_{Ed,z}$=200 kN

NTC08 (γ_{M2}=1.25)



VERIFICA BULLONI. Si ha (con M20 cl. 8.8):

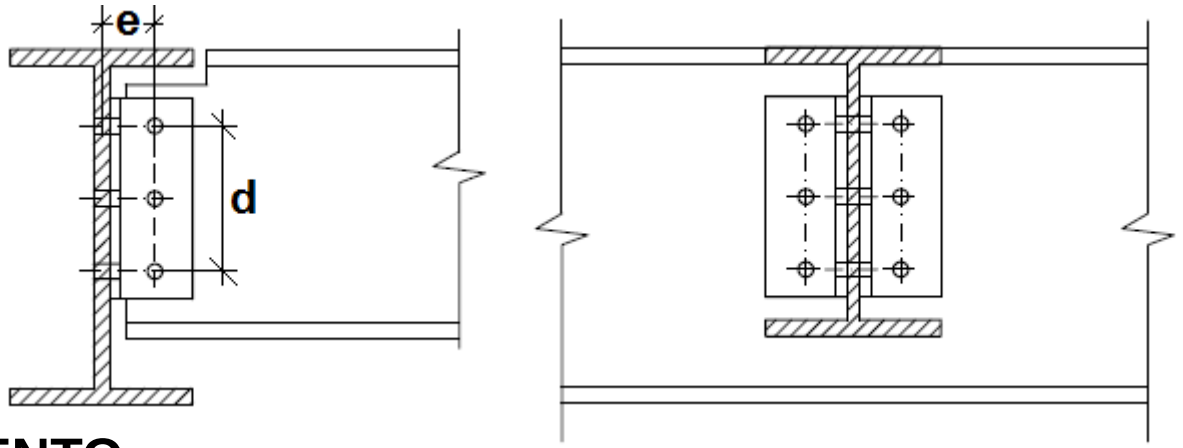
$$F_{v,Rd} = 2 * \frac{0.60 \cdot f_{tb} \cdot A_{res.}}{\gamma_{M2}} = 2 * \frac{0.60 \cdot 800 \cdot 245}{1.25} = 198.1kN > F_{v,Ed}$$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO – ESEMPIO DI CALCOLO

GIUNTO A SQUADRETTA:

$V_{Ed,z}$=200 kN

NTC08 (γ_{M2}=1.25)



VERIFICA RIFOLLAMENTO.

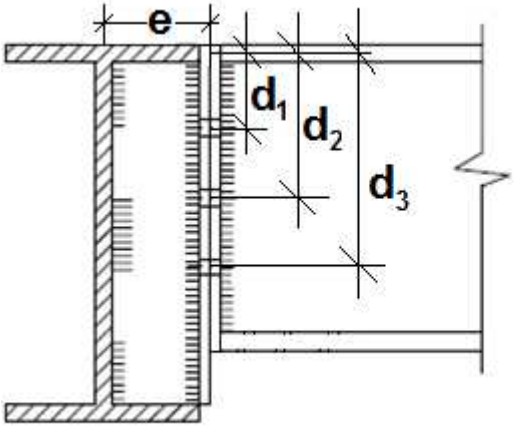
Si ha (con M20 e spessore anima secondaria (in S275) pari a 10 mm):

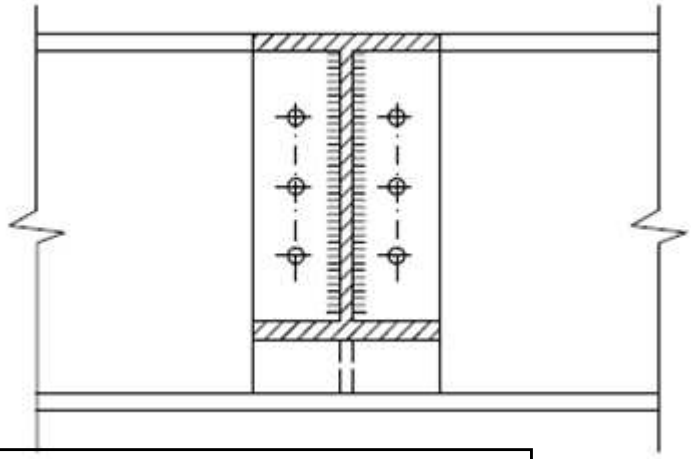
$$F_{v,Ed} = 134.3kN$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2.50 \cdot 1 \cdot 430 \cdot 20 \cdot 10}{1.25} = 180.6kN > 2 \cdot F_{v,Ed} = 177.2kN$$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO – ESEMPIO DI CALCOLO

GIUNTO CON FLANGIA:





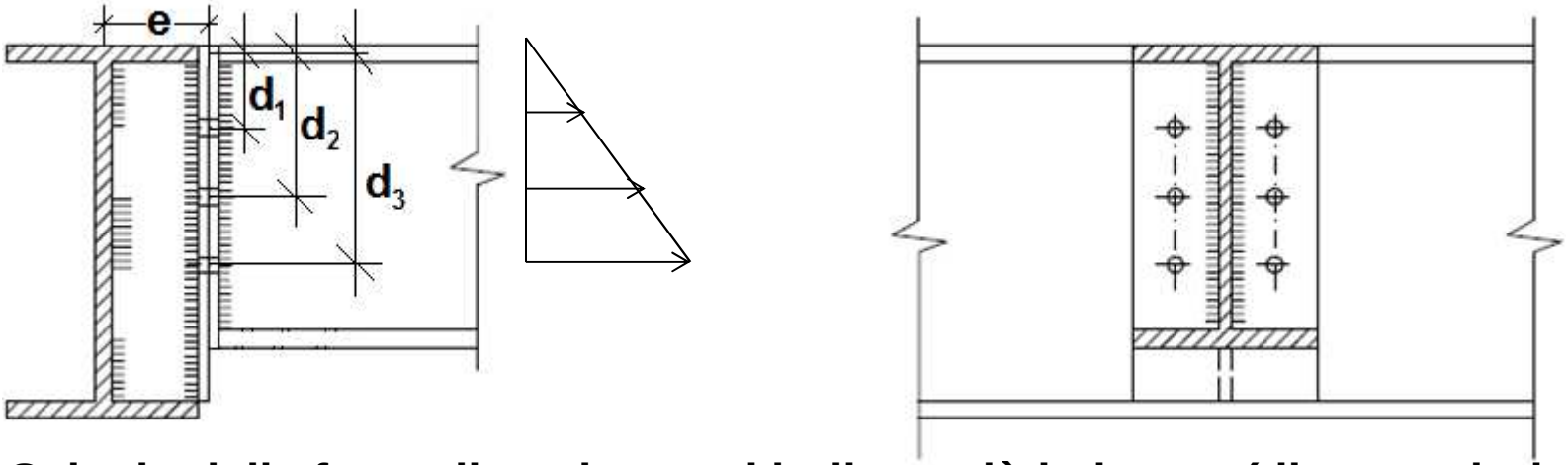
$V_{Ed,z}$=200 kN

NTC08 (γ_{M2}=1.25)

