

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

Progetto di aste e collegamenti in acciaio

8 - Collegamenti saldati

Spoletto
21-23 ottobre 2010
Edoardo M. Marino

Procedimenti di saldatura

- Sorgente termica
che produce alta temperatura in modo localizzato
- Fusione
del materiale base più il materiale di apporto
- Protezione del bagno di fusione
per evitare reazione con l'aria
- Procedimenti di saldatura:
 - manuali saldatura ossiacetilenica o saldatura ad arco con elettrodi rivestiti
 - semiautomatici saldatura a filo continuo sotto protezione di gas
 - automatici saldatura ad arco sommerso

Procedimenti di saldatura

- Procedimenti di saldatura manuali
Saldatura ossiacetilenica
 - reazione tra acetilene ed ossigeno ($C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$)
con produzione di gas riducenti e calore
 - materiale di apporto sotto forma di bacchetta metallica

Procedimenti di saldatura

- Procedimenti di saldatura manuali
Saldatura ossiacetilenica
Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti
 - arco elettrico fatto scoccare tra materiale base ed elettrodo
 - l'elettrodo ha funzione di materiale di apporto; bacchetta metallica con rivestimento la cui fusione genera gas per la protezione della zona fusa

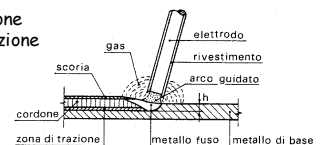


Figura tratta Da Ballo, Mazzolani. Strutture in acciaio

Difetti di saldatura

- Cricche a freddo
 - si generano ai bordi della saldatura per effetto dei cicli termici ad elevata velocità di raffreddamento che danno luogo a fenomeni simili a quella della tempera
 - la prevenzione da questo fenomeno può ottenersi con un preriscaldamento del pezzo, facendo più passate di saldatura ed utilizzando elettrodi con rivestimento basico

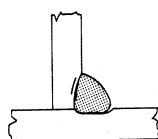


Figura tratta Da Ballo, Mazzolani. Strutture in acciaio

Difetti di saldatura

- Cricche a freddo
- Cricche a caldo
 - si generano durante la solidificazione della zona fusa e a seguito di scorie provenienti dal materiale base; queste ultime tendono a segregare in zone preferenziali e a temperature più basse del materiale circostante dando luogo a tensioni da ritiro e a non coesione del materiale

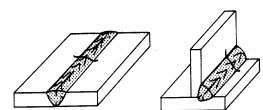


Figura tratta Da Ballo, Mazzolani. Strutture in acciaio

Difetti di saldatura

- Cricche a freddo
- Cricche a caldo
- Deformazioni permanenti
 - quando i pezzi da saldare non sono vincolati si hanno spostamenti relativi importanti che possono essere corretti con frecce iniziali di segno opposto, con bloccaggio dei pezzi da saldare o con studio delle sequenze di saldatura



Figura tratta Da Ballio, Mazzolani. Strutture in acciaio

Difetti di saldatura

- Cricche a freddo
- Cricche a caldo
- Deformazioni permanenti
- Strappi lamellari
- Difetti di esecuzione
 - dovuti a cavità contenenti scoria per sequenze improprie delle passate di saldatura, a mancata penetrazione dei pezzi da saldare o ad incollatura tra materiale di apporto fuso e materiale base non ancora fuso

