

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

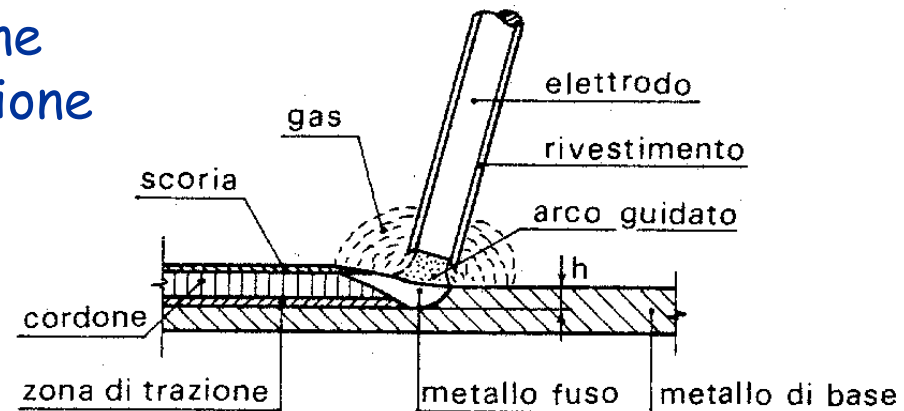
Procedimenti di saldatura

- Procedimenti di saldatura manuali

Saldatura ossiacetilenica

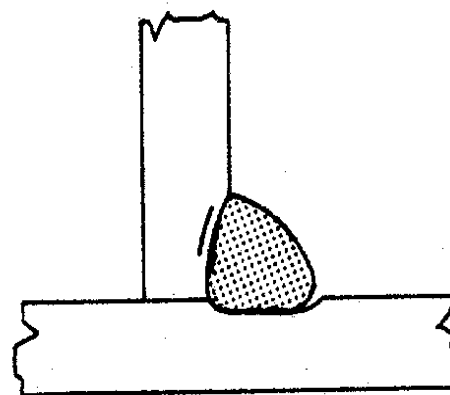
Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti

- 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



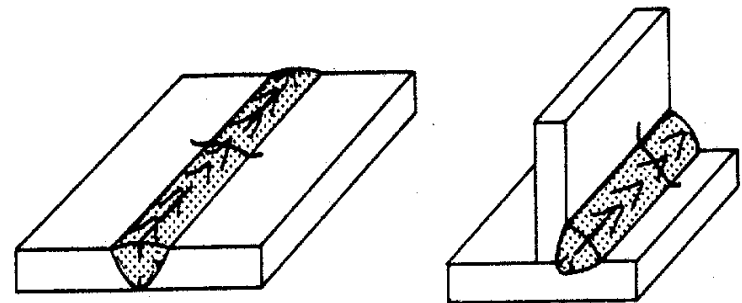
Difetti di saldatura

- 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



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



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



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



Difetti di saldatura

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

Controlli delle saldature

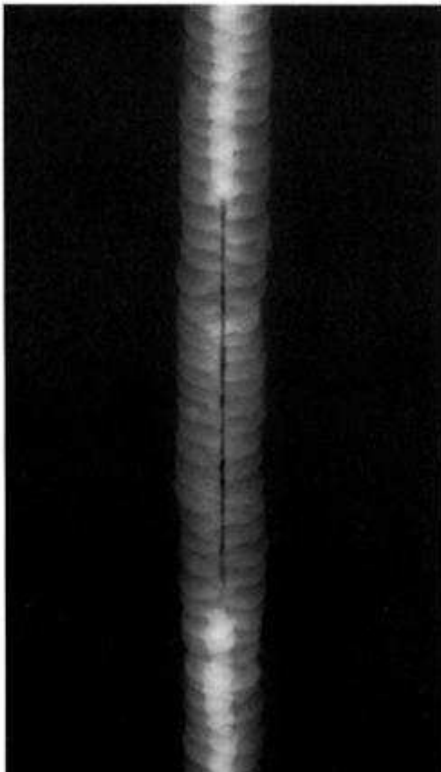
Esame con liquidi penetranti

1 PULIZIA PRELIMINARE <ul style="list-style-type: none"> • Elite BC1 • MET-L-CHEK solvente ES9A • SHERWIN solvente D662 • NDT detergente Elite D01A-1 • Sabbatura con Plastic Media 	<div> <div>1.1 solventi BC1/ES9A/D662 spray a rapida evaporazione</div> <div>1.2 Detergente Elite D01A-1 a caldo</div> <div>1.3 Sabbatura con Plastic Media</div> </div>
2 APPLICAZIONE DEL PENETRANTE <ul style="list-style-type: none"> • Elite K71B2 • MET-L-CHEK VP30 rosso • SHERWIN DPS1 rosso <i>(I liquidi penetranti fluorescenti sono elencati nella relativa scheda)</i>	<div> <div>2.1 spray</div> <div>2.2 pennello</div> <div>2.3 per immersione</div> </div>
3 RIMOZIONE DEL PENETRANTE <ul style="list-style-type: none"> • Elite Bio Solvent BC1 • MET-L-CHEK solvente ES9A • SHERWIN solvente D662 <i>(Per gli emulsificatori vedi schede "Penetranti fluorescenti")</i>	<div> <div>3.1 con acqua <i>(+ luce UV per fluorescenti)</i></div> <div>3.2 manuale con solventi ES9/D662 a rapida evaporazione</div> <div>3.3 immersione in emulsificatore <i>(per tipo post-emulsionante)</i></div> </div>
4 ASCIUGATURA	<div> <div>4.1 in aria libera o aria compressa</div> <div>4.2 con stracci</div> <div>4.3 con aria calda</div> </div>
5 APPLICAZIONE SVILUPPATORE BIANCO <ul style="list-style-type: none"> • Elite D112A a rapida evaporazione • MET-L-CHEK D70 a rapida evaporazione • SHERWIN D100 a rapida evaporazione <i>(Per sviluppatori a secco e base acqua vedi schede "Penetranti fluorescenti")</i>	<div> <div>5.1 spray</div> <div>5.2 per immersione</div> <div>5.3 a secco <i>(per fluorescenti)</i></div> </div>
6 ISPEZIONE <i>(Pulizia finale e protezione superficiale se richieste)</i>	<div> <div>6.1 visiva</div> <div>6.2 <i>sotto luce UV per fluorescenti</i></div> </div> <div> DIFETTI RILEVABILI </div>