M_t=V·e=200·0.07=14 kNm (Momento torcente dovuto al "trasporto" del taglio nel baricentro della bullonatura).

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE – ESEMPIO

GIUNTO CON FLANGIA:



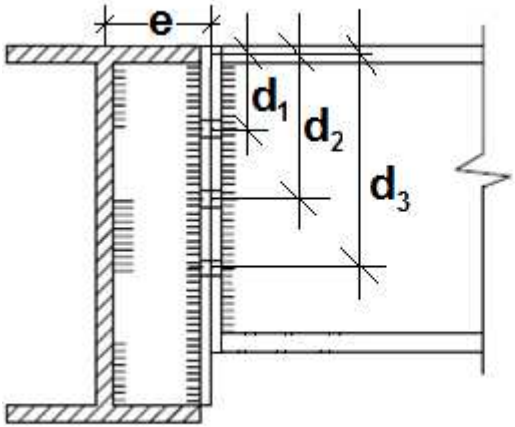
Calcolo della forza di trazione nel bullone più in basso (distante d_3 dal centro di compressione). d_1= 60 mm; d_2= 110 mm; d_3=160 mm.

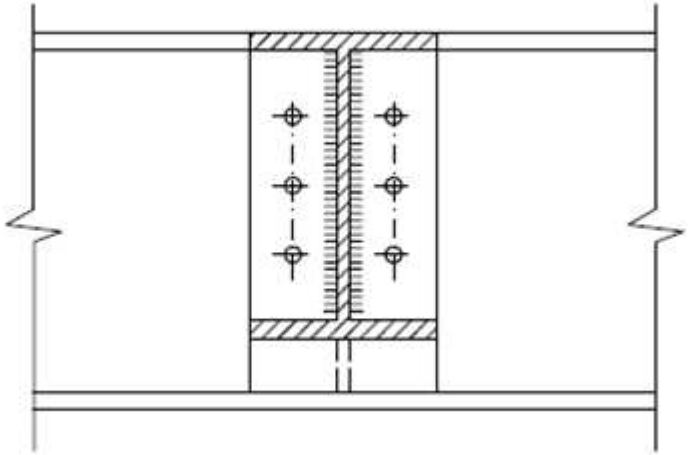
$d_G = d_1+d_2+d_3/3$= 110 mm (baricentro verticale bullonatura)

$V_{Ed,y,b,max} = M_t/(n\cdot d_G)(d_3/(d_1^2+d_2^2+d_3^2))=14/(2\cdot 0.11)\cdot(0.16/(0.06^2+0.11^2+0.16^2)$ = 30.85 kN (Trazione nei 2 bulloni inferiori per effetto di M_t

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE – ESEMPIO

GIUNTO CON FLANGIA:





$V_{Ed,z,b} = V_{Ed,z} / (n_b \cdot n) = = 200/(6 \cdot 1) = 33.3$ kN (Taglio verticale nei 6 (n_b) bulloni per effetto di V considerando la ripartizione su 1 faccia (n)).

Pertanto si ha:

$F_{v,Ed} = 33.3$ kN; $F_{t,Ed} = 28.6$ kN;

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE – ESEMPIO

GIUNTO CON FLANGIA:

$F_{v,Ed}$=33.3 kN
$F_{t,Ed}$=28.6 kN

VERIFICA A TAGLIO:

Considerando M16 cl. 8.8 (e flangia in S275 sp. 10 mm):

$$F_{v,Rd} = \frac{0.60 \cdot f_{tb} \cdot A_{res.}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.60 \cdot 800 \cdot 157}{1.25} = 60.29kN > F_{v,Ed}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2.50 \cdot 1 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 10}{1.25} = 133.6kN > F_{v,Ed}$$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE – ESEMPIO

GIUNTO CON FLANGIA:

$F_{v,Ed}$=33.3 kN
$F_{t,Ed}$=28.6 kN

VERIFICA A TRAZIONE:

Considerando M16 cl. 8.8 (e flangia in S275 sp. 10 mm):

$$F_{t,Rd} = \frac{0.90 \cdot f_{tb} \cdot A_{res.}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.90 \cdot 800 \cdot 157}{1.25} = 90.43kN > F_{t,Ed}$$

$$B_{b,Rd} = \frac{0.60 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0.60 \cdot \pi \cdot 24 \cdot 10 \cdot 430}{1.25} = 155.6kN > F_{t,Ed}$$

UNIONI CON BULLONI SOGGETTE A TAGLIO E TRAZIONE – ESEMPIO

GIUNTO CON FLANGIA:

$F_{v,Ed}$=33.3 kN
$F_{t,Ed}$=28.6 kN

VERIFICA A TAGLIO+TRAZIONE:

Considerando M16 cl. 8.8 (e flangia in S275 sp. 10 mm):

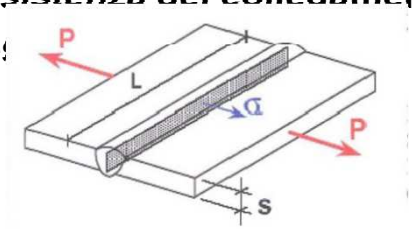
$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.40 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{33.3}{60.29} + \frac{28.6}{1.40 \cdot 90.43} = 0.552 + 0.226 = 0.778 < 1$$

UNIONI REALIZZATE CON SALDATURA

Saldature a completa penetrazione

Una saldatura a completa penetrazione determina la fusione del metallo di base attraverso tutto lo spessore dell'elemento da unire.