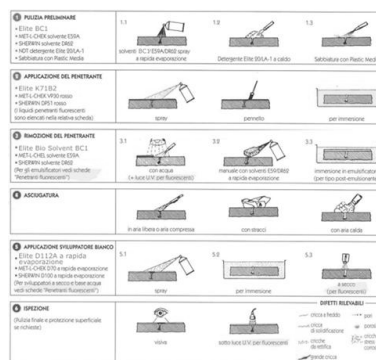


Figura tratta Da Ballio, Mazzolani. Strutture in acciaio

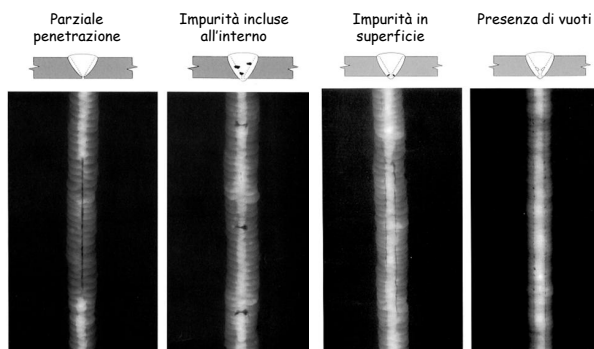
Difetti di saldatura

- Cricche a freddo
- Cricche a caldo
- Deformazioni permanenti
- Strappi lamellari
- Difetti di esecuzione
- Tensioni residue

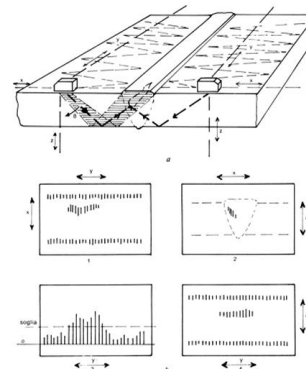
Controlli delle saldature Esame con liquidi penetranti



Controlli delle saldature Esame radiografico

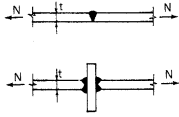


Controlli delle saldature Esame ad ultrasuoni



Collegamenti saldati Classificazione

1. Saldature a completa penetrazione



Se rimangono tratti non collegati:
saldatura a parziale penetrazione (considerata come cordone d'angolo)

2. Saldature a cordone d'angolo

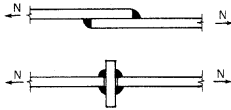


Figura tratta Da Ballio, Mazzolani. Strutture in acciaio

Saldatura a completa penetrazione

- È indispensabile la preparazione dei lembi dei pezzi da saldare:
cianfrinatura (perché lo smusso è denominato cianfrino)

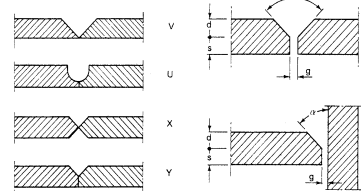


Figura tratta Da Ballio, Mazzolani. Strutture in acciaio

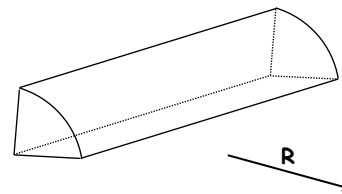
Saldatura a completa penetrazione

- Viene perfettamente ripristinata la continuità del materiale
- La resistenza della saldatura è almeno pari a quella dei pezzi che unisce
- In genere non è necessaria una verifica specifica

4.2.8.2. Unioni con saldature a piena penetrazione

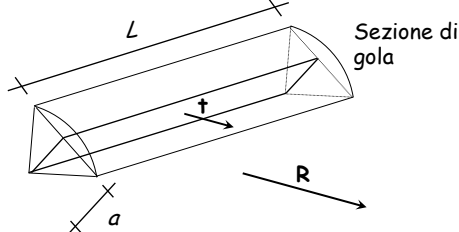
I collegamenti testa a testa, a T e a croce a piena penetrazione sono generalmente realizzati con materiali d'apporto aventi resistenza uguale o maggiore a quella degli elementi collegati. Pertanto la resistenza di calcolo dei collegamenti a piena penetrazione si assume eguale alla resistenza di progetto 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.