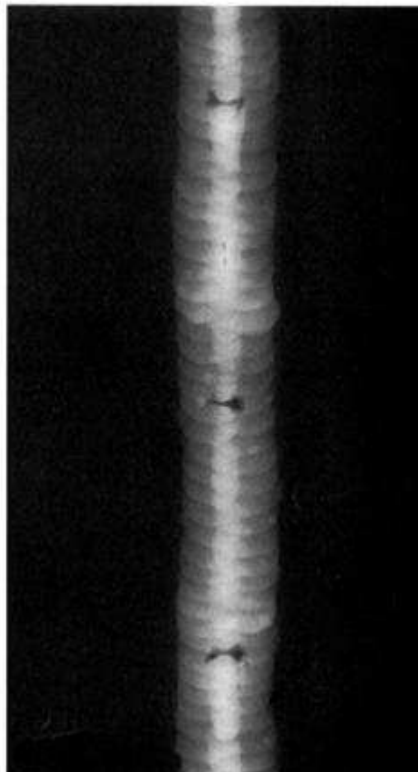
Controlli delle saldature

Esame radiografico

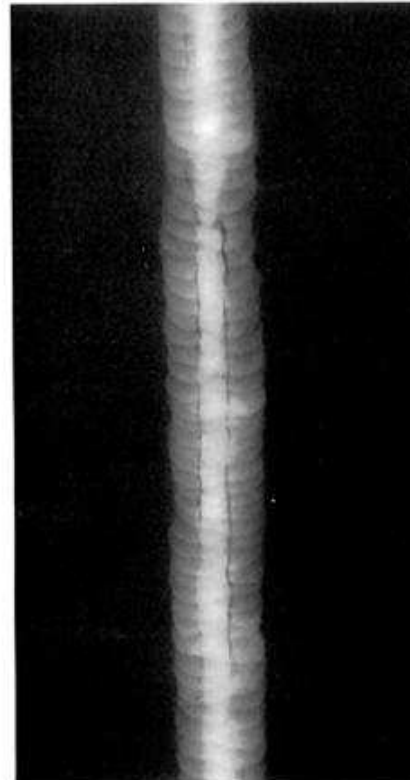
Parziale
penetrazione



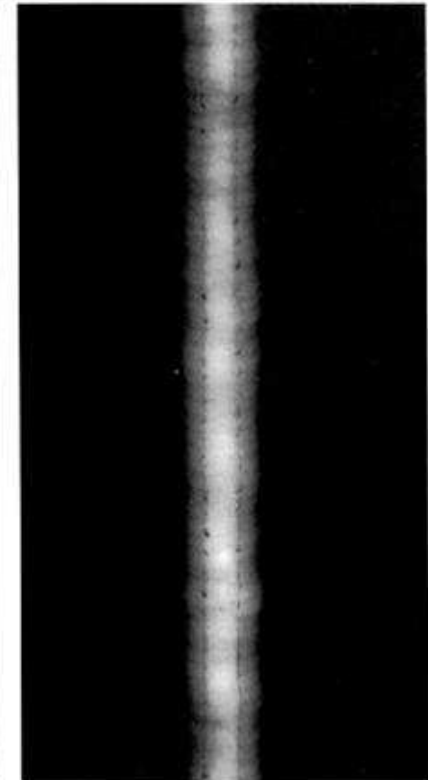
Impurità incluse
all'interno



Impurità in
superficie

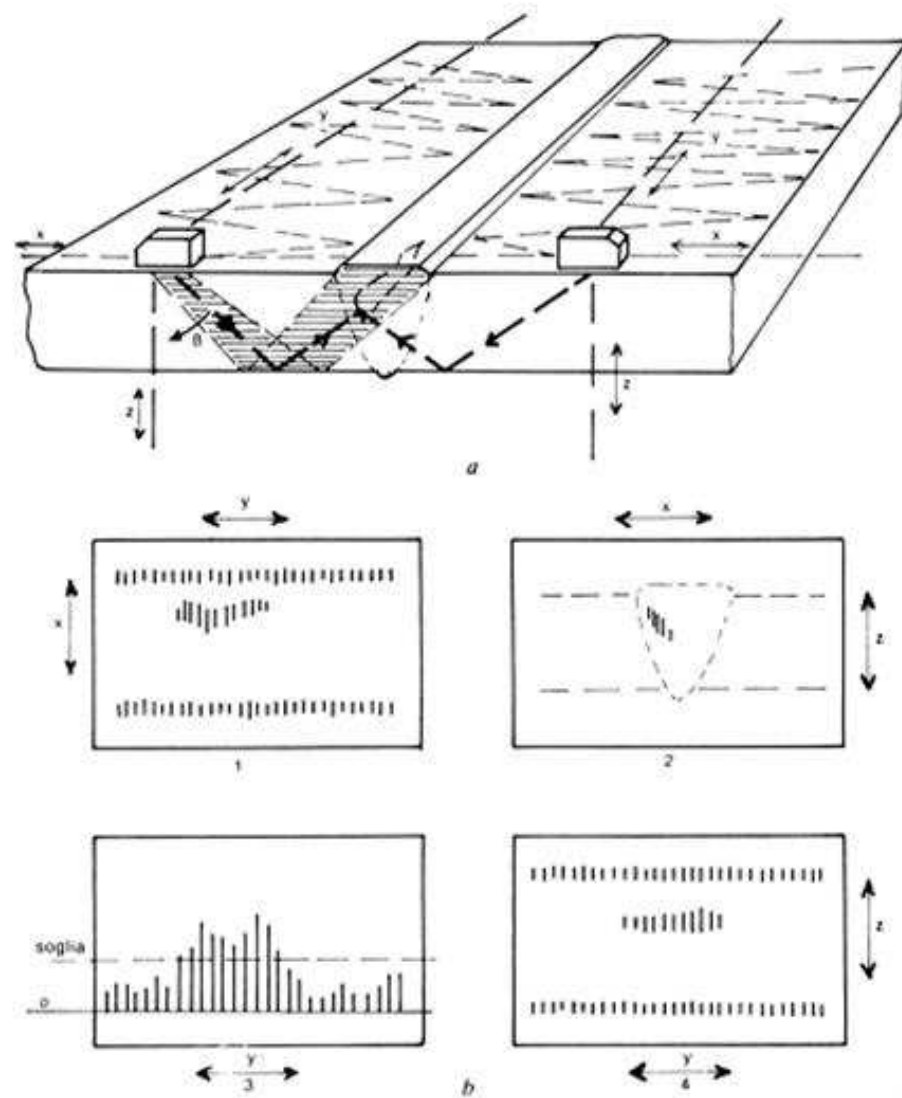


Presenza di vuoti



Controlli delle saldature

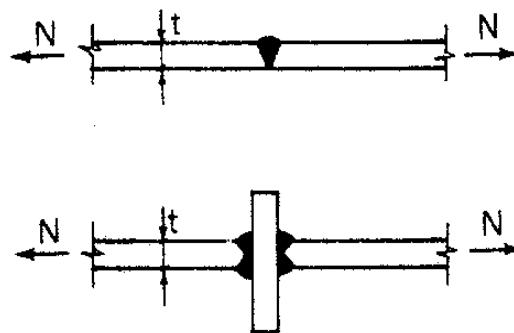
Esame ad ultrasuoni



Collegamenti saldati

Classificazione

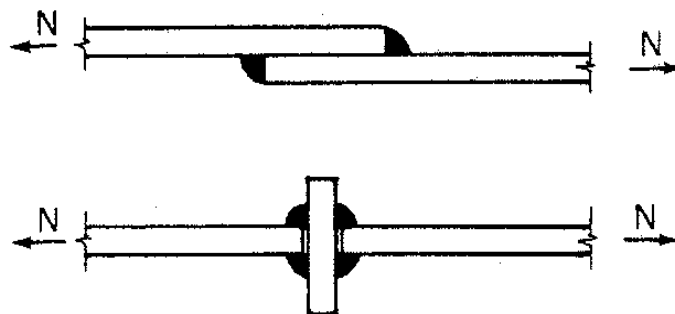
1. Saldature a completa penetrazione



Se rimangono tratti non collegati:

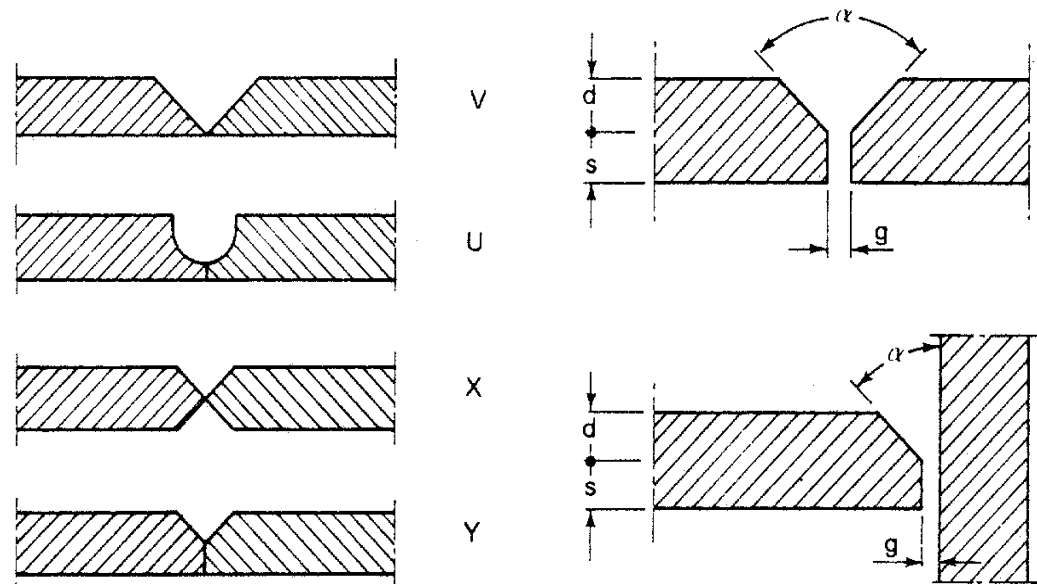
saldatura a parziale penetrazione (considerata come cordone d'angolo)