Impiegando per questo tipo di saldature materiali di apporto di qualità superiore a quella dei materiali uniti, pertanto la resistenza del collegamento è uguale alla resistenza del più debole degli elementi connes



Si rileva che nelle CNR10011/97 le saldature di testa erano verificate, distinguendo in due classi la qualità della saldatura, con la relazione:

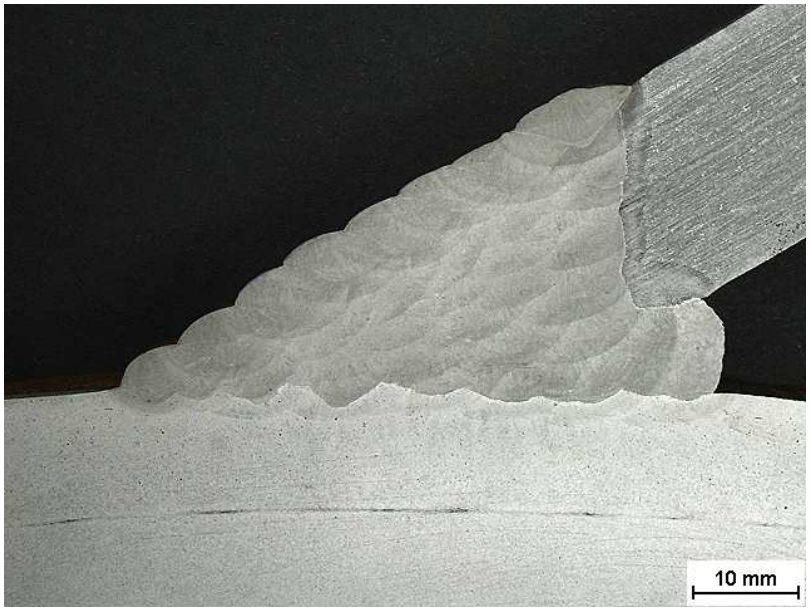
$$\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2_{\perp} + \sigma^2_{||} - -\sigma_{\perp}\sigma_{||} + 3\tau^2_{||})} \leq \alpha\, f_d$$

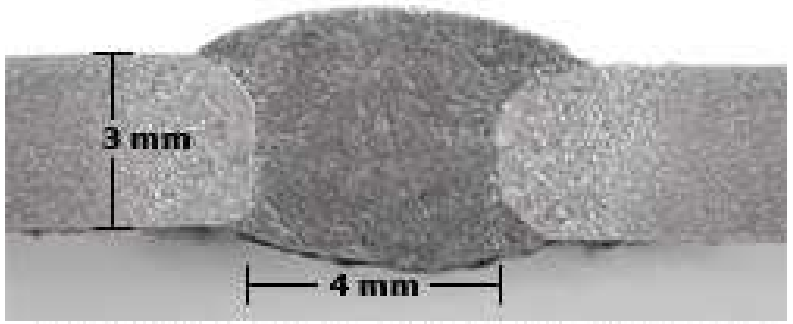
Dove α=1 per saldature di classe I
α=0.85 per saldature di classe II

Adesso tale differenzazione è accantonata rimandando al punto 11.3.4.5 delle NTC ¡ riferimenti per le procedure di qualifica delle saldature.

UNIONI CON SALDATURE A PIENA PENETRAZIONE

I collegamenti testa a testa, a T e a croce a piena penetrazione sono generalmente realizzati con materiali d'apporto aventi resistenza uguale o maggiore a quella degli elementi collegati. Pertanto la resistenza di calcolo dei collegamenti a piena penetrazione si assume eguale alla resistenza di progetto del più debole tra gli elementi connessi. Una saldatura a piena penetrazione è caratterizzata dalla piena fusione del metallo di base attraverso tutto lo spessore dell'elemento da unire con il materiale di apporto.





Estetica ottimale leggermente bombata della saldatura, senza errori di giunzione.

Saldature a parziale penetrazione

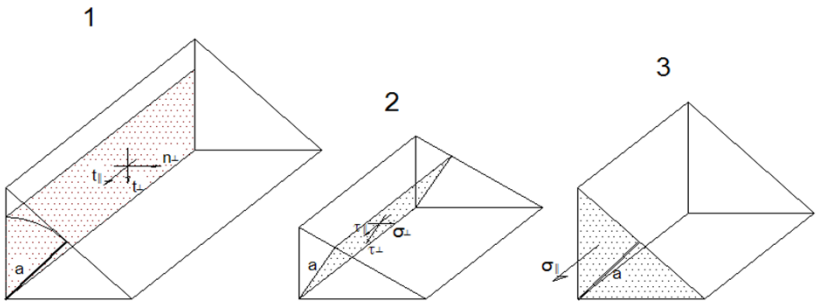
In questo caso la fusione del materiale base interessa solo parzialmente lo spessore dell'elemento da unire.

Vengono trattate come le saldature a cordone d'angolo facendo però riferimento ad una altezza di gola individuabile nei disegni di progetto secondo il tipo di preparazione adottata.

Impiegando per questo tipo di saldature materiali di apporto di qualità superiore a quella dei materiali uniti, pertanto la resistenza del collegamento è uguale alla resistenza del più debole degli elementi.

Saldature a cordoni d'angolo

La caratteristica peculiare di un cordone d'angolo è la sua sezione di gola "a" intesa come l'altezza del maggiore triangolo (a lati uguali o diseguali) inscritto all'interno delle facce di fusione e la superficie del cordone di saldatura, misurata perpendicolarmente al lato più esterno di questo triangolo.
In UNI EN 1993-1-8:2005 è raccomandato che a ≥ 3 mm.



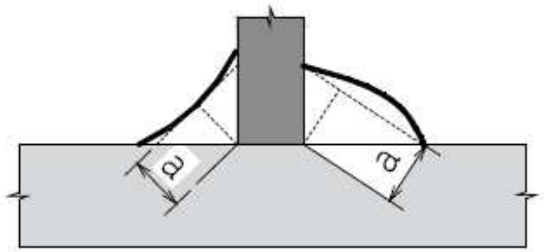
La lunghezza L del cordone può coincidere con quella di calcolo qualora sia garantito il suo spessore pieno anche alle estremità, è buona cosa cautelativamente seguire quanto riportato in UNI EN 1993-1-8.2005 considerando L come la lunghezza del cordone ridotta di "2a" , in ogni caso una saldatura con una lunghezza efficace minore di 30 mm e "6a" non è da considerare significativa ai fini strutturali.

