

Corso di aggiornamento

Elementi strutturali e collegamenti in acciaio

10 - Classificazione dei collegamenti; collegamenti saldati

Villa Redenta, Spoleto

2-4 marzo 2017

Francesca Barbagallo

Classificazione dei collegamenti

- In base alla modalità di esecuzione:
 1. Collegamento saldati
 2. Collegamenti bullonati

Resistenze da usare

- Sempre i valori ultimi (non quelli di snervamento)

Saldature:

si dovrebbe usare f_{uw} (resistenza della saldatura);
per comodità la si riporta a f_u del materiale base

Bulloni: f_{ub}

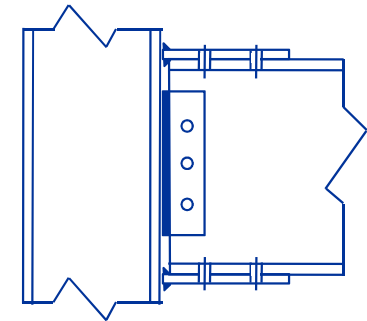
Classificazione dei collegamenti

- In base all'azione che si trasmette
 1. Collegamento a parziale ripristino di resistenza
In grado di trasmettere le caratteristiche di sollecitazione di progetto
 2. Collegamento a completo ripristino di resistenza
In grado di trasmettere le caratteristiche di sollecitazione ultime del meno resistente tra gli elementi collegati

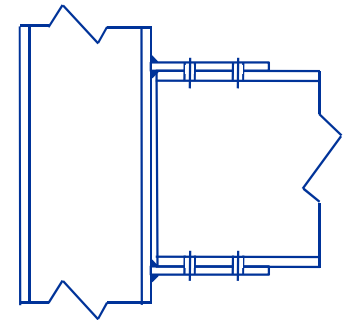
Classificazione dei collegamenti

- In base alla rigidezza
con riferimento alla rotazione relativa tra i pezzi uniti

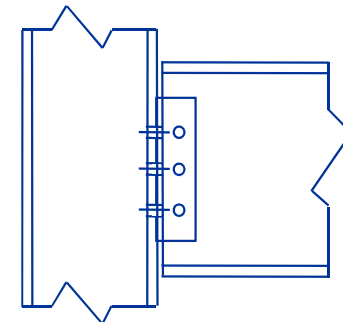
1. Collegamento rigido
la rotazione relativa è praticamente nulla



2. Collegamento semirigido
la rotazione relativa è legata al momento
flettente;
equivale ad una molla rotazionale



3. Collegamento a cerniera
la rotazione relativa è sostanzialmente
consentita



Collegamenti saldati

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

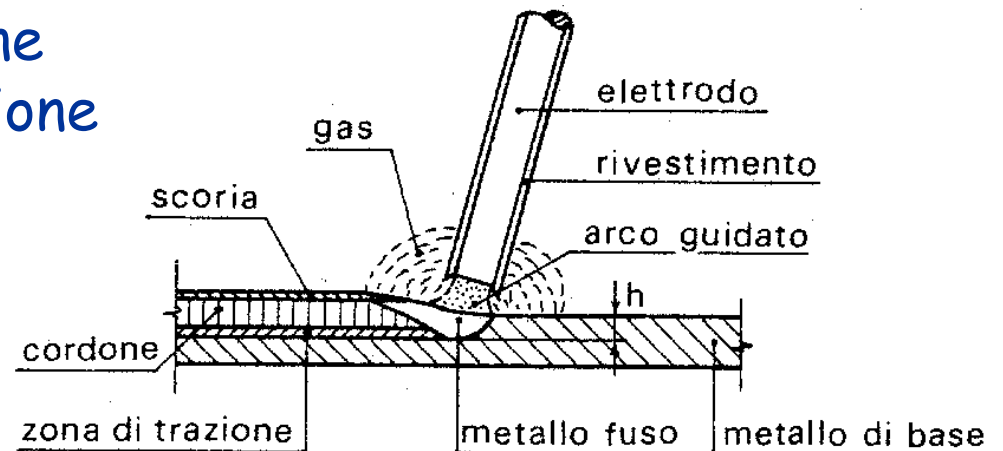
- reazione tra acetilene ed ossigeno ($C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$)
con produzione di gas riducenti e calore
- materiale di apporto sotto forma di bacchetta metallica

Procedimenti di saldatura

- Procedimenti di saldatura manuali
Saldatura ossiacetilenica

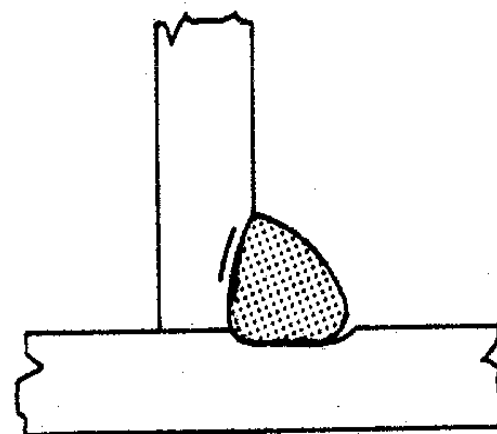
Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti

- 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



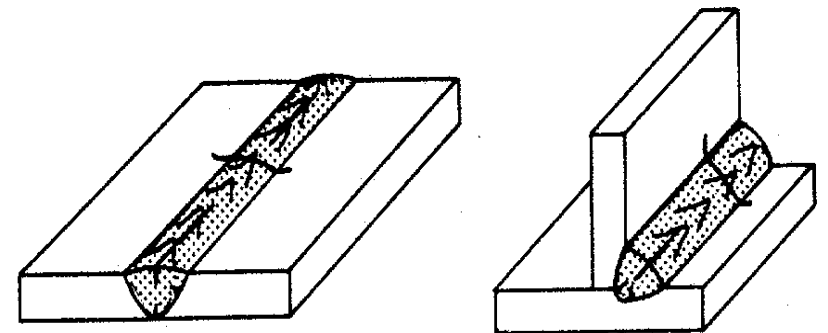
Difetti di saldatura

- 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



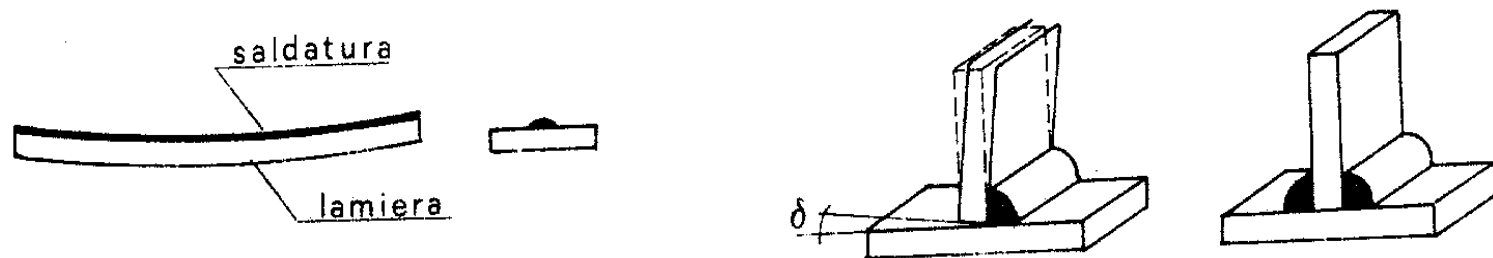
Difetti di saldatura

- 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









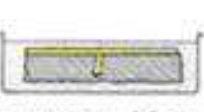

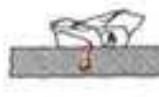
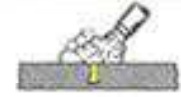