2. Saldature a cordone d'angolo



Saldatura a completa penetrazione

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



Saldatura a completa penetrazione

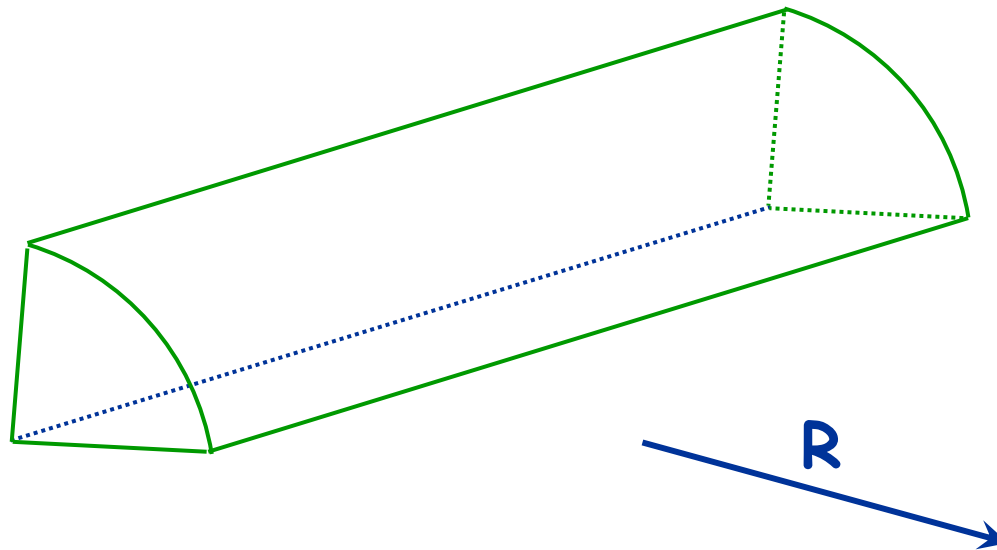
- Viene perfettamente ripristinata la continuità del materiale
- La resistenza della saldatura è almeno pari a quella dei pezzi che unisce
- In genere non è necessaria una verifica specifica

4.2.8.2.1 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

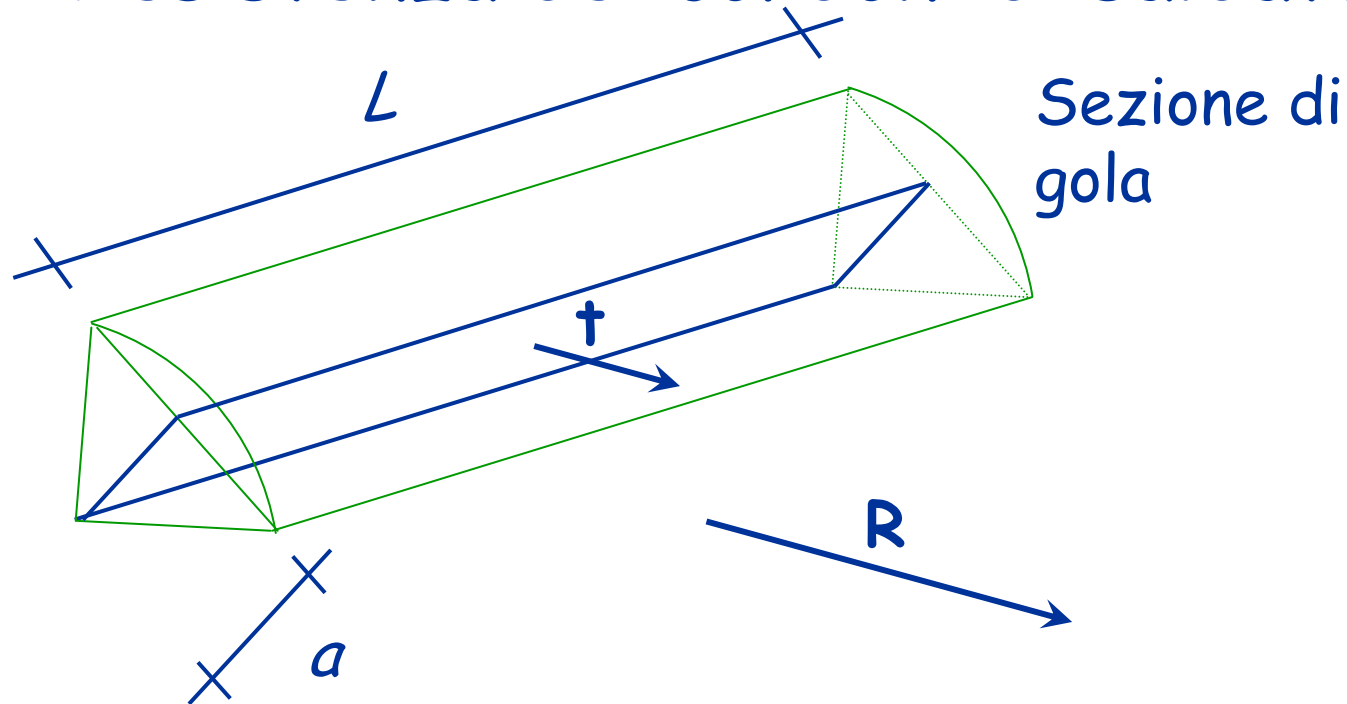


R

Forza agente sul cordone d'angolo

Saldatura a cordoni d'angolo

Resistenza dei cordoni di saldatura



R

Forza agente sul cordone d'angolo

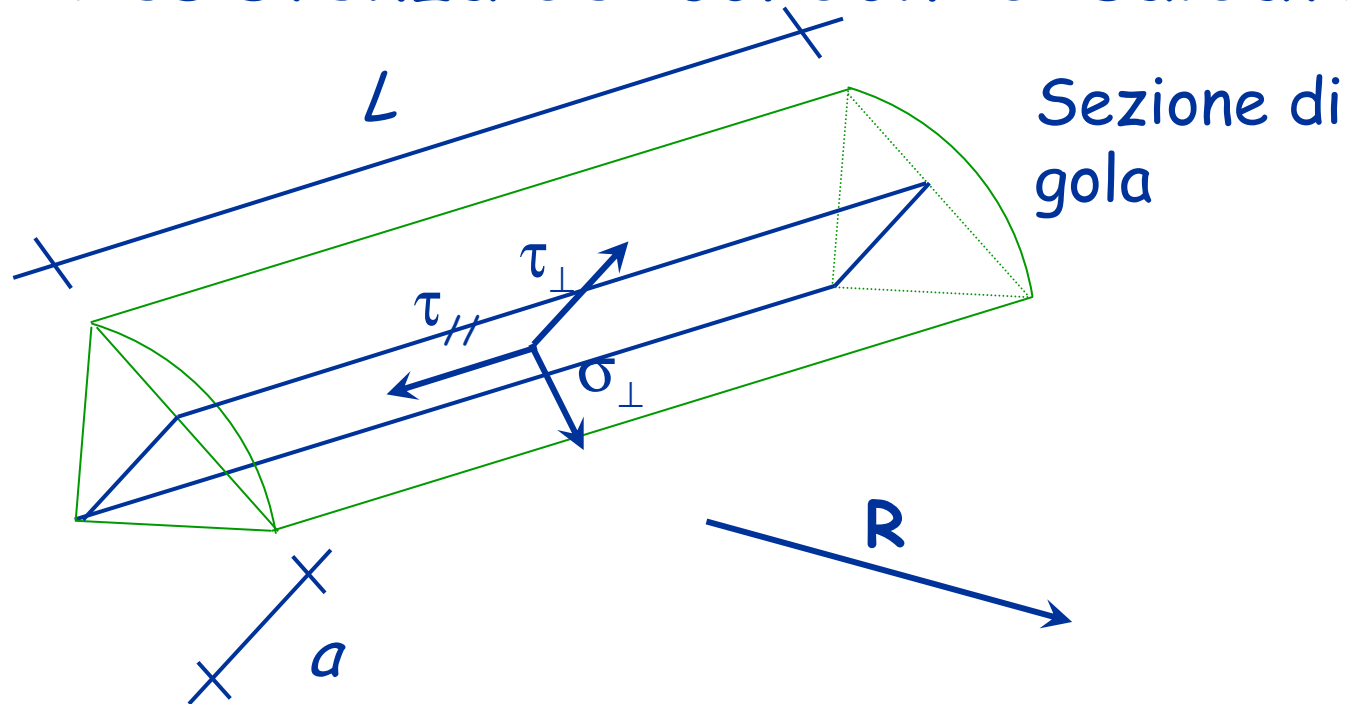
t

Tensione agente sulla sezione di gola

(ha lo stessa direzione di R e modulo pari a $t = R / a L$)

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 $t = R / a L$)
- $\sigma_{\perp} \tau_{//} \tau_{\perp}$ 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 *perioide*