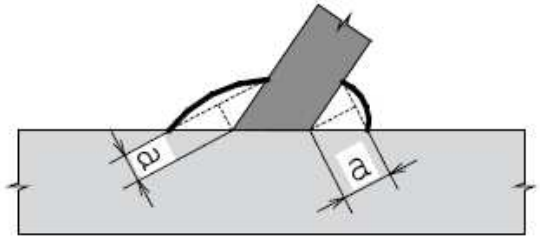
Ai fini delle verifiche si potrà far riferimento alla terna di tensioni (t⊥ ,t|| ,n⊥) oppure (σ⊥, τ⊥, τ||) definite nella figura sopra, nel caso 1 avendo ribaltato il piano dell'altezza di gola sul lato del cordone , nel caso 2 considerando il piano passante per l'altezza di gola.

Si rileva che la σ|| (tensione in direzione parallela all'asse del cordone sulla sua sezione trasversale) è in generale trascurata ad eccezione delle verifiche a fatica.

E' assunto il fattore parziale di sicurezza
γ_{M2}=1.25

UNIONI CON SALDATURE A CORDONI D'ANGOLO





Altezza di gola "a": altezza del triangolo iscritto nella sezione trasversale del cordone

2.3.3.1 Resistenza delle saldature a cordoni d'angolo

Allo stato limite ultimo le azioni di calcolo sui cordoni d'angolo si distribuiscono uniformemente sulla sezione di gola.
Nelle norme NTC sono proposti tre metodi di verifica:

METODO 1

Assunzione: si considera la sezione di gola nella sua reale posizione

Si deve verificare : $\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2_{\perp} + 3\,(\tau^2_{\parallel} + \tau^2_{\perp}))} \leq f_{tk} / (\beta \cdot \gamma_{M2})$

(nelle UNI EN 1993-1-8.2005 si aggiunge anche la condizione $\sigma_{\perp} \leq [0.9\, f_{tk} / (\gamma_{M2})]$

Con :

f_{tk} **Resistenza a rottura dell'elemento più debole collegato**

β **0.8 per acciaio S235 e S275; 0.9 per acciaio S355 ; 1 per acciaio S420 2 S460**

Metodo 2

Assunzione: si considera la risultante $F_{w,Ed}$ di tutte le forze per unità di lunghezza trasmesse dalla saldatura

Si deve verificare : $F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$

Con :

$F_{w,Rd} = a\,(f_{tk}/\sqrt{3})/(\beta \cdot \gamma_{M2})$

f_{tk} Resistenza a rottura dell'elemento più debole collegato

β 0.8 per acciaio S235 e S275; 0.9 per acciaio S355 ; 1 per acciaio S420 e S460

METODO 3

Assunzione: si considera la sezione di gola ribaltata (terna($t_\perp$,$t_{||}$,$n_\perp$)
Si deve verificare :

$$\sqrt{(n^2_\perp + t^2_\perp + t^2_{||})} \leq f_{tk}\,(\beta_1)$$

(nelle UNI EN 1993-1-8.2005 si aggiunge anche la condizione

$$|n_\perp| + |t_\perp| \leq ftk\,(\beta_2)$$

f_{tk} **Resistenza a rottura dell'elemento più debole collegato**

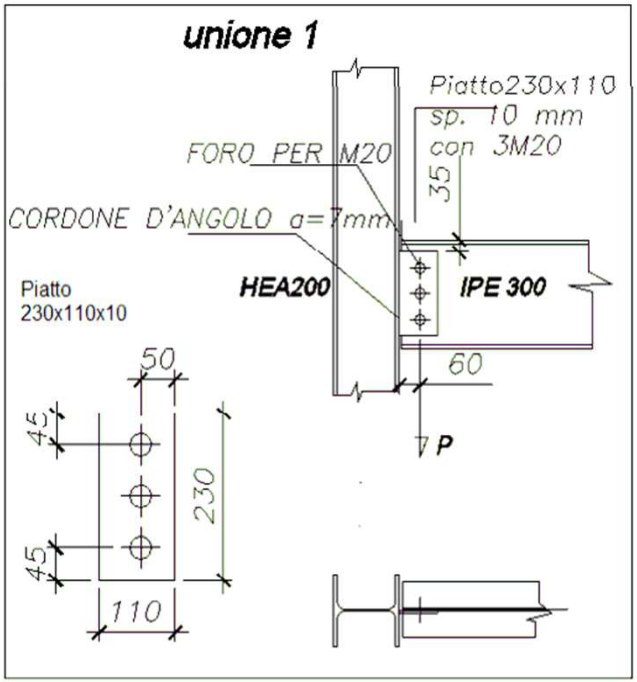
β_1 **0.85 per acciaio S235; 0.7 per S275 e S355 ; 0.62 per acciaio S420 e S460**
β_2 **1 per acciaio S235; 0.85 per S275 e S355 ; 0.75 per acciaio S420 e S460**

Da rilevare che vista l'analogia con le vecchie CNR pare corretto aggiungere che nel caso compaiano solo $n_\perp$ e/o $t_\perp$ deve valere :

$|n_\perp| \leq ftk\,(\beta_2)$ **oppure** $|t_\perp| \leq ftk\,(\beta_2)$

Applicazione

Si considera l'unione con trave IPE300 incernierata sul pilastro



L'unione trasmette un taglio V_{Ed} = P kN applicato nel baricentro della bullonatura

Si verifica la resistenza dei due cordoni d'angolo di altezza di gola a=7mm

Le saldature sono sollecitate da

Taglio: $V_{Ed} = P$ kN
Momento: $M_{Ed} = 60 \cdot P$ kNm = 0.06 P kNm

Caratteristiche generali del piatto:

piatto 230x110x10 in acciaio S275
f_{tk} = 430 N/mm²
f_{yk} = 275 N/mm²
Lunghezza efficace del cordone:
$l_{eff} = 230 - 2 \cdot a$ = 216 mm