Saldatura a cordoni d'angolo Resistenza dei cordoni di saldatura



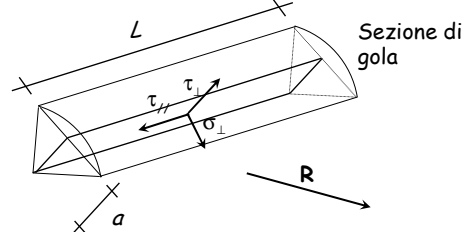
R Forza agente sul cordone d'angolo

Saldatura a cordoni d'angolo Resistenza dei cordoni di saldatura



R Forza agente sul cordone d'angolo
t Tensione agente sulla sezione di gola
(ha lo stessa direzione di R e modulo pari a $t = R / aL$)

Saldatura a cordoni d'angolo Resistenza dei cordoni di saldatura



R Forza agente sul cordone d'angolo
t Tensione agente sulla sezione di gola
(ha lo stessa direzione di R e modulo pari a $t = R / aL$)
 $\sigma_{\perp} \tau_{\parallel} \tau_{\perp}$ Componenti di t

Saldatura a cordoni d'angolo Resistenza dei cordoni di saldatura

Il dominio di rottura di un cordone di saldatura è stato determinato sperimentalmente

Per la sua forma irregolare è stato denominato *peroide*

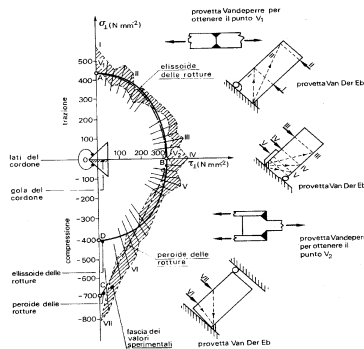
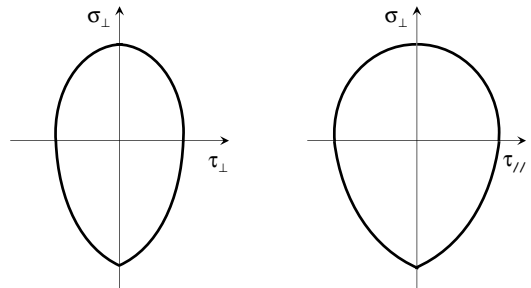
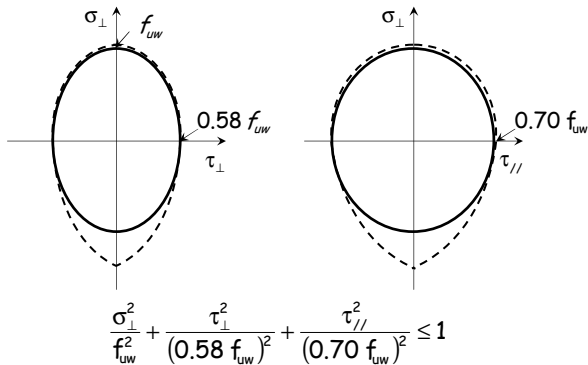


Figura tratta Da Ballo, Mazzolani. Strutture in acciaio

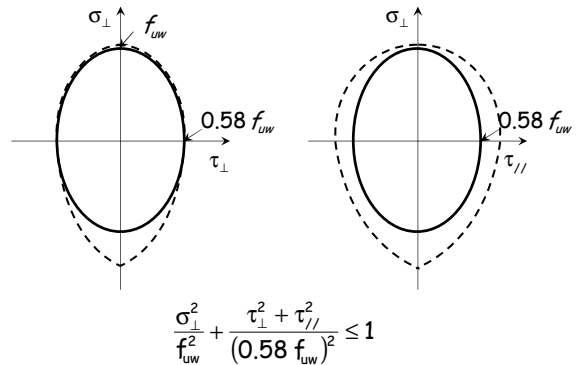
Domini di resistenza sperimentale Peroide