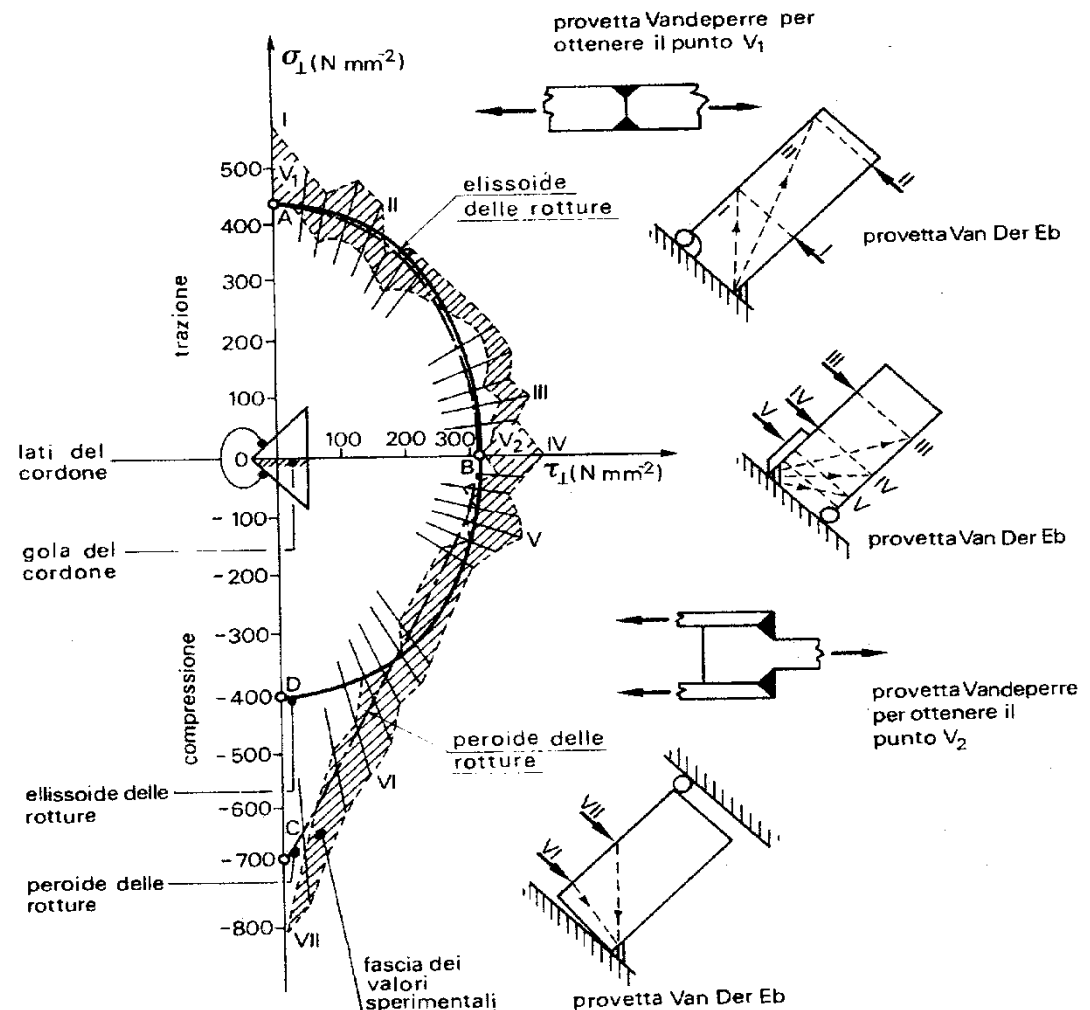
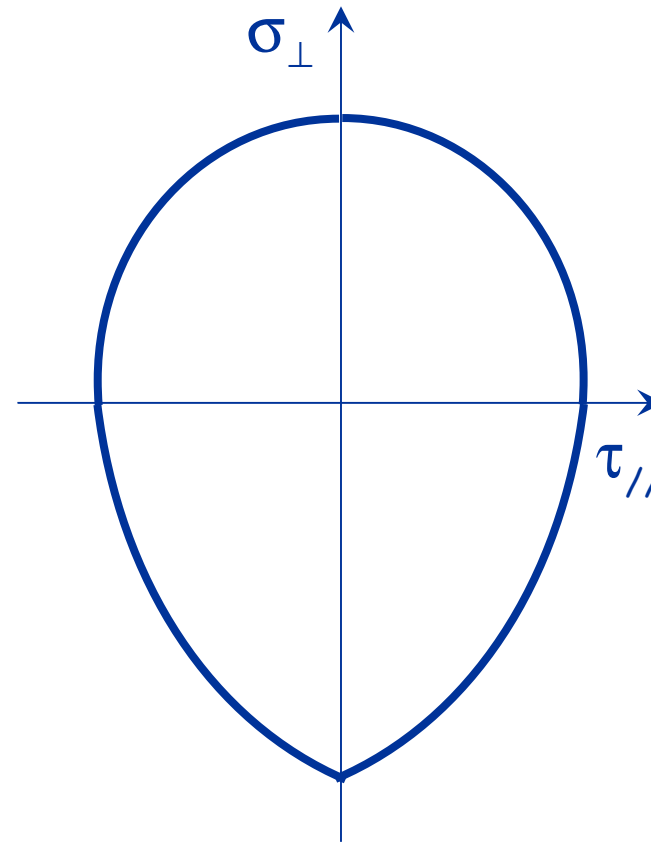
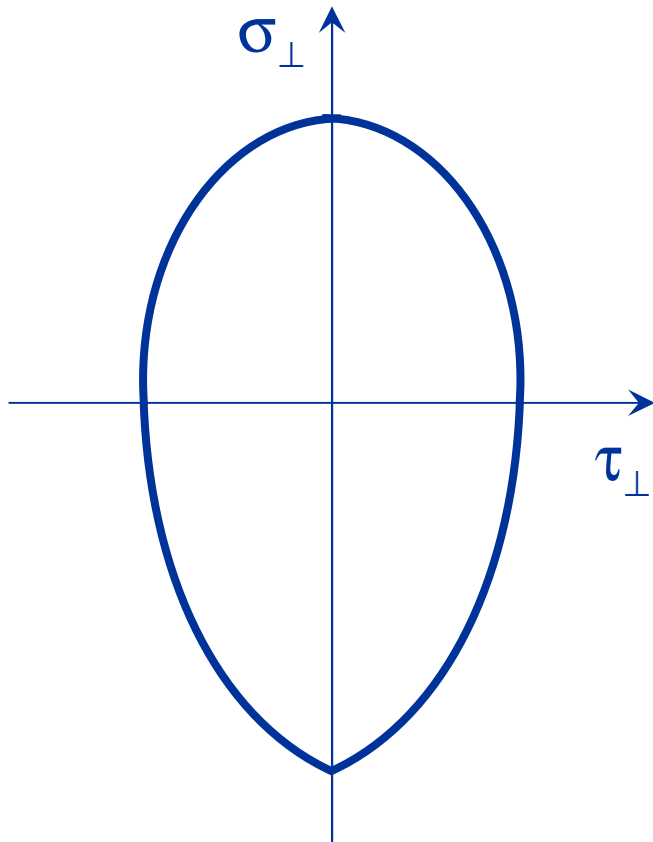


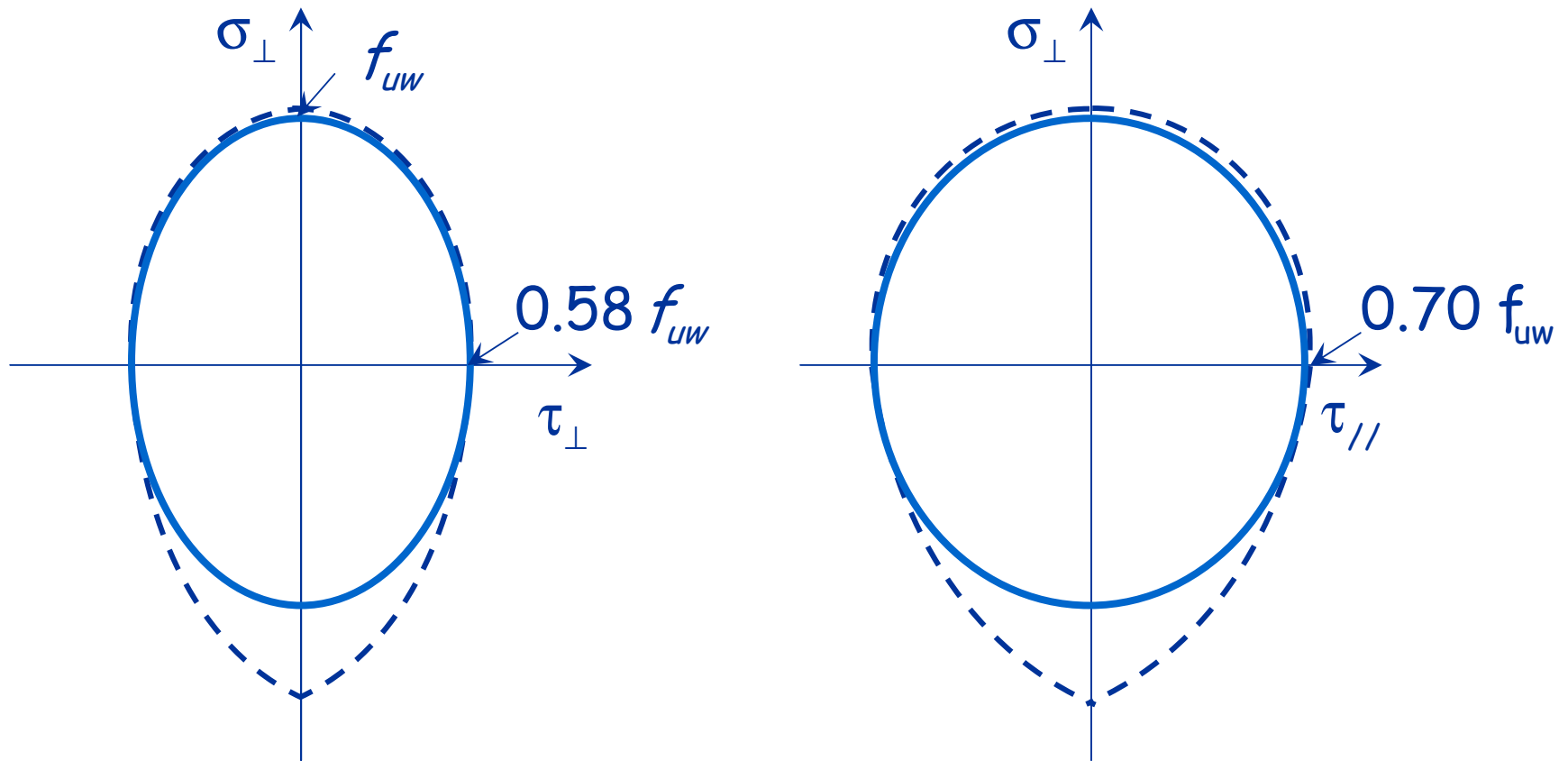
Figura tratta Da Ballio, Mazzolani. Strutture in acciaio