Metodo 2

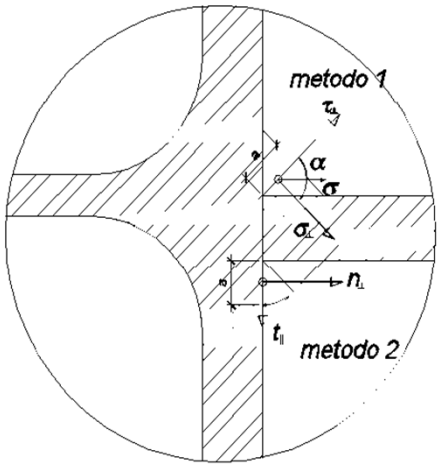
L'azione media di taglio per unità di lunghezza della saldatura risulta:

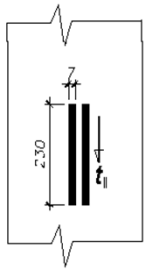
$$F_{L,Ed} = P \cdot 1000 / (2x216) = 2.314\ P \text{ N/mm}$$

L'azione flettente massima per unità di lunghezza della saldatura prodotta sulla saldatura risulta:

$$F_{Ty,Ed} = M_{Ed}\ y/J = 0.5M_{Ed} \cdot 0.5l_{eff} / (1x\ l_{eff}^{3}/12) =$$

$$(0.06P \cdot 108)P \cdot 0.5l_{eff} / (1x\ l_{eff}^{3}/12) = 3.858\ P \text{ N/mm}$$





metodo 2 sezione di gola proiettata sull'ala del HE

Perciò la risultante

$$F_{w,Ed} = \sqrt{(F^2_{L,Ed} + F^2_{Ty,Ed})} = 4.498\ P \text{ N/mm}$$

Poiché la resistenza di calcolo

$$F_{w,Rd} = a\,(f_{tk}/\sqrt{3})/(\beta \cdot \gamma_{M2}) = 7 \cdot 430/\sqrt{3})/(0.85 \cdot 1.25) = 1635 \text{ N/mm}$$

La saldatura è verificata se P =100 KN $\Rightarrow$ Fw,Ed = 450 N/mm

con fattore di sicurezza = 1635 / 450 = 3.63

Metodo 3

Si deve verificare; $\sigma_{id\,1} = \sqrt{(n^2_{\perp} + t^2_{\perp} + t^2_{\parallel})} \leq f_{tk}\,(\beta_1) = 301\ N/mm^2$

$$\sigma_{id;2} = |n_{\perp}| + |t_{\perp}| \leq f_{tk}\,(\beta_2) = 365\ N/mm^2$$

Con:

$f_{tk} = 430\ N/mm^2$

$\beta_1 =$ 0.7 per acciaio S275;
$\beta_2 =$ 0.85 per acciaio S275;

$n_{\perp} = [M_{Ed} \cdot (l_{eff}/2)/J_w] = (0.06P \cdot 108)P \cdot 9.19 \cdot 10\text{-}06 = 0.550\ P\ N/mm^2$

$t_{\perp}$ = non c'è

$t_{\parallel} = V_{Ed}/(2 \cdot l_{eff} \cdot a) = 1000 \cdot P/3024 = 0.33\ P\ N/mm^2$

Avendo posto:

$J_w = 2 \cdot a \cdot 2163/12 = 1175 \times 104\ mm^4$ $\quad a = 7\ mm$

$\sigma_{id\,1} = 0.64\ P\ N/mm^2$
$\sigma_{id;2} = 0.88\ P\ N/mm^2$

con P=100 kN la disuguaglianza è verificata con fattore di sicurezza = 4.7 / 4.14

Metodo 1

L'azione media di taglio per unità di lunghezza della saldatura risulta:

$$\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma^2_{\perp} + 3(\tau^2_{\perp} + \tau^2_{\parallel}))} \leq \quad ftk/(\beta \cdot \gamma M2) = 430 N/mm^2$$

Con:

ftk = 430 N/mm²

β = $_{0.8}$ per acciaio S275;

$$\sigma_{\perp} = [M_{Ed} \cdot (l_{eff}/2)/J_w] \text{ sen } \alpha = (0.06P \cdot 108)P \cdot 9.19 \cdot 10\text{-}06 \cdot 0.707 = 0.390\ P\ N/mm^2$$

$$\tau_{\perp} = [M_{Ed} \cdot (l_{eff}/2)/J_w] \cos \alpha = 0.390\ P\ N/mm^2$$

$$\tau_{\parallel} = V_{Ed}/(2 \cdot l_{eff} \cdot a) = 1000 \cdot P/3024 = 0.33\ P\ N/mm^2$$