Domini di resistenza analitici Ellissoide



Domini di resistenza Ellissoide di rotazione



Domini di resistenza Ellissoide ed ellissoide di rotazione

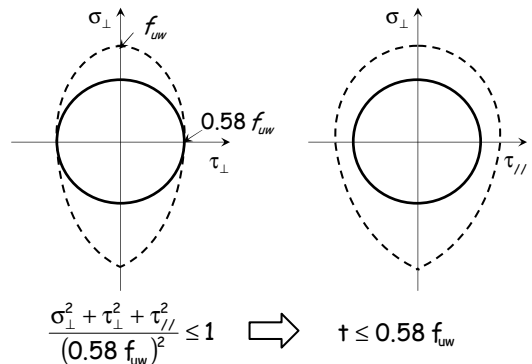
$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{f_{uw}^2} + \frac{\tau_{\perp}^2}{(0.58 f_{uw})^2} + \frac{\tau_{\parallel}^2}{(0.70 f_{uw})^2} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{f_{uw}^2} + \frac{\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2}{(0.58 f_{uw})^2} \leq 1$$

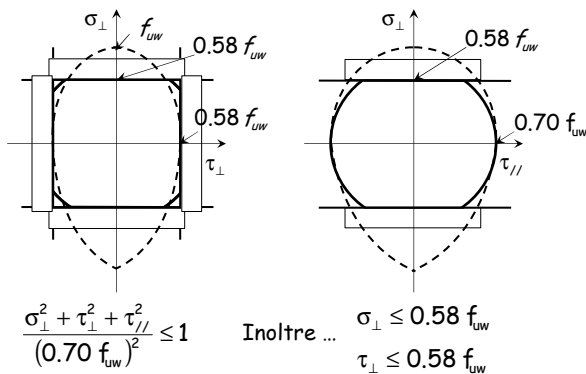
Svantaggio:

Bisogna calcolare le componenti della tensione t rispetto al sistema di riferimento della sezione di gola σ_{\perp} , τ_{\perp} e τ_{\parallel}

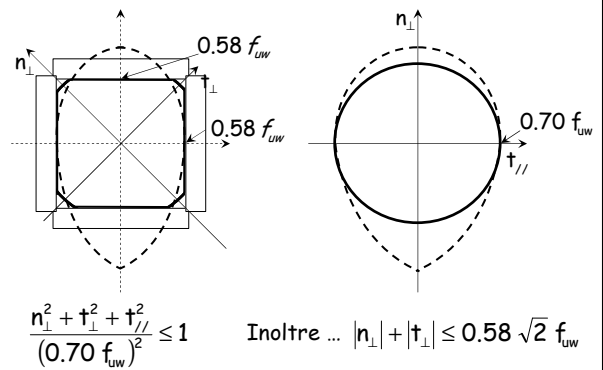
Domini di resistenza Dominio sferico



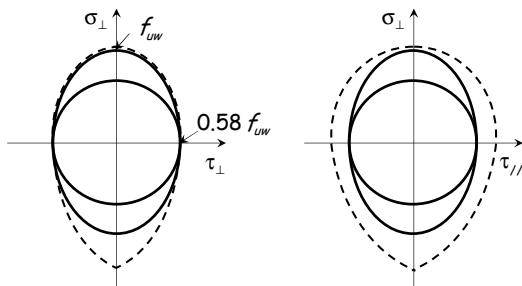
Domini di resistenza Sfera mozza



Domini di resistenza Sfera mozza



Saldatura a cordoni d'angolo Resistenza dei cordoni di saldatura



L'Eurocodice 3 propone due domini di resistenza:
 1 - dominio sferico con raggio pari a $0.58 f_{uw}$
 2 - ellissoide di rotazione

Verifica di cordoni di saldatura con il dominio sferico

$$t < f_{vw} = \frac{f_u}{\sqrt{3}} = \frac{f_u}{\beta_w}$$

f_{vw} Massima tensione sopportabile da cordone di saldatura

β_w Tiene conto della differenza tra il cordone di saldatura ed il materiale base

$\beta_w = 0.80$ Per S235

$\beta_w = 0.85$ Per S275

$\beta_w = 0.90$ Per S355

Verifica di cordoni di saldatura con il dominio sferico

$$t < f_{vw} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

f_{vw} Massima tensione sopportabile da cordone di saldatura

β_w Tiene conto della differenza tra il cordone di saldatura ed il materiale base