Dominio di resistenza sperimentale Peroide



Domini di resistenza analitici

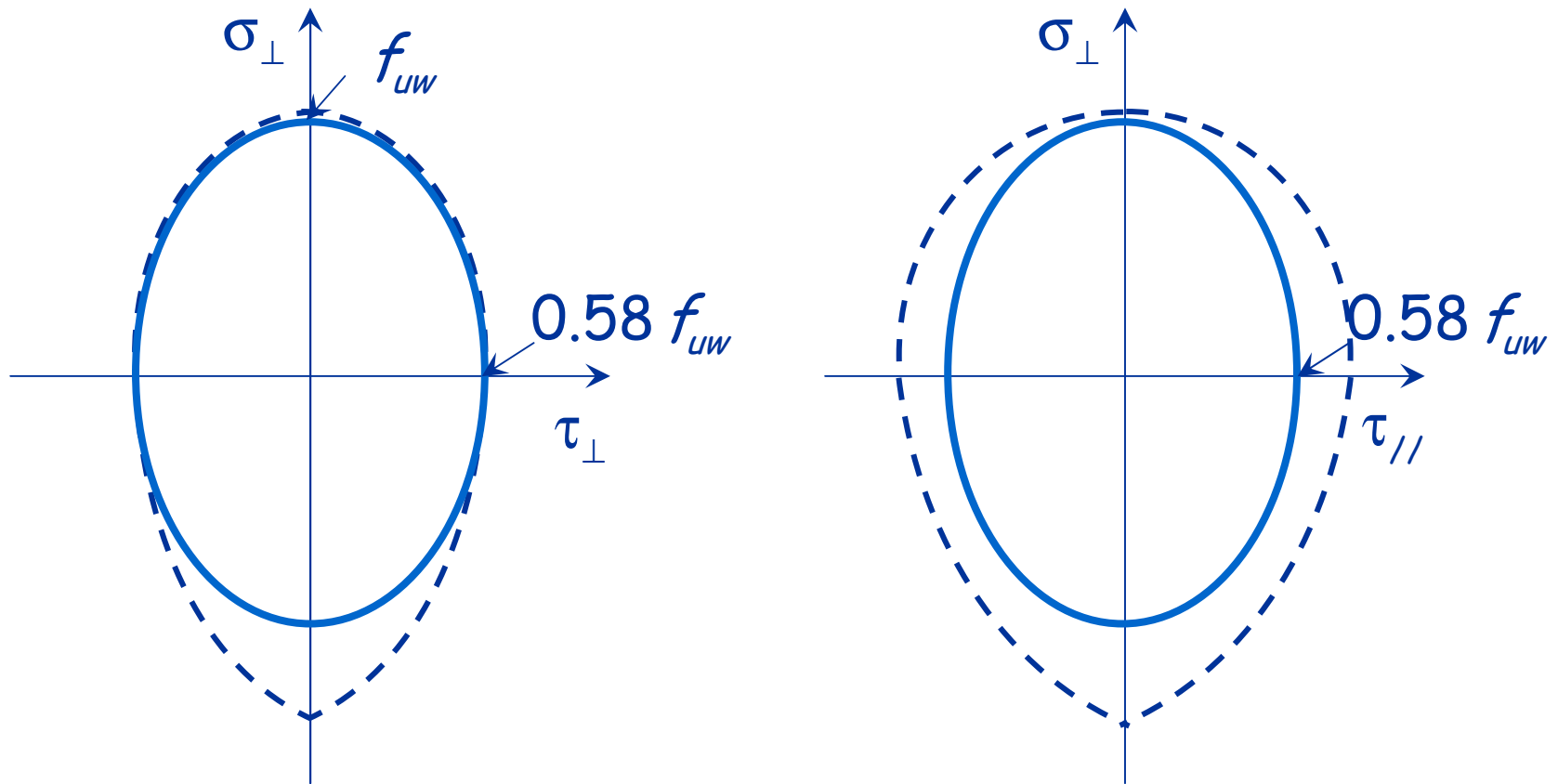
Ellissoide



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

Domini di resistenza

Ellissoide di rotazione



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

Domini di resistenza

Ellissoide ed ellissoide di rotazione

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

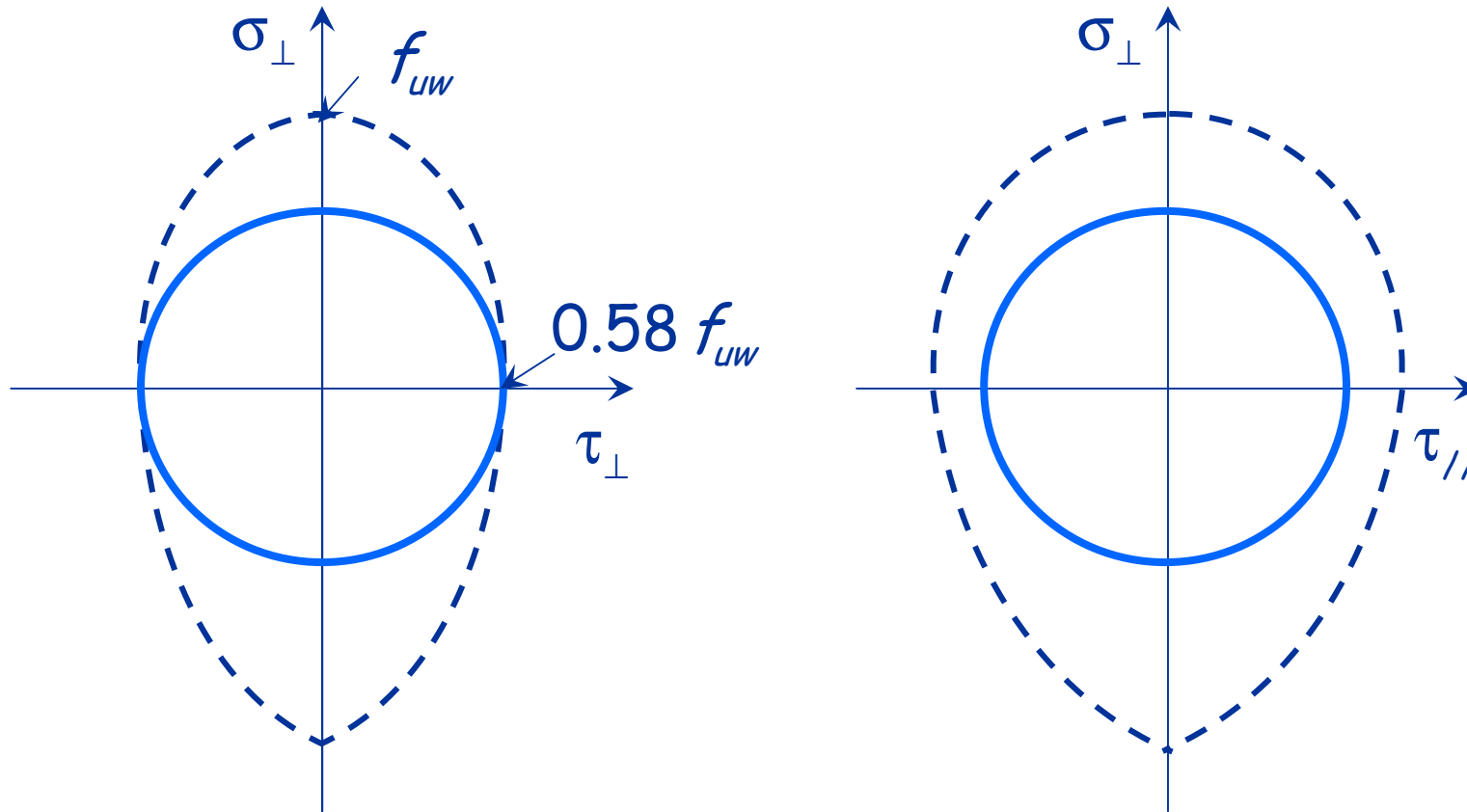
$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{f_{uw}^2} + \frac{\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2}{(0.58 f_{uw})^2} \leq 1$$