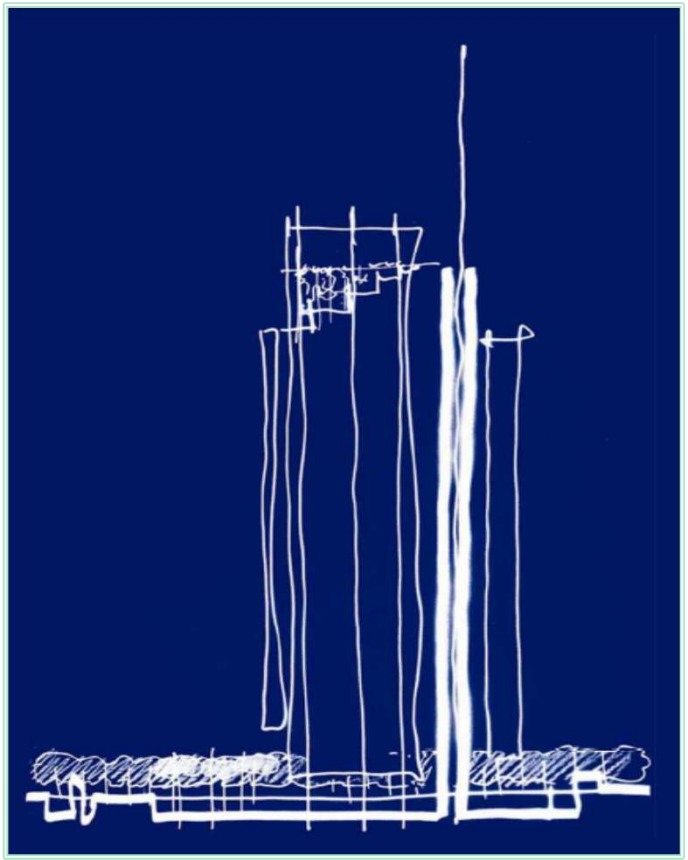
Avendo posto l'angolo α=45° e a = 7 mm

Si determina $J_w = 2 \cdot a \cdot 2163/12 = 1175 \times 104\ mm^4$

$$\sigma_{id} = 0.96\ P\ N/mm^2$$

con P=100 KN la disuguaglianza è verificata con fattore di sicurezza = 4.47

INFINE, QUALCHE IMMAGINE DA UN CANTIERE REALE



IL GRATTACIELO INTESA SANPAOLO DI TORINO

Arch. RENZO PIANO
DLS: CeAS - Milano

ISP TORINO – LE MEGACOLONNE

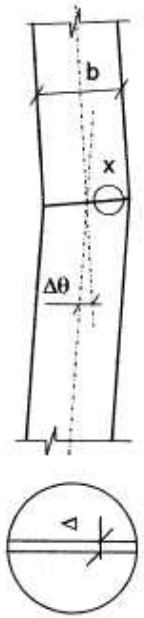
ISP TORINO – LE MEGACOLONNE

ISP TORINO – LE MEGACOLONNE

ISP TORINO – LE MEGACOLONNE

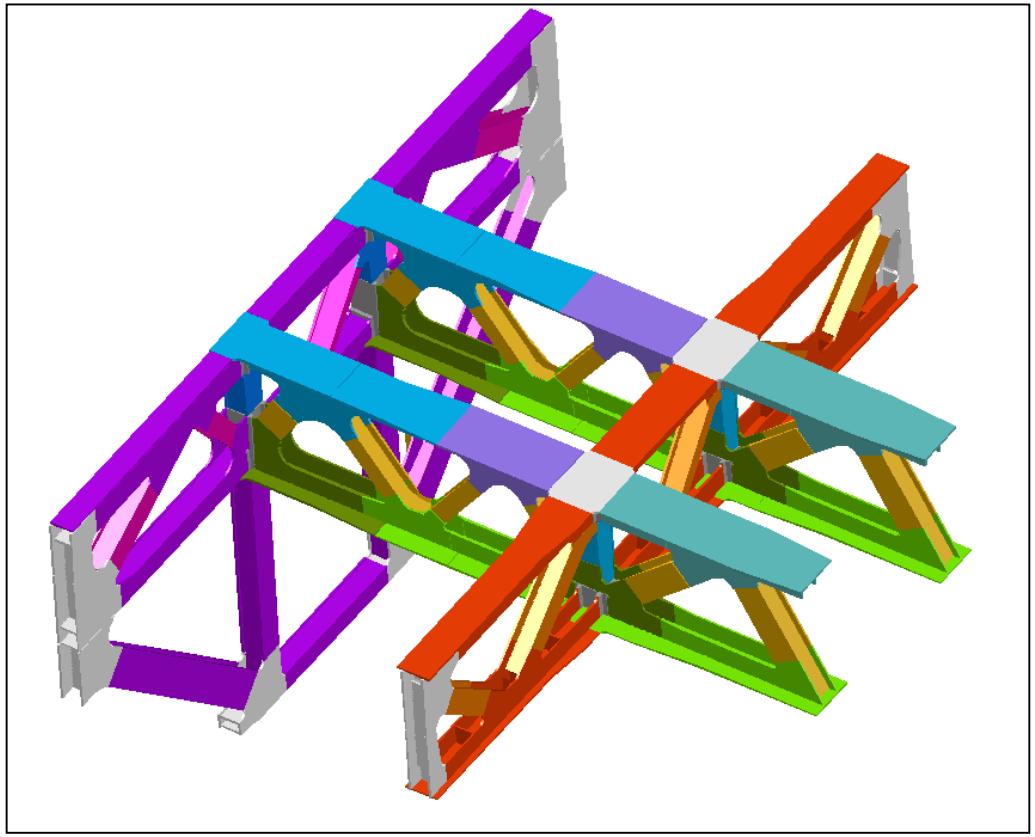
EN 1090-2:2008

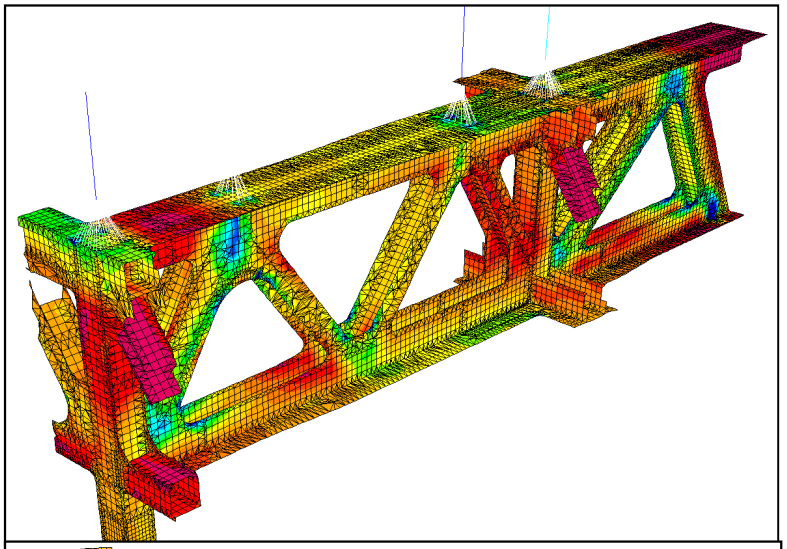
D.1.13 Essential erection tolerances – Full contact end bearing