Difetti di saldatura

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

Controlli delle saldature

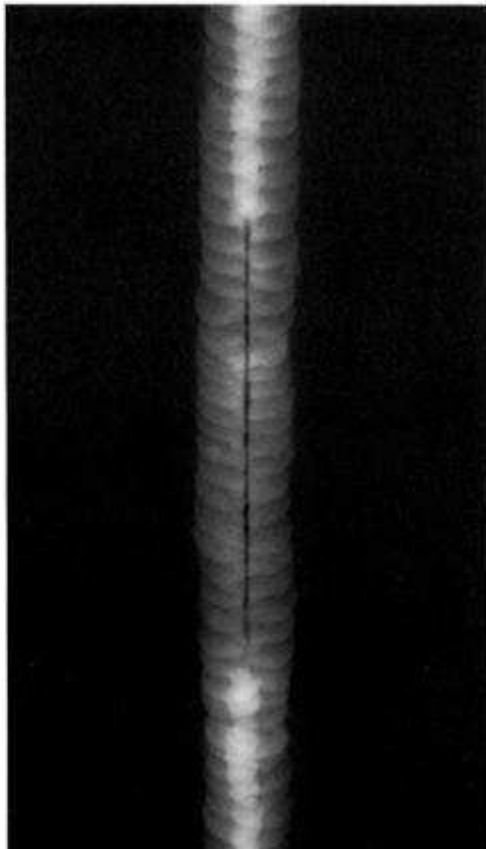
Esame con liquidi penetranti

1 PULIZIA PRELIMINARE <ul style="list-style-type: none"> • Elite BC1 • MET-L-CHEK solvente ES9A • SHERWIN solvente DR62 • NDT detergente Elite D01A-1 • Sabbatura con Plastic Media 	1.1  <p>solventi BC1/ES9A/DR62 spray a rapida evaporazione</p>	1.2  <p>Detergente Elite D01A-1 a caldo</p>	1.3  <p>Sabbatura con Plastic Media</p>
2 APPLICAZIONE DEL PENETRANTE <ul style="list-style-type: none"> • Elite K71B2 • MET-L-CHEK VP30 rosso • SHERWIN DP51 rosso (I liquidi penetranti fluorescenti sono elencati nella relativa scheda) 	 <p>spray</p>	 <p>penello</p>	 <p>per immersione</p>
3 RIMOZIONE DEL PENETRANTE <ul style="list-style-type: none"> • Elite Bio Solvent BC1 • MET-L-CHEK solvente ES9A • SHERWIN solvente DR62 (Per gli emulsificanti vedi schede "Penetranti fluorescenti") 	3.1  <p>con acqua (+ luce UV per fluorescenti)</p>	3.2  <p>manuale con solventi ES9A/DR62 a rapida evaporazione</p>	3.3  <p>immersione in emulsificante (per tipo post-emulsionante)</p>
4 ASCIUGATURA	 <p>in aria libera o aria compressa</p>	 <p>con stracci</p>	 <p>con aria calda</p>
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 (Per sviluppatore a secco e base acqua vedi schede "Penetranti fluorescenti") 	5.1  <p>spray</p>	5.2  <p>per immersione</p>	5.3  <p>a secco (per fluorescenti)</p>
6 ISPEZIONE <p>(Pulizia finale e protezione superficiale se richieste)</p>	 <p>visiva</p>	 <p>sotto luce UV per fluorescenti</p>	DIFETTI RILEVABILI <ul style="list-style-type: none"> — cricca a freddo — cricca di solidificazione — cricca da fatica — grande cricca — poro — porosità — cricca da erosione (erosione)