$\beta_w = 0.80$ Per S235

$\beta_w = 0.85$ Per S275

$\beta_w = 0.90$ Per S355

Prescrizioni sui cordoni di saldatura

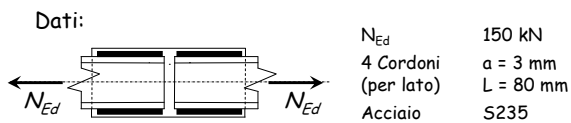
L'altezza di gola:

- deve essere pari almeno a 3 mm

Lunghezza efficace:

- di norma si assume uguale alla lunghezza totale meno 2 volte l'altezza di gola
- si assume pari alla lunghezza totale se il cordone di saldatura presenta lo stesso spessore anche nelle parti iniziale e finale
- deve essere pari almeno a 6 volte l'altezza di gola e comunque non minore di 30 mm

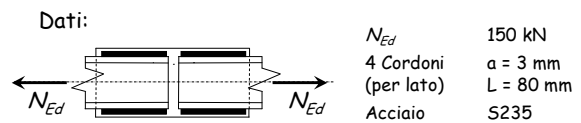
Esempio



1 - Determinazione di $f_{vw,d}$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360 / \sqrt{3}}{0.80 \times 1.25} = 207.8 \text{ MPa}$$

Esempio



2 - Verifica

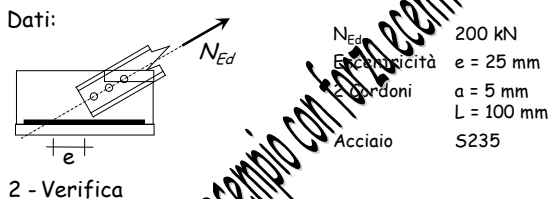
$$F_{v,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n_c} = \frac{150}{4} = 37.5 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} < a L f_{vw,d} = \frac{3 \times 80 \times 207.8}{10^3} = 49.9 \text{ kN}$$

$$f_{vw,d} = 207.8 \text{ MPa}$$

I cordoni sono verificati

Esempio



Verifica di cordoni di saldatura con l'ellissoide di rotazione

Richiede la valutazione delle diverse componenti di tensione sulla sezione di gola

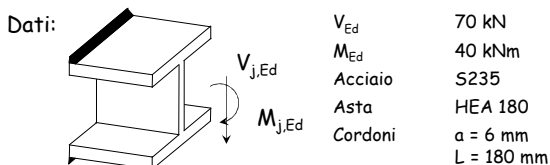
$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{f_{uw}^2} + \frac{\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2}{(0.58 f_{uw})^2} \leq 1$$

o in alternativa ...

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq f_{uw} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

β_w e γ_{M2} hanno lo stesso significato fisico ed assumono gli stessi valori mostrati nel caso di dominio sferico

Esempio

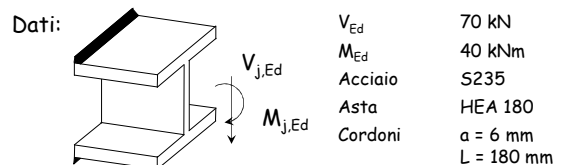


1 - Determinazione delle tensioni dovute al taglio

$$F_v = \frac{V_{j,Ed}}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ kN}$$

F_v Forza verticale applicata sul cordone per effetto del taglio

Esempio



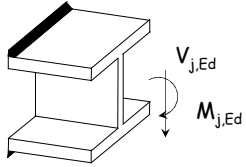
1 - Determinazione delle tensioni dovute al taglio

$$\sigma_{\perp}^v = \frac{F_v \cos(45^\circ)}{a L} = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{2} \times 6 \times 180} = 22.9 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp}^v = \frac{F_v \sin(45^\circ)}{a L} = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{2} \times 6 \times 180} = 22.9 \text{ MPa}$$

Esempio

Dati:



V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

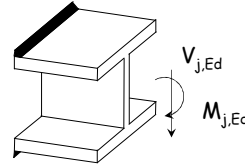
2 - Determinazione delle tensioni dovute al Momento

$$F_M = \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{40}{0.171} = 233.9 \text{ kN}$$

F_M Forza orizzontale applicata sul cordone per effetto del momento flettente

Esempio

Dati:



V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

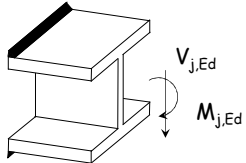
2 - Determinazione delle tensioni dovute al Momento

$$\sigma_{\perp}^M = \frac{F_M \sin(45^\circ)}{a L} = \frac{233.9 \times 10^3}{\sqrt{2} \times 6 \times 180} = 153.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp}^M = \frac{F_M \cos(45^\circ)}{a L} = \frac{233.9 \times 10^3}{\sqrt{2} \times 6 \times 180} = 153.2 \text{ MPa}$$

Esempio

Dati:



V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

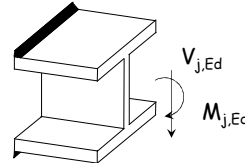
3 - Determinazione delle tensioni totali

$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\perp}^V + \sigma_{\perp}^M = 22.9 + 153.2 = 176.1 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = -\tau_{\perp}^V + \tau_{\perp}^M = -22.9 + 153.2 = 130.3 \text{ MPa}$$

Esempio

Dati:



V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

4 - Verifica

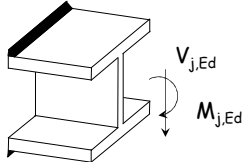
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2} = \sqrt{176.1^2 + 3 \times 130.3^2} = 286.3 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0.8 \times 1.25} = 360 \text{ MPa}$$

I cordoni sono verificati

Esempio

Dati:

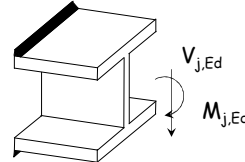


V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

E se avessi eseguito la verifica con il dominio sferico?

Esempio

Dati:



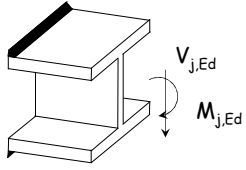
V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

1 - Determinazione di $f_{v,w,d}$

$$f_{v,w,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}} = \frac{360 / \sqrt{3}}{0.80 \times 1.25} = 207.8 \text{ MPa}$$

Esempio

Dati:



V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

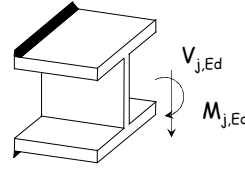
2 - Calcolo la forza agente sul cordone

$$F_V = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ kN} \quad F_M = \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{40}{0.171} = 233.9 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} = \sqrt{F_V^2 + F_M^2} = \sqrt{35^2 + 233.9^2} = 236.5 \text{ kN}$$

Esempio

Dati:



V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

3 - Verifica

$$F_{Ed} = 236.5 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} > a L f_{vw,d} = \frac{6 \times 180 \times 207.8}{10^3} = 224.4 \text{ kN}$$

$$f_{vw,d} = 207.8 \text{ MPa}$$

I cordoni non sono verificati

Saldatura a cordoni d'angolo Resistenza dei cordoni di saldatura

Le NTC08 consentono anche l'uso della sfera mozza:

$$t = \sqrt{n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2 + t_{\parallel}^2} \leq \beta_1 f_y$$

$$|n_{\perp}| + |t_{\perp}| \leq \beta_2 f_y$$

β_1 e β_2 tengono conto della differenza tra il cordone di saldatura ed il materiale base

$$\beta_1 = 0.85 \quad \beta_2 = 1.00 \quad \text{Per S235}$$

$$\beta_1 = 0.70 \quad \beta_2 = 0.85 \quad \text{Per S275 ed S355}$$

Dominio ormai superato, introdotto per ottenere gli stessi risultati delle tensioni ammissibili