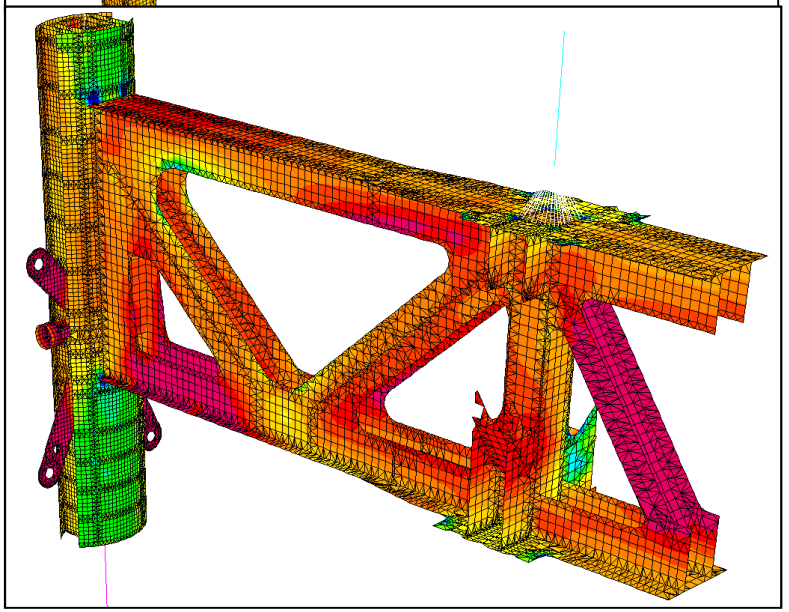
No	Criterion	Parameter	Permitted deviation Δ
1		Local angular misalignment Δθ occurring at the same time as gap Δ at point "X"	Δθ = ± *h*/500 where *h* is the storey height (see D.1.11 No4) and at the same time: • Δ = 0,5 mm over at least two thirds of the area, and • Δ = 1,0 mm maximum locally