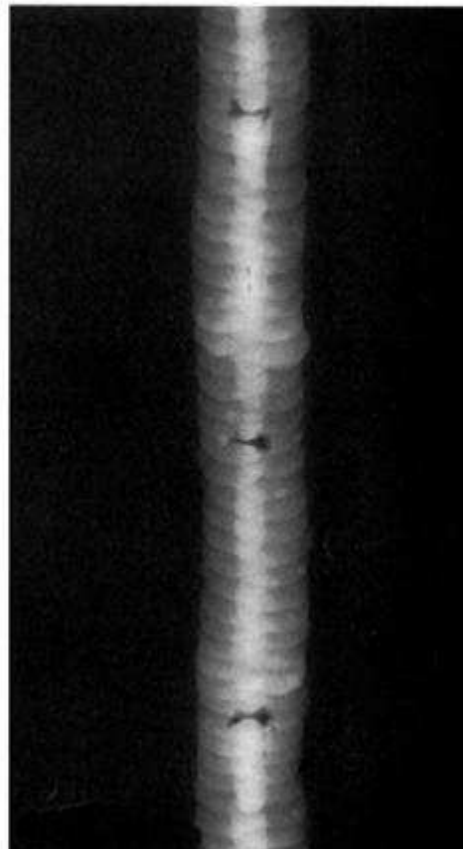
Controlli delle saldature

Esame radiografico

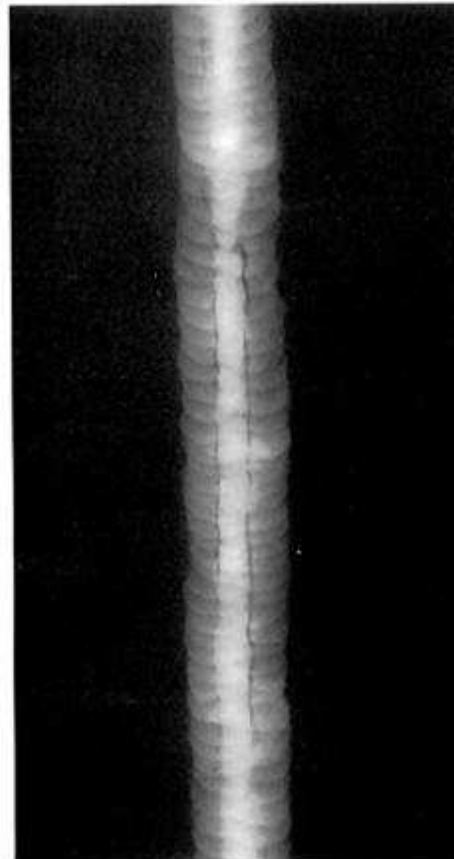
Parziale
penetrazione



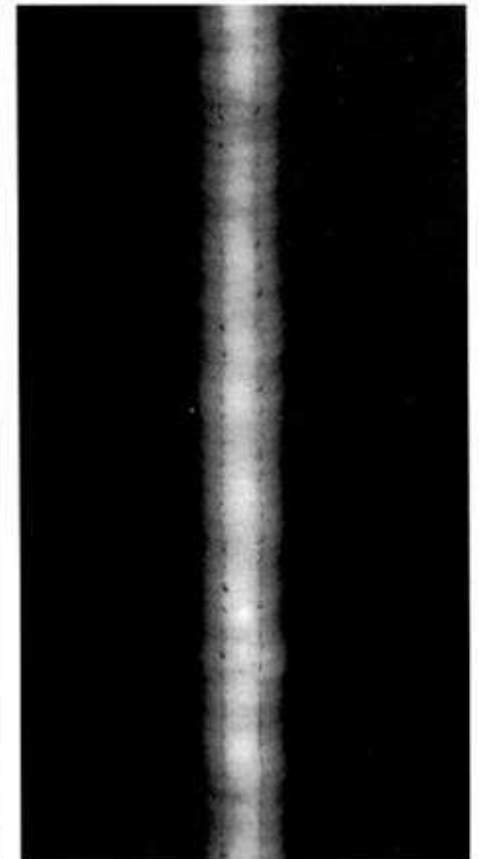
Impurità incluse
all'interno



Impurità in
superficie

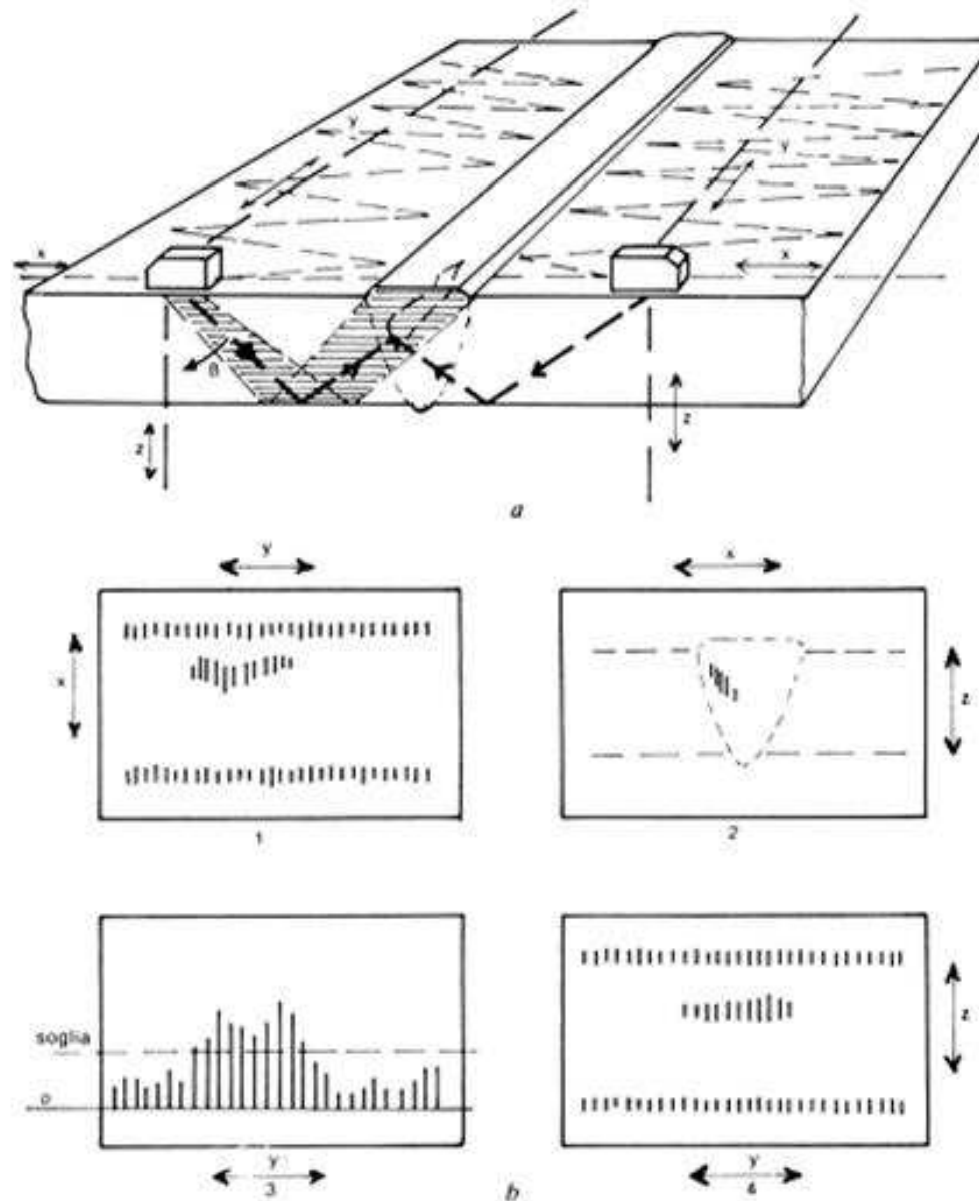


Presenza di vuoti



Controlli delle saldature

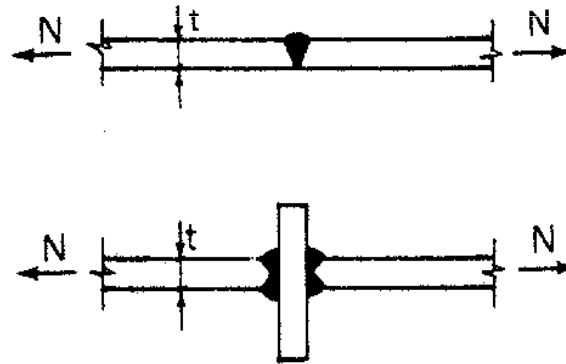
Esame ad ultrasuoni



Collegamenti saldati

Classificazione

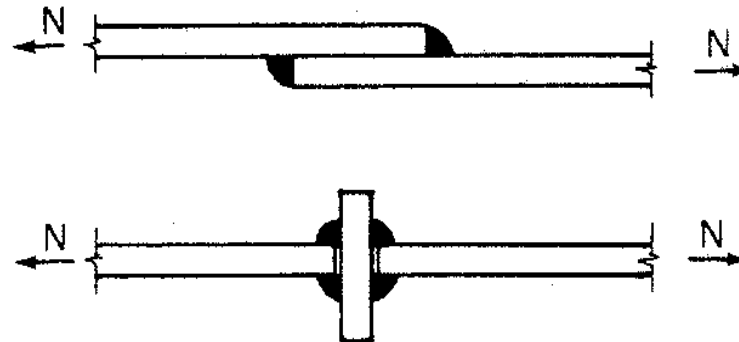
1. Saldature a completa penetrazione



Se rimangono tratti non collegati:

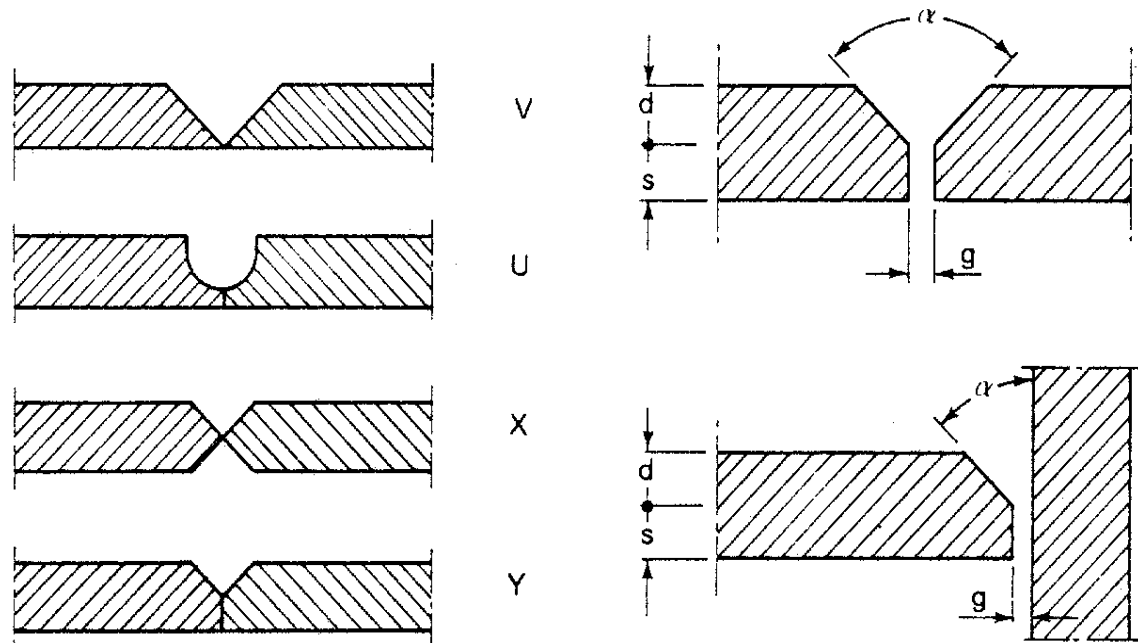
saldatura a parziale penetrazione (considerata come cordone d'angolo)

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

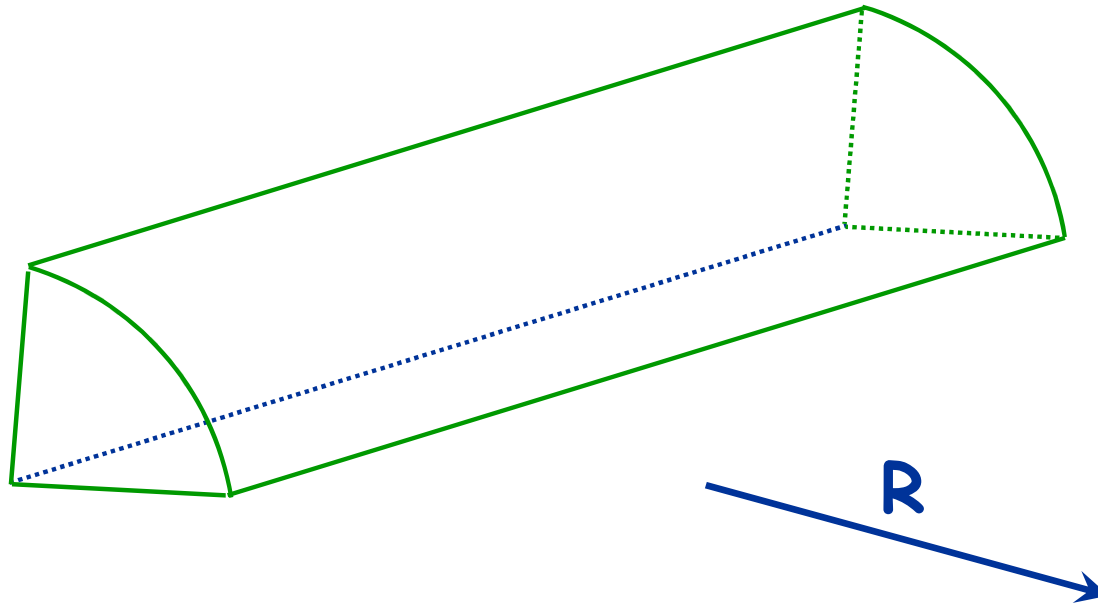
- Viene perfettamente ripristinata la continuità del materiale
- La resistenza della saldatura è almeno pari a quella dei pezzi che unisce
- In genere non è necessaria una verifica specifica