Svantaggio:

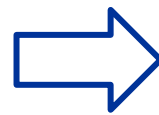
Bisogna calcolare le componenti della tensione t rispetto al sistema di riferimento della sezione di gola σ_{\perp} , τ_{\perp} e $\tau_{//}$

Domini di resistenza

Dominio sferico



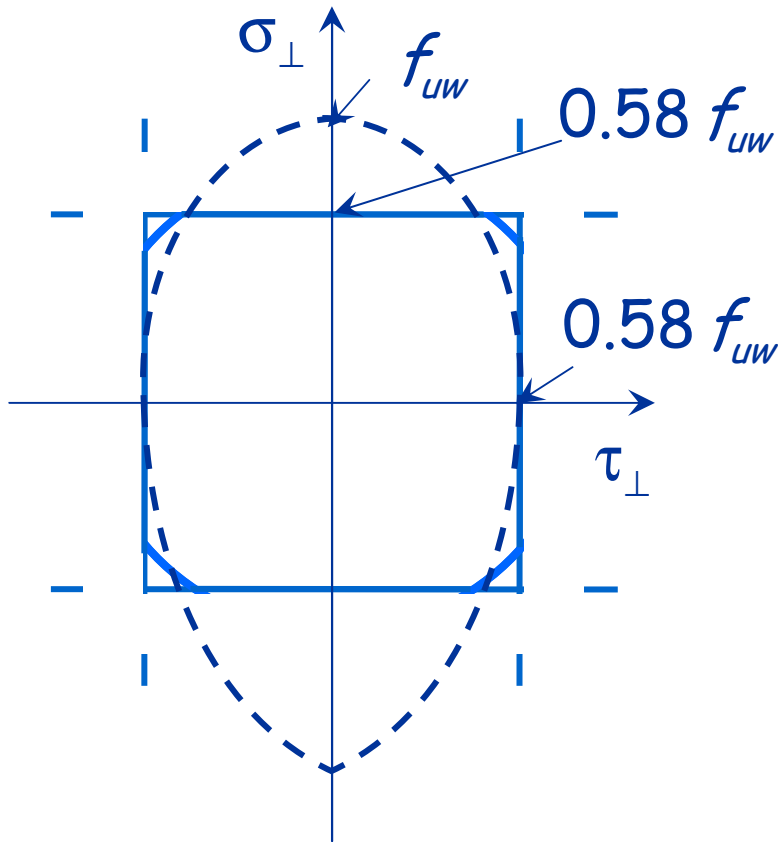
$$\frac{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2}{(0.58 f_{uw})^2} \leq 1$$



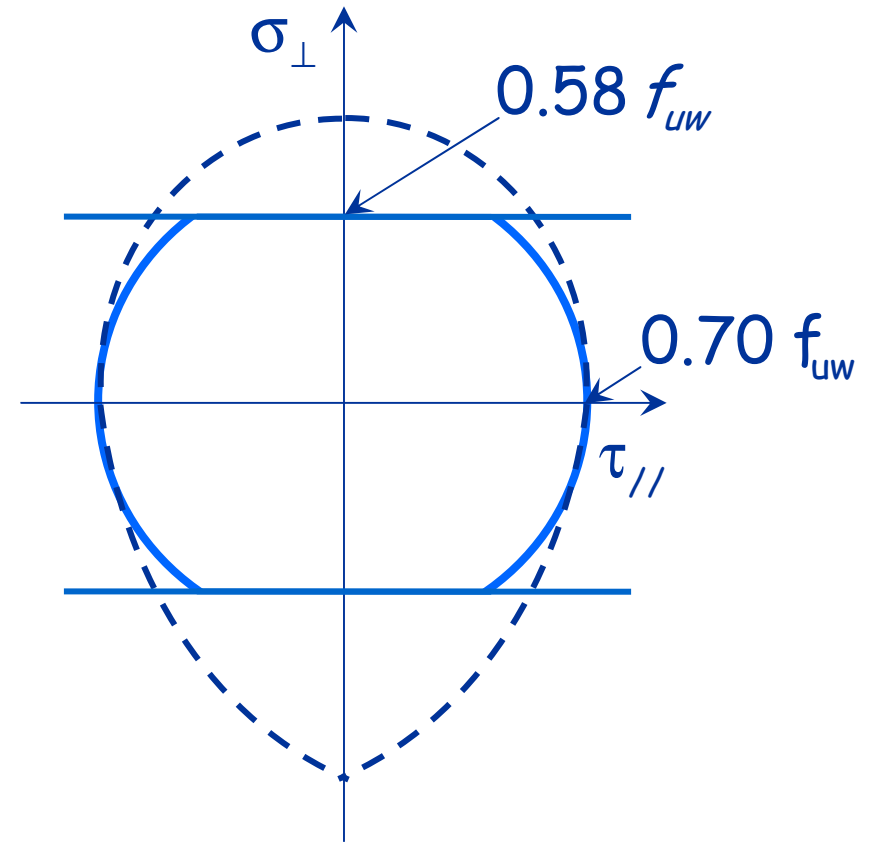
$$\tau \leq 0.58 f_{uw}$$

Domini di resistenza

Sfera mozza



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



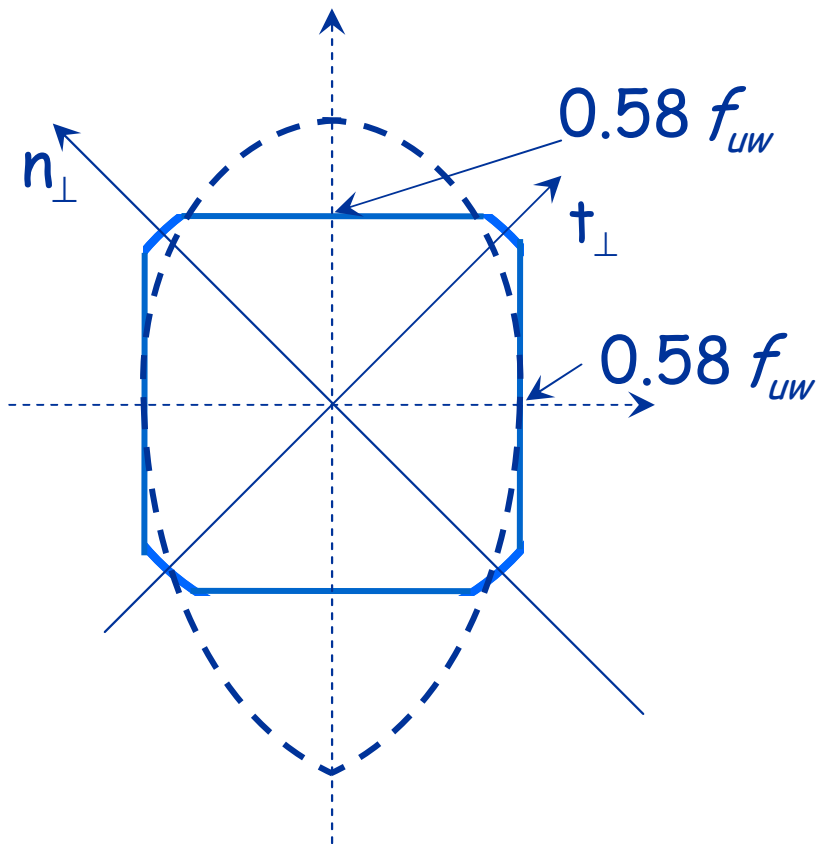
Inoltre ...