ISP TORINO – TRANSFER SUD

ISP TORINO – TRANSFER SUD

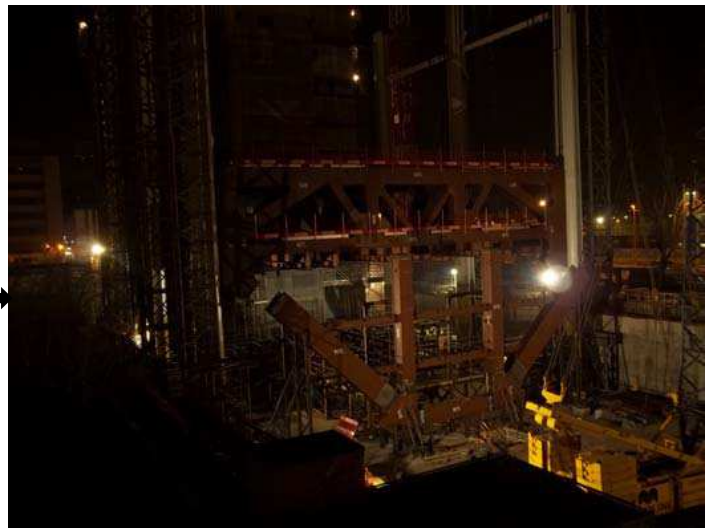






ISP TORINO – TRANSFER SUD

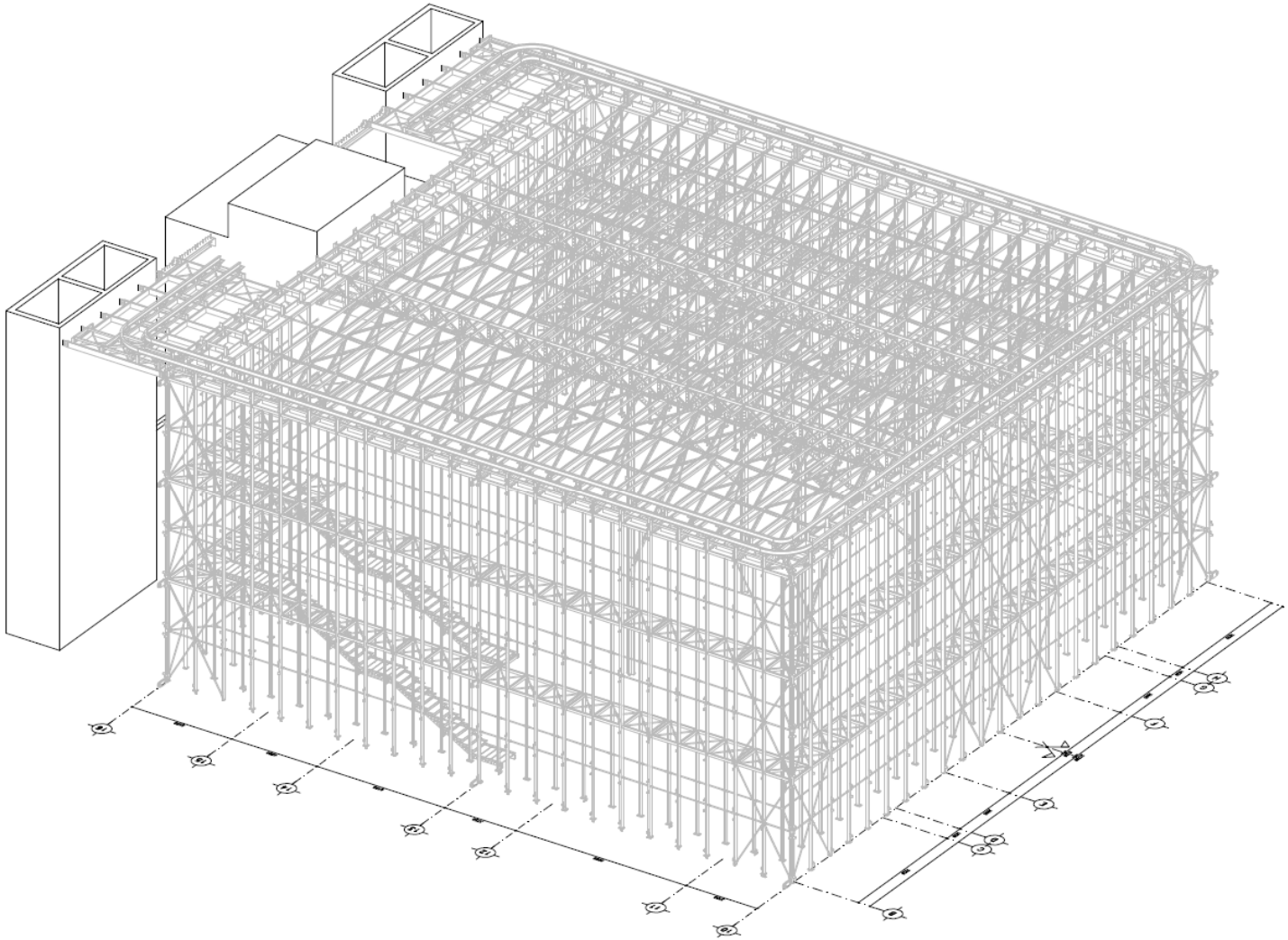
LE FASI DI MONTAGGIO: PRIMO SOLLEVAMENTO DELLA STRUTTURA DI TRASFERIMENTO



ISP TORINO – TRANSFER NORD

ISP TORINO

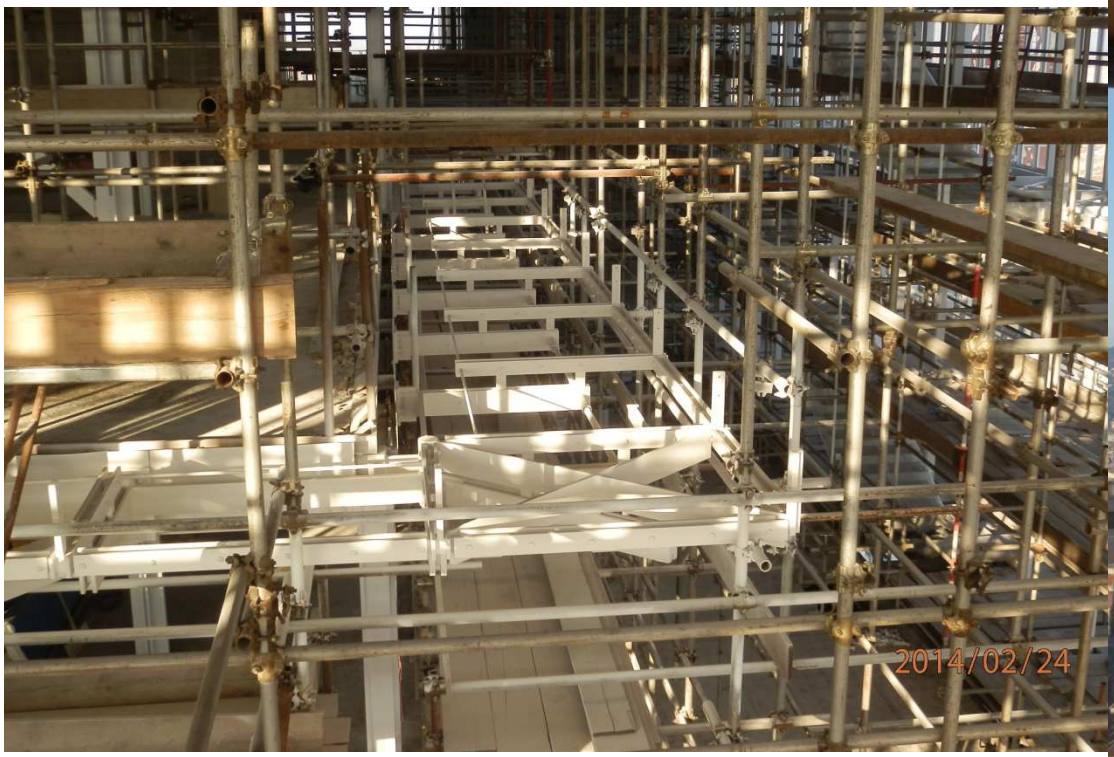
ISP TORINO – SERRA BIOCLIMATICA



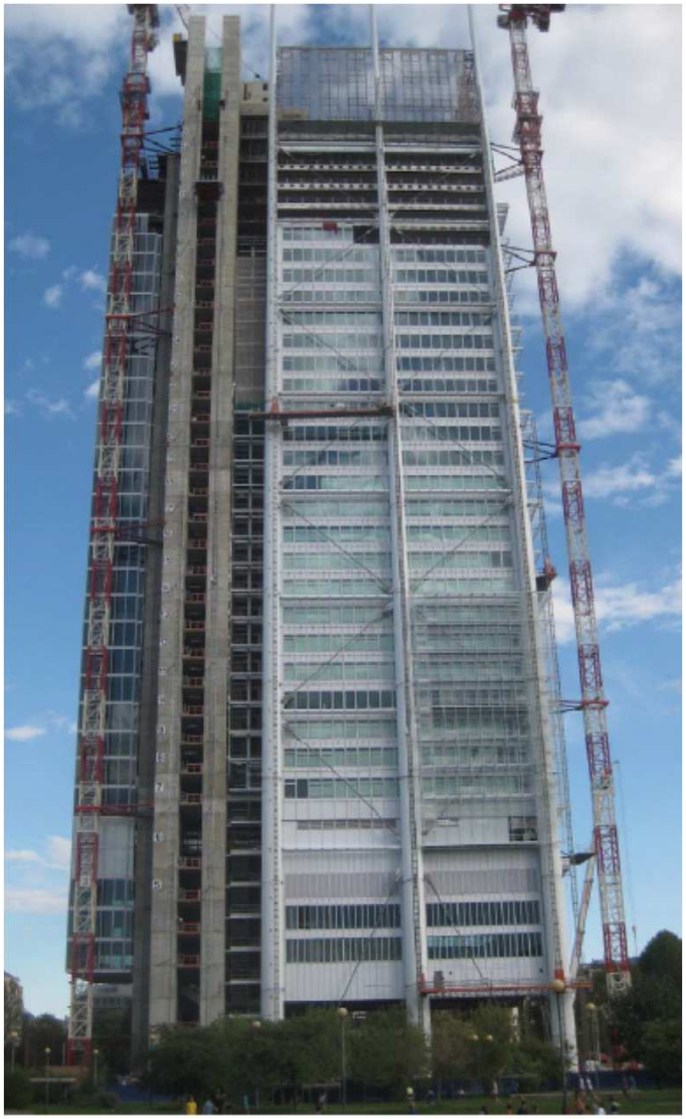
3D–ASSONOMETRIA SERRA COMPLETA

COMPOSTA DA: MODULI VERTICALI, COPERTURA SERRA, COPERTURE SCALE EST–OVEST, SCALE INTERNE

ISP TORINO – SERRA BIOCLIMATICA



ISP TORINO



GRAZIE PER L'ATTENZIONE
Ing. Valter Carni