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

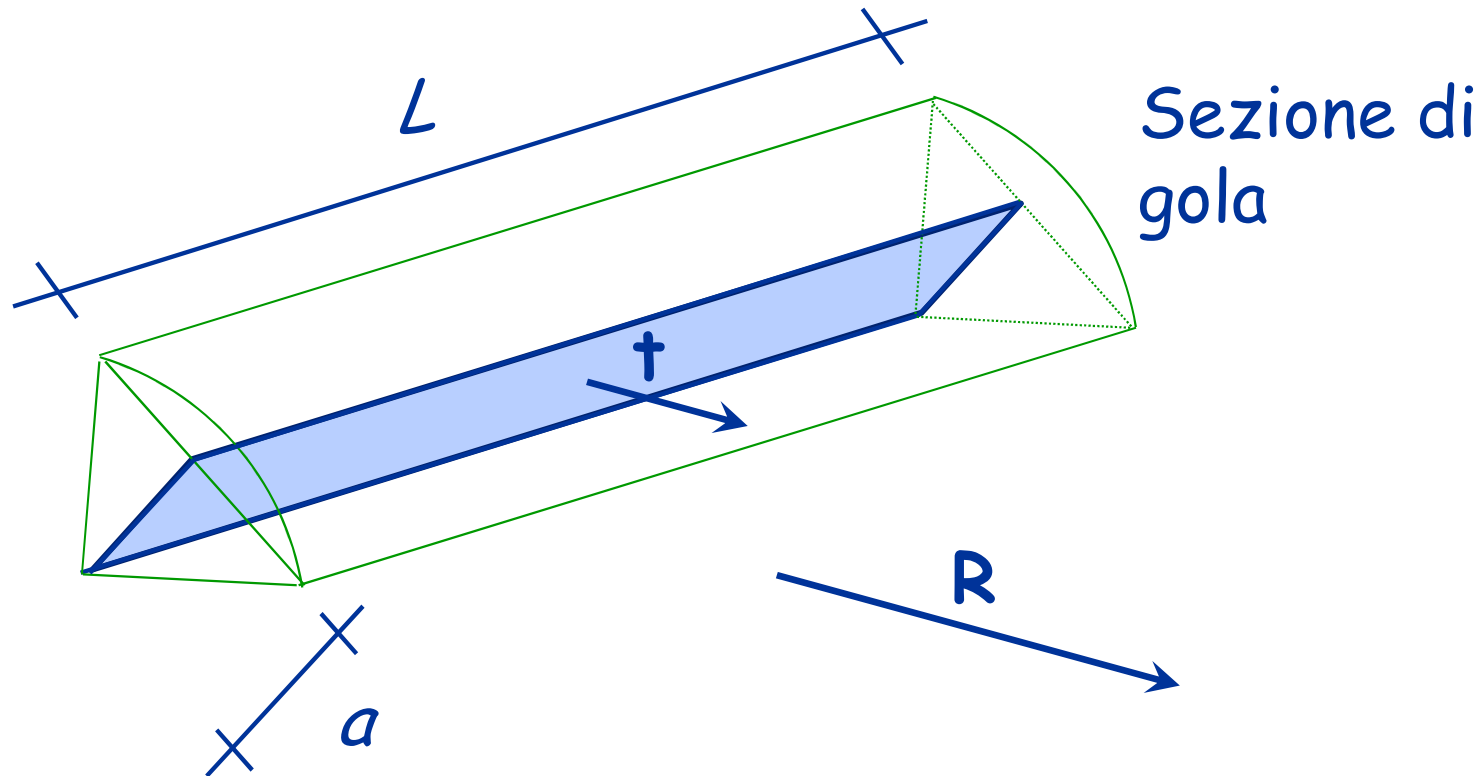


R

Forza agente sul cordone d'angolo

Saldatura a cordoni d'angolo

Resistenza dei cordoni di saldatura



R

Forza agente sul cordone d'angolo