$$\sigma_{\perp} \leq 0.58 f_{uw}$$

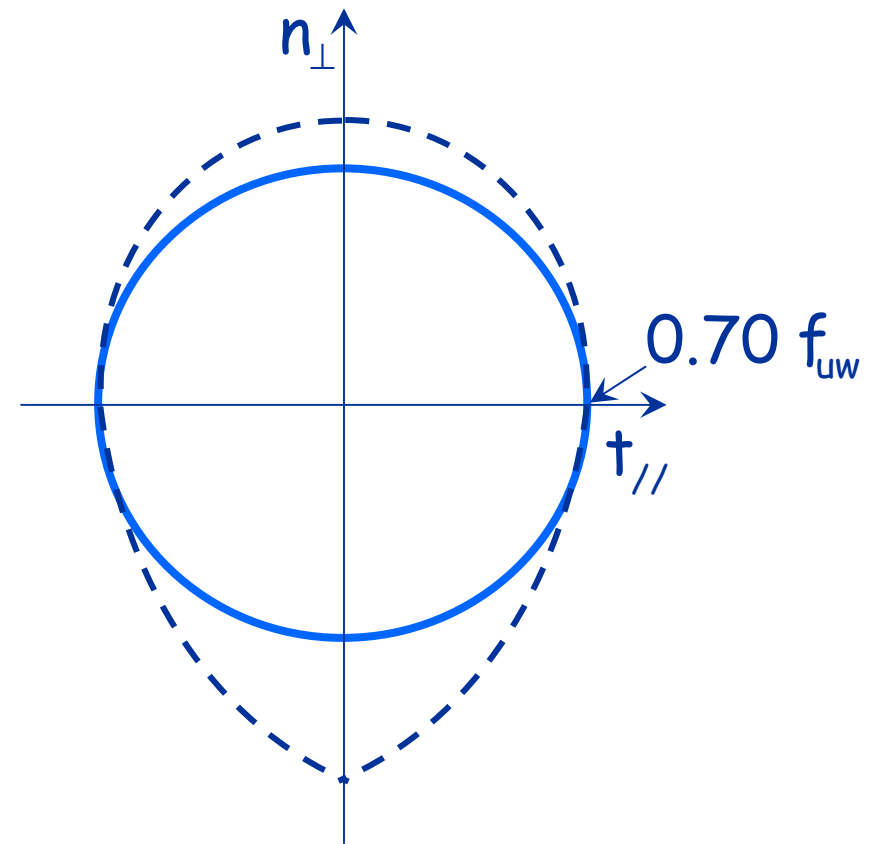
$$\tau_{\perp} \leq 0.58 f_{uw}$$

Domini di resistenza

Sfera mozza



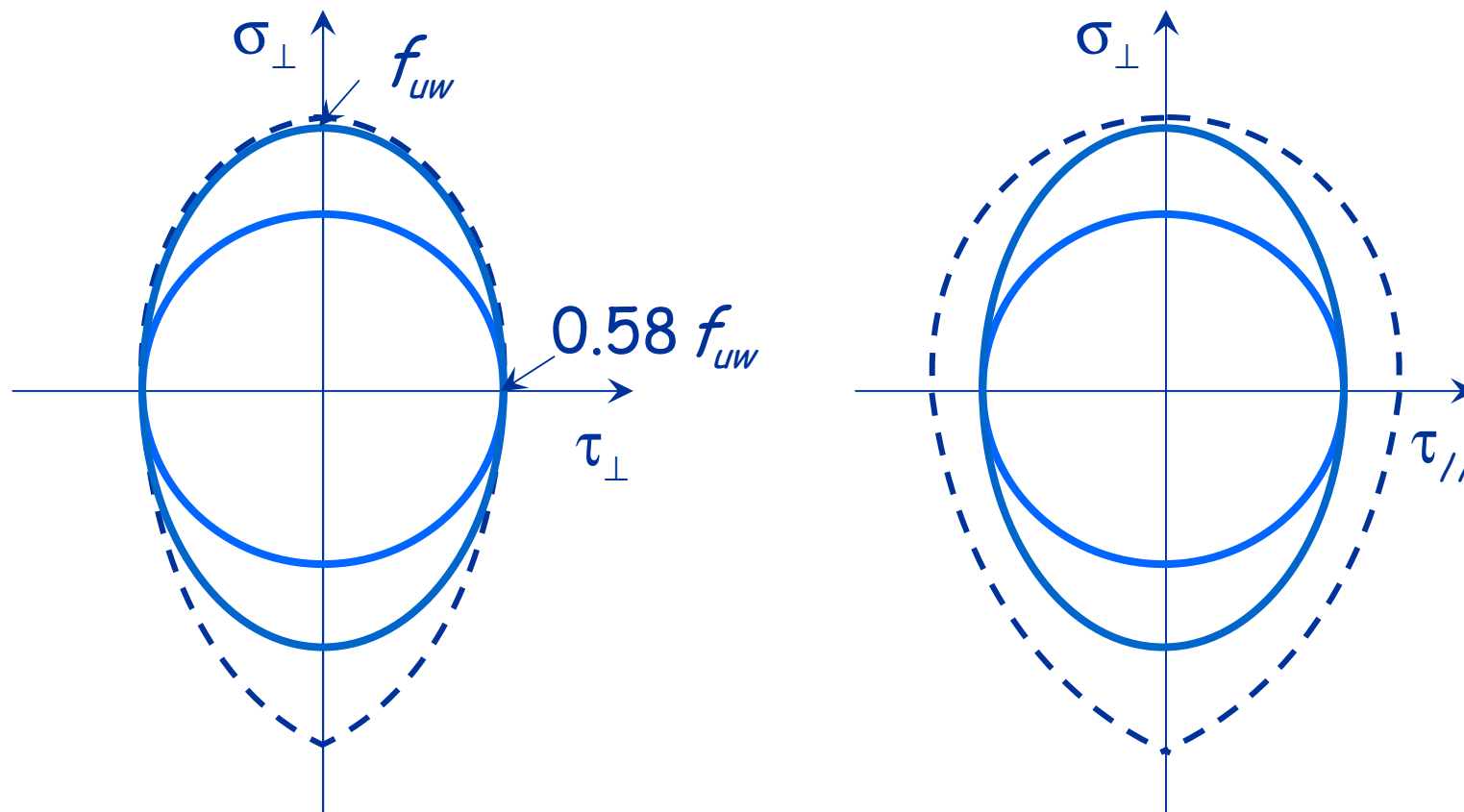
$$\frac{n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2 + t_{//}^2}{(0.70 f_{uw})^2} \leq 1$$



Inoltre ... $|n_{\perp}| + |t_{\perp}| \leq 0.58 \sqrt{2} f_{uw}$

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

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

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

$$t < f_{vw} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

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:

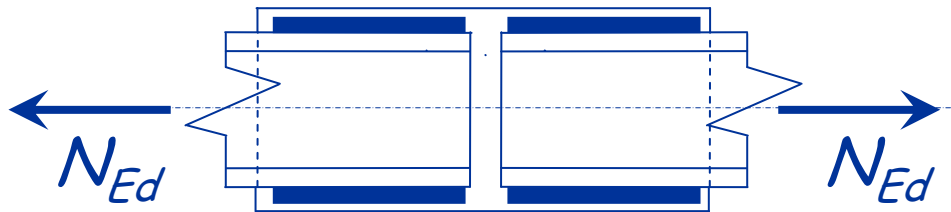
- deve essere pari almeno a 3 mm

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

Dati:



N_{Ed}
4 Cordon
(per lato)
Acciaio

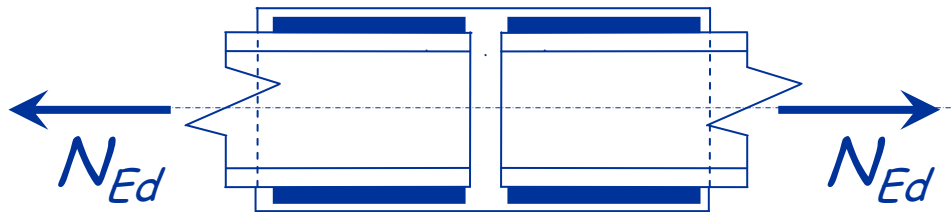
150 kN
 $a = 3 \text{ mm}$
 $L = 80 \text{ mm}$
S235

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

Dati:



N_{Ed}	150 kN
4 Cordon (per lato)	$a = 3 \text{ mm}$ $L = 80 \text{ mm}$
Acciaio	S235

2 - Verifica

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

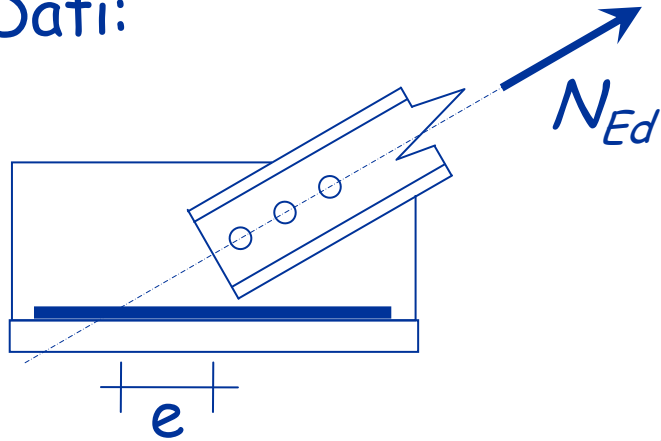
$$F_{v,Ed} < a L f_{vw,d} = \frac{3 \times 80 \times 207.8}{10^3} = 49.9 \text{ kN}$$