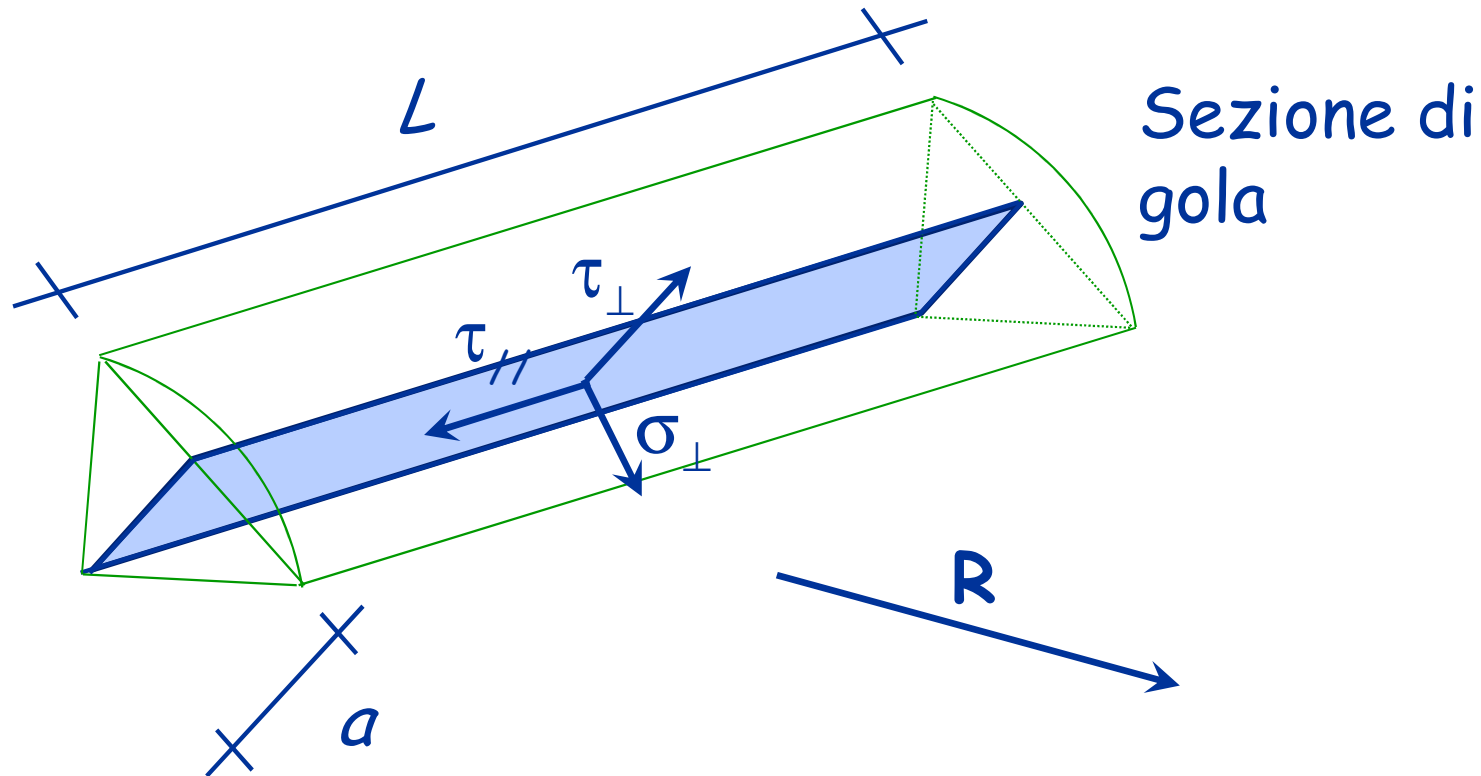
t

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*

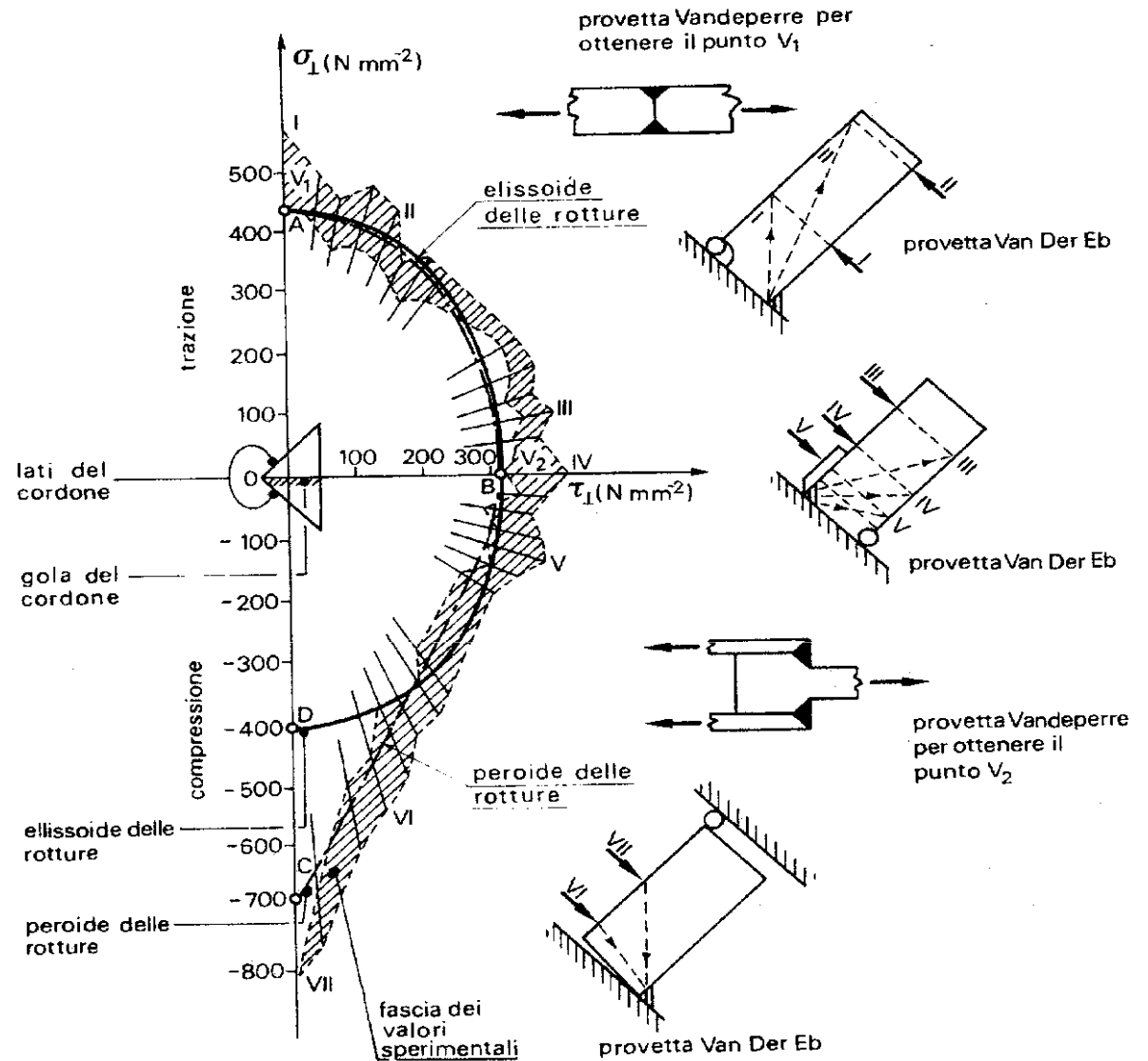
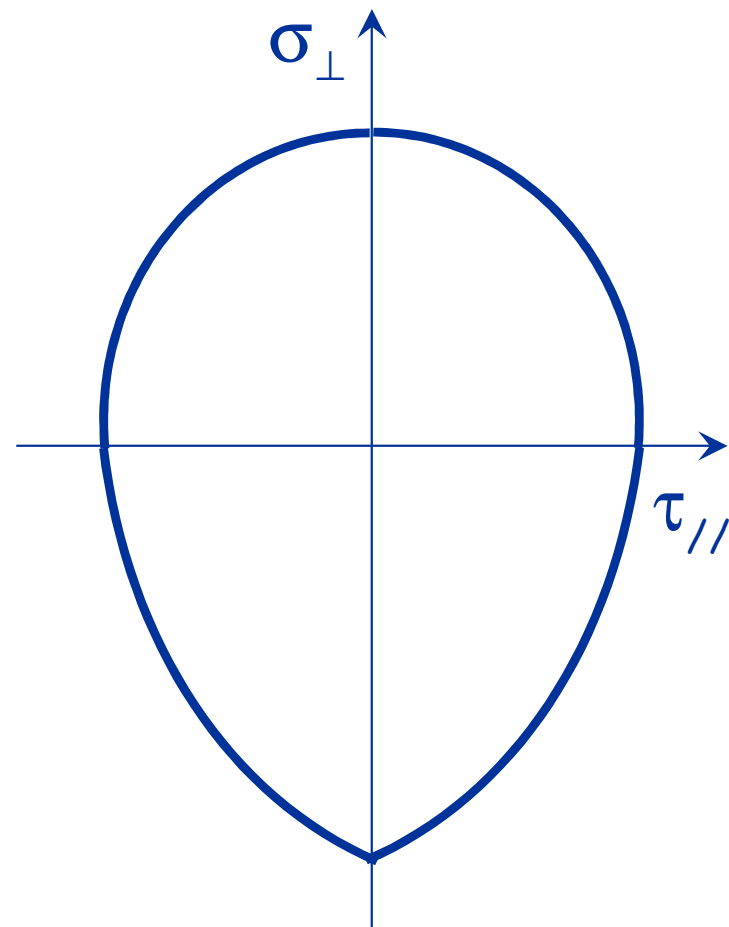
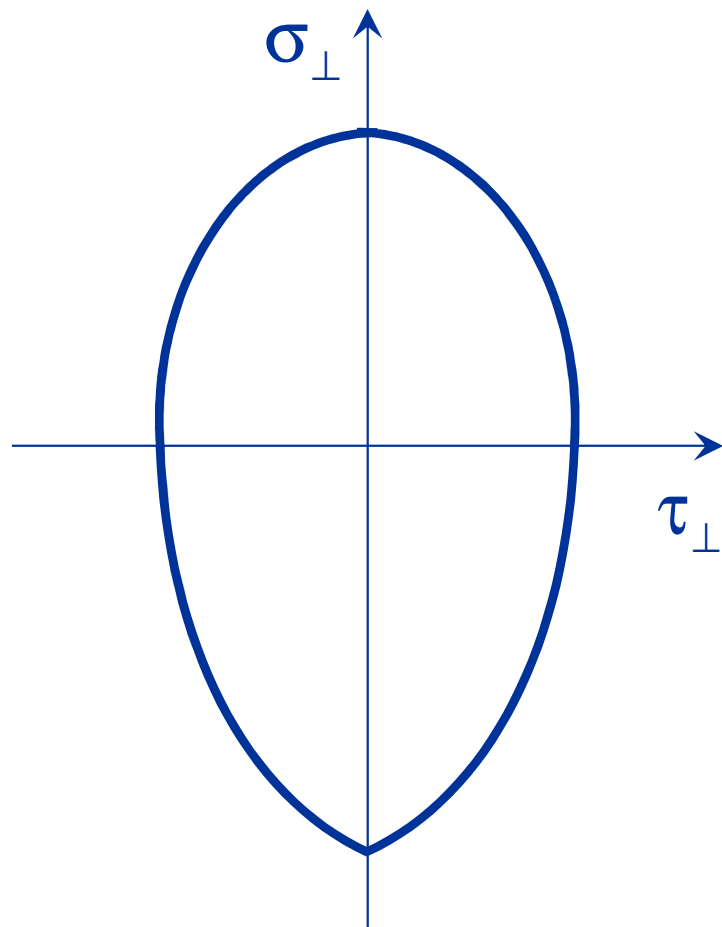


Figura tratta Da Ballio, Mazzolani. Strutture in acciaio

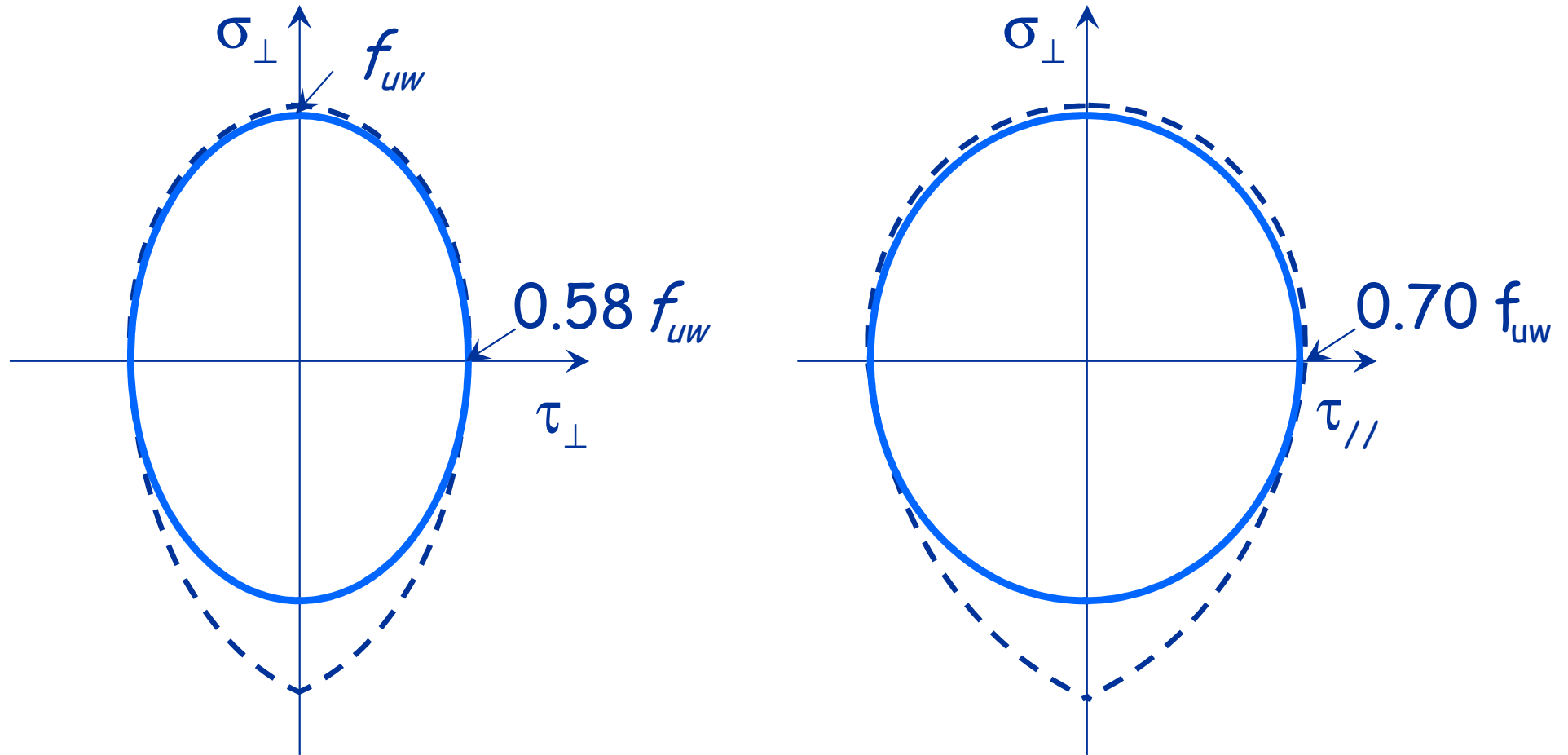
Dominio di resistenza sperimentale

Peroide



Domini di resistenza analitici

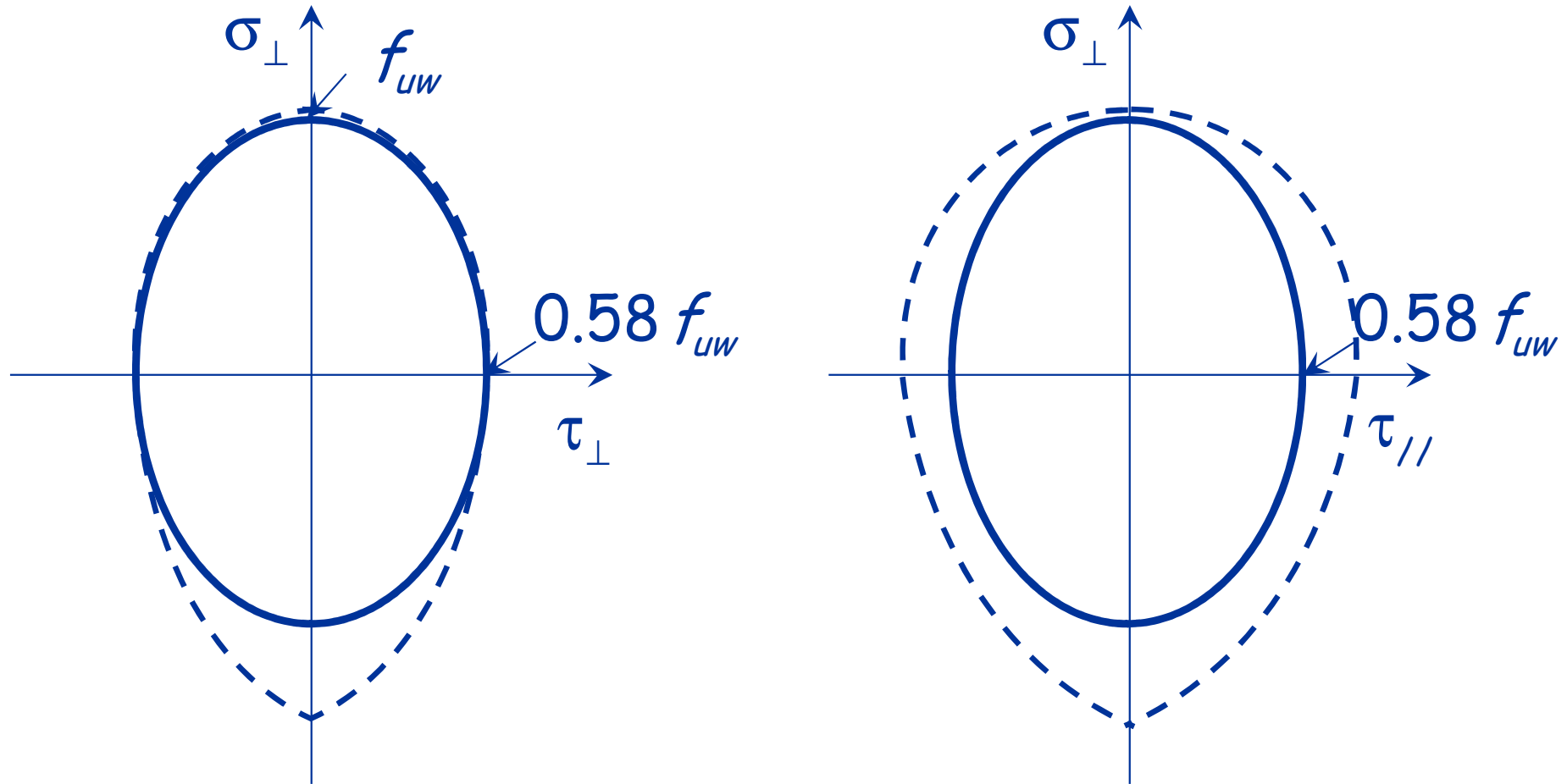
Ellissoide



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

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

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

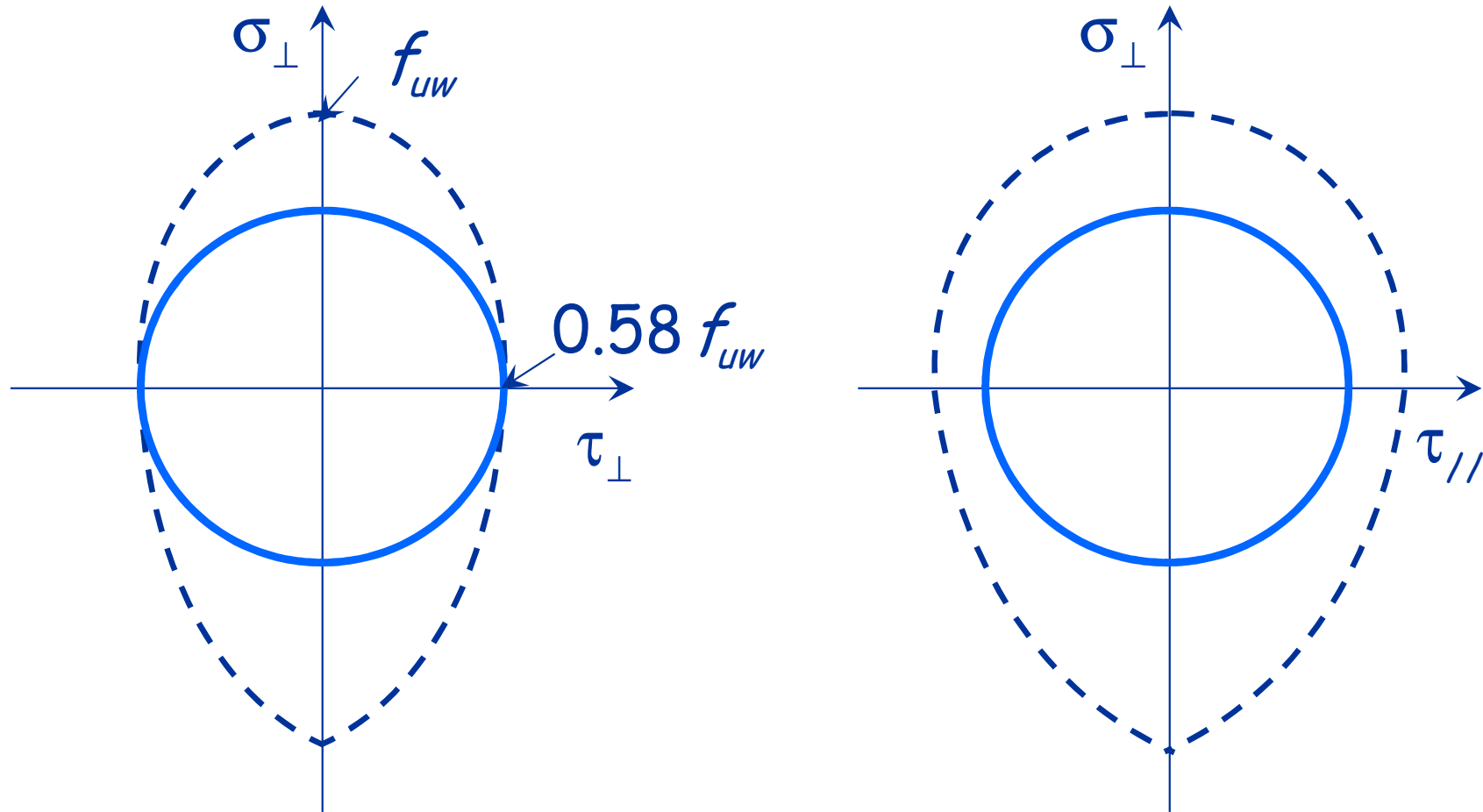
$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{f_{uw}^2} + \frac{\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2}{(0.58 f_{uw})^2} \leq 1$$

Svantaggio:

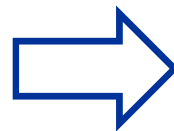
Bisogna calcolare le componenti della tensione t rispetto al sistema di riferimento della sezione di gola σ_{\perp} , τ_{\perp} e $\tau_{//}$

Domini di resistenza

Dominio sferico



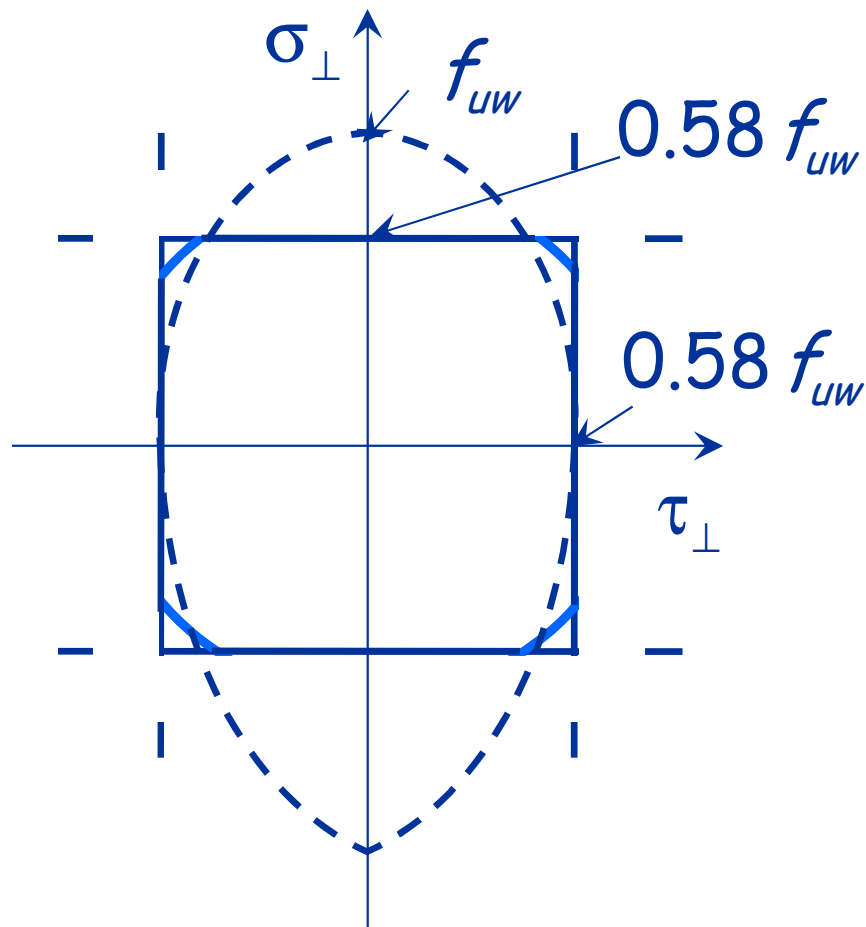
$$\frac{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2}{(0.58 f_{uw})^2} \leq 1$$