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

I cordoni sono verificati

Esempio

Dati:



2 - Verifica

N_{Ed}	200 kN
Eccentricità	$e = 25$ mm
2 Cordoni	$a = 5$ mm
	$L = 100$ mm
Acciaio	S235

Aggiungere esempio con forza eccentrica

Verifica di cordoni di saldatura con l'ellissoide di rotazione

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

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

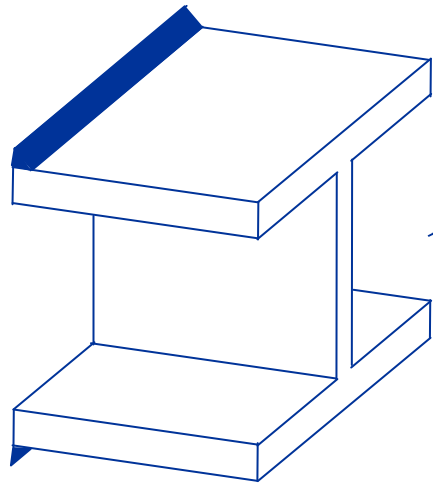
o in alternativa ...

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

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

Esempio

Dati:



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

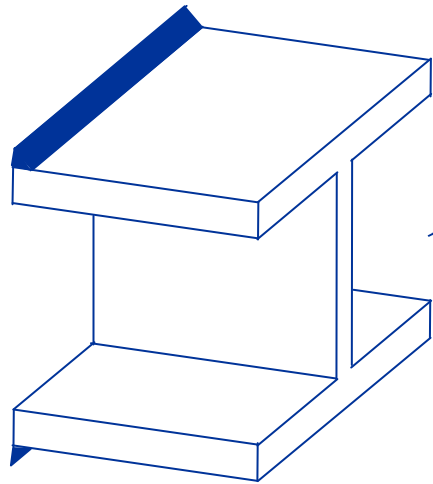
1 - Determinazione delle tensioni dovute al taglio

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

F_v Forza verticale applicata sul cordone per effetto del taglio

Esempio

Dati:



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

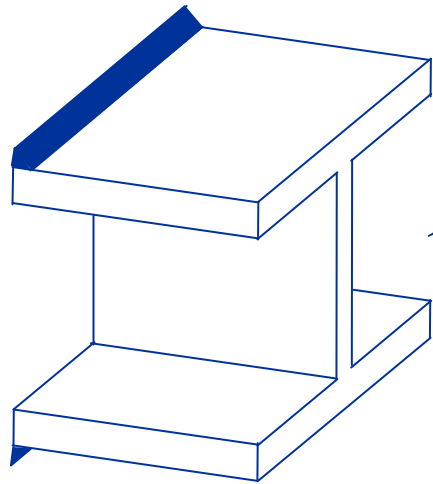
1 - Determinazione delle tensioni dovute al taglio

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

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

Esempio

Dati:



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

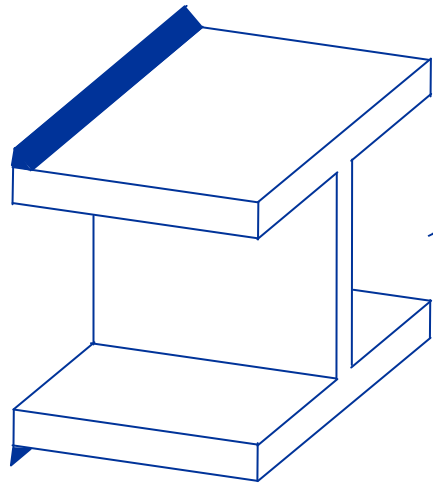
2 - Determinazione delle tensioni dovute al Momento

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

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	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

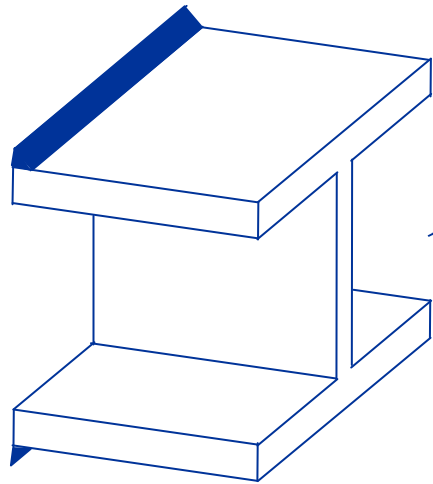
2 - Determinazione delle tensioni dovute al Momento

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

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

Esempio

Dati:



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

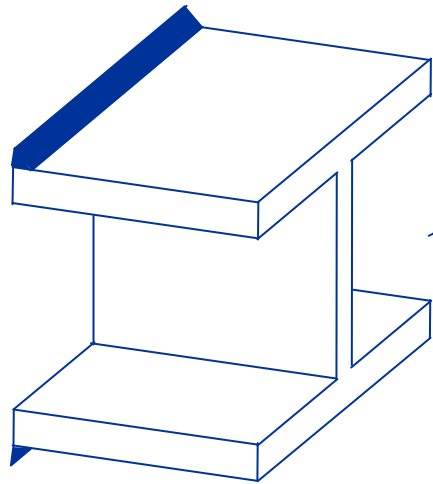
3 - Determinazione delle tensioni totali

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

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

Esempio

Dati:



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

4 - Verifica

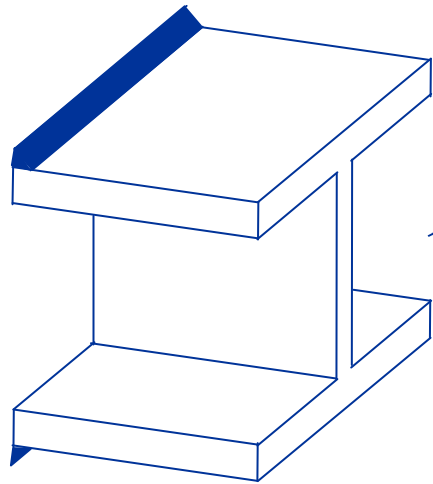
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2} = \sqrt{176.1^2 + 3 \times 130.3^2} = 286.3 \text{ MPa}$$

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

I cordoni sono verificati

Esempio

Dati:

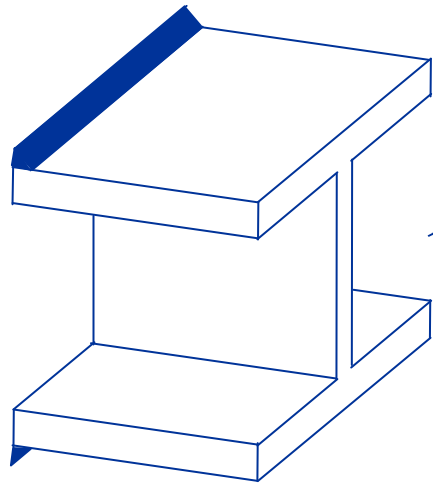


V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$
	$L = 180 \text{ mm}$

E se avessi eseguito la verifica con il dominio sferico?

Esempio

Dati:



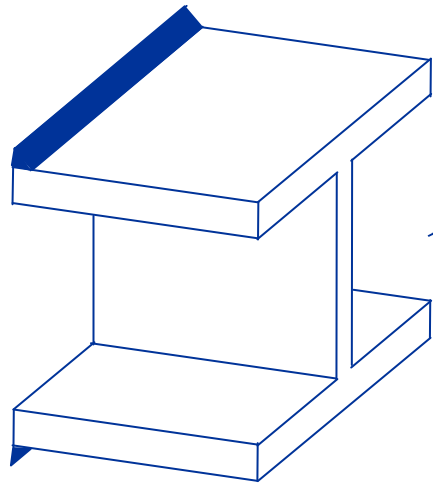
V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$
	$L = 180 \text{ mm}$

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

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

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

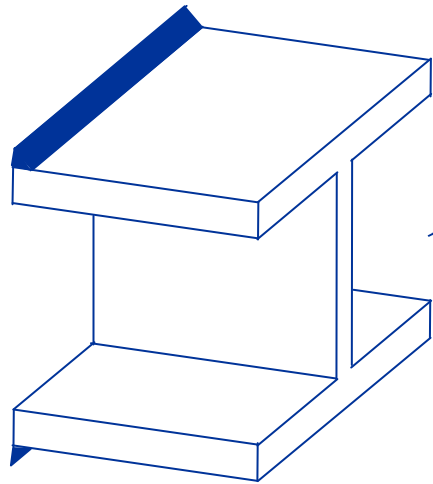
$$F_V = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ kN}$$

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

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

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:

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

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

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