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

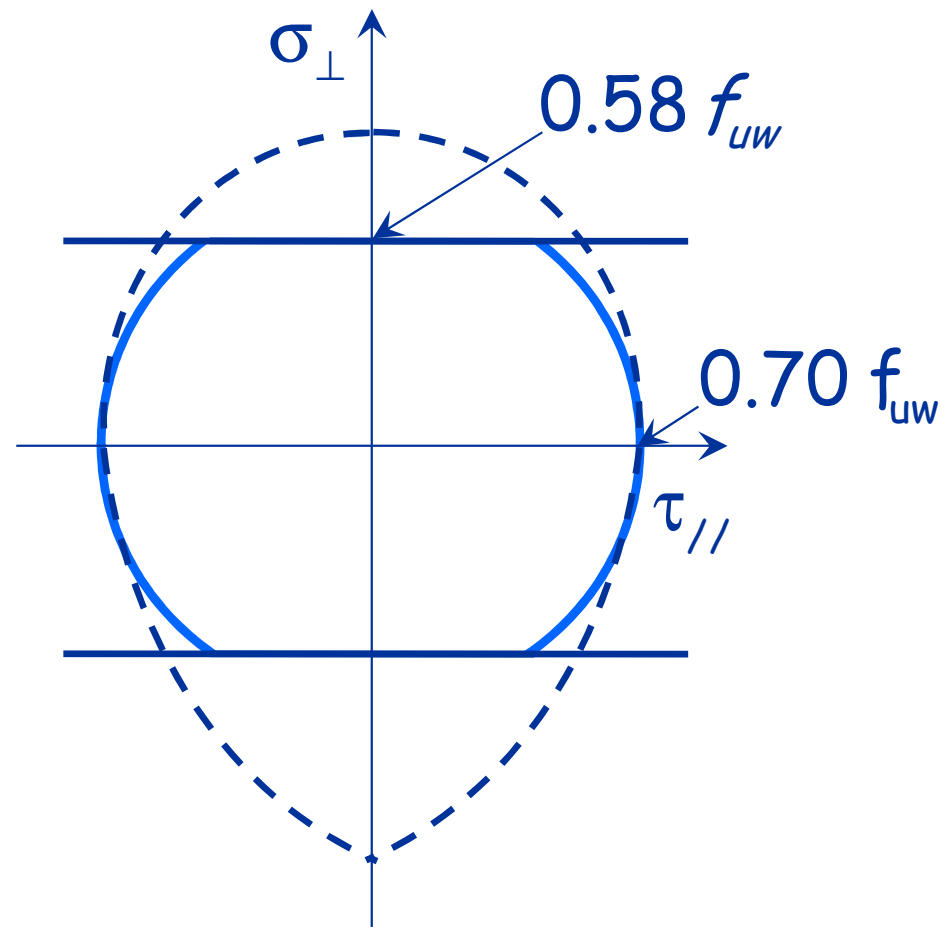
Domini di resistenza

Sfera mozza



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

Inoltre ...

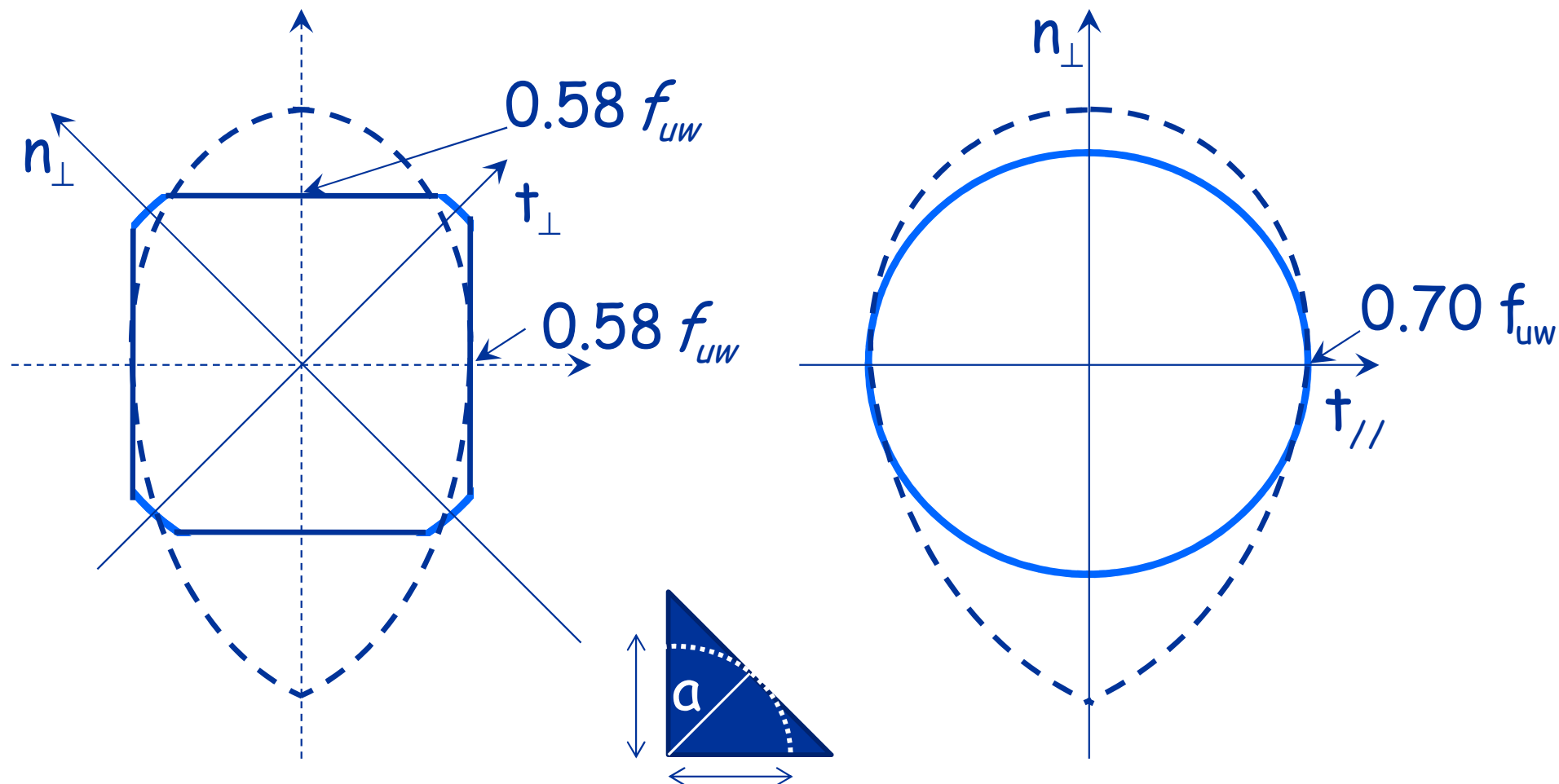


$$\sigma_{\perp} \leq 0.58 f_{uw}$$

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

Domini di resistenza

Sfera mozza

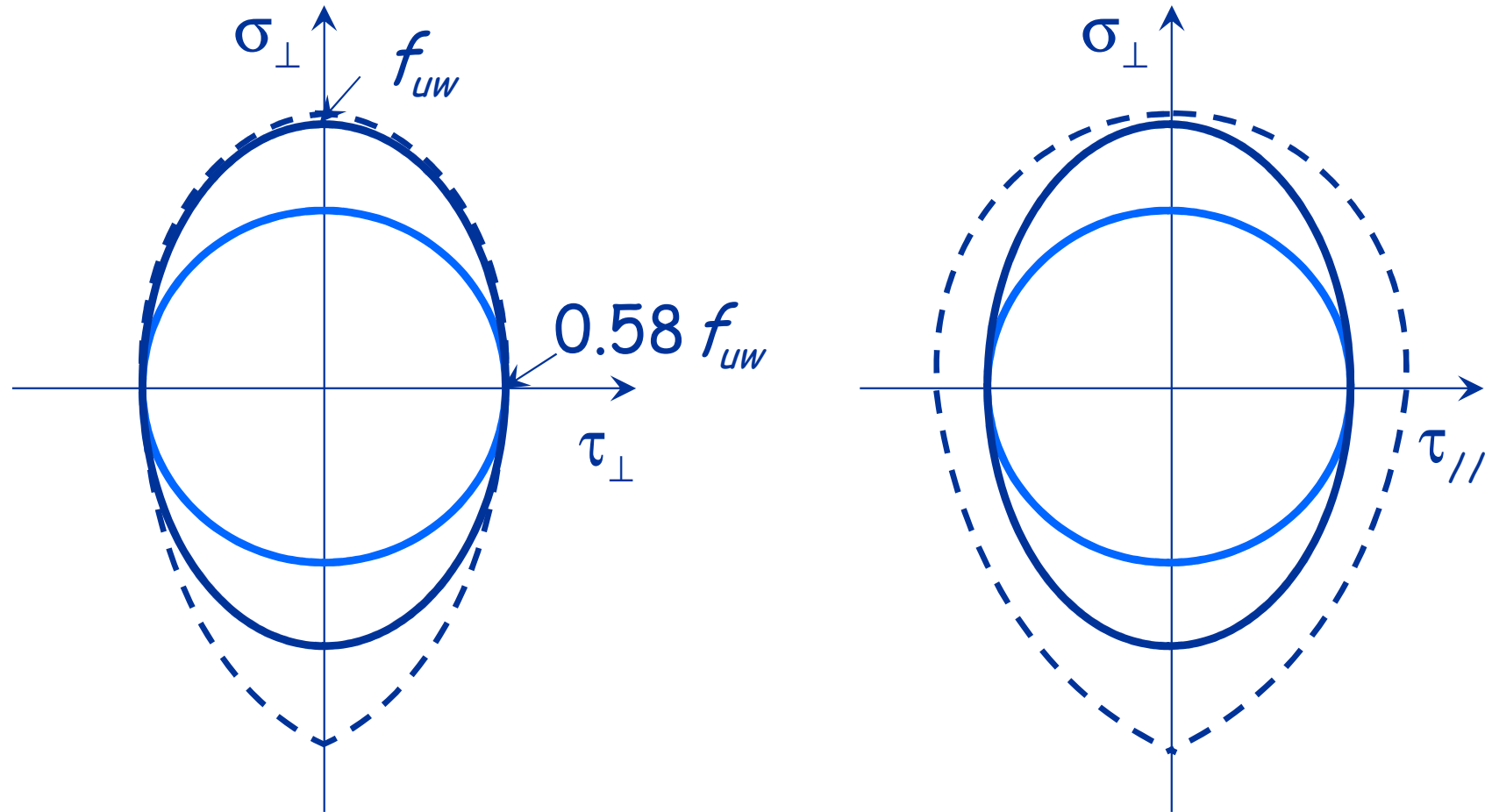


$$\frac{n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2 + t_{//}^2}{(0.70 f_{uw})^2} \leq 1$$

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

Saldatura a cordoni d'angolo

Resistenza dei cordoni di saldatura



Sia l'EC3 che le NTC08 propongono due domini:
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

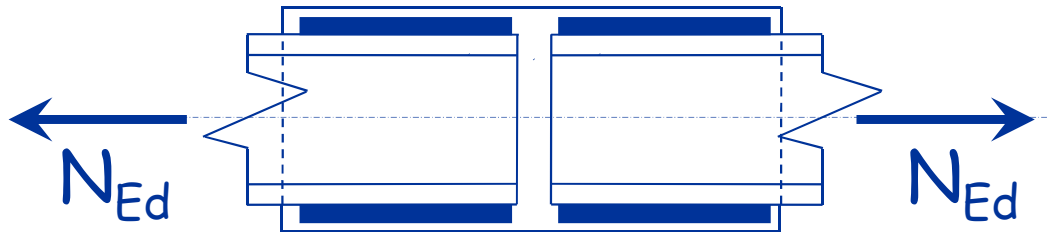
Lunghezza efficace:

- 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

coppie di profili a U saldati a un piatto

Dati:



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

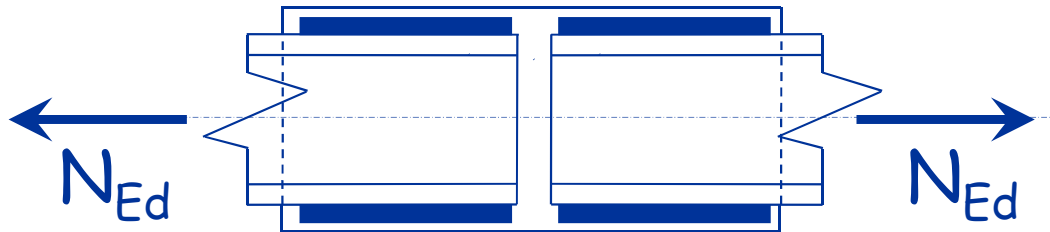
1 - Determinazione di $f_{vw,d}$

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

Esempio

coppie di profili a U saldati a un piatto

Dati:



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

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 ...

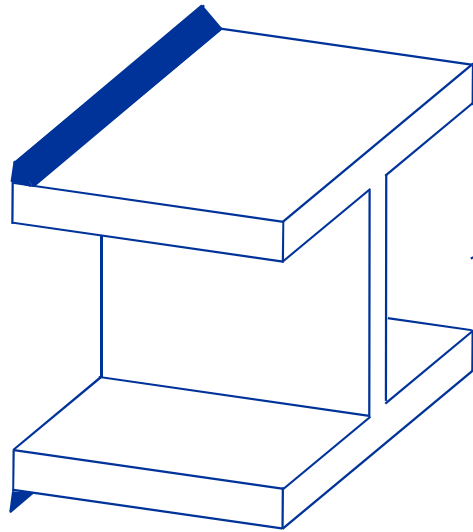
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq f_{uw} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

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

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

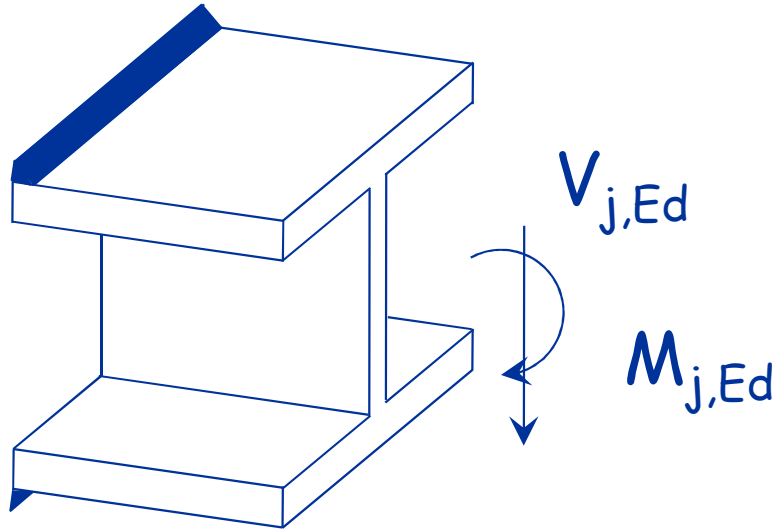
$$F_V = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ kN}$$

F_V Forza verticale applicata sul cordone per effetto del taglio

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

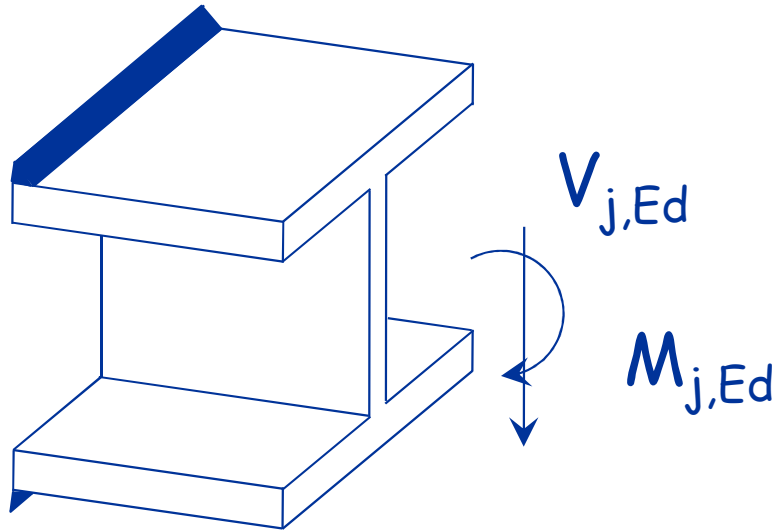
$$\sigma_{\perp}^V = \frac{F_V \cos(45^\circ)}{a L} = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{2} \times 6 \times 180} = 22.9 \text{ MPa}$$

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

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

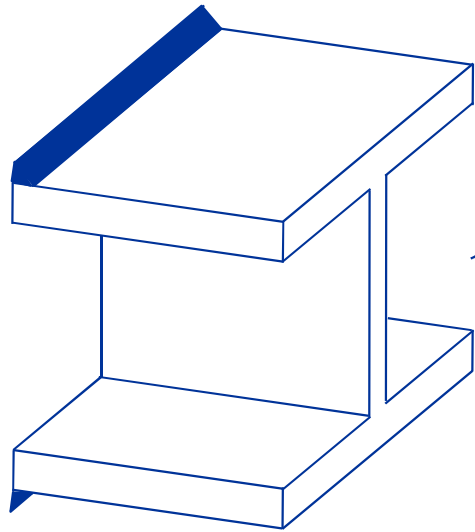
$$F_M = \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{40}{0.171} = 233.9 \text{ kN}$$

F_M Forza orizzontale applicata sul cordone per effetto del momento flettente

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

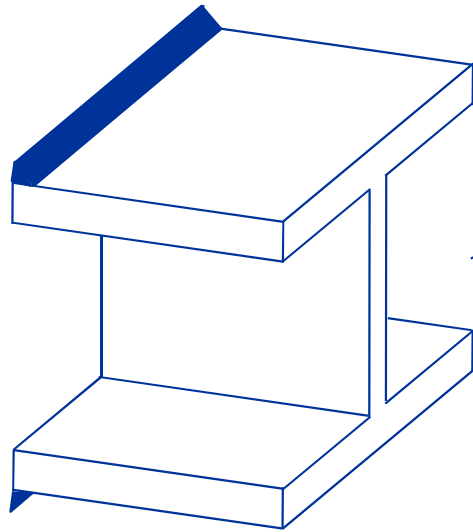
$$\sigma_{\perp}^M = \frac{F_M \sin(45^\circ)}{a L} = \frac{233.9 \times 10^3}{\sqrt{2} \times 6 \times 180} = 153.2 \text{ MPa}$$

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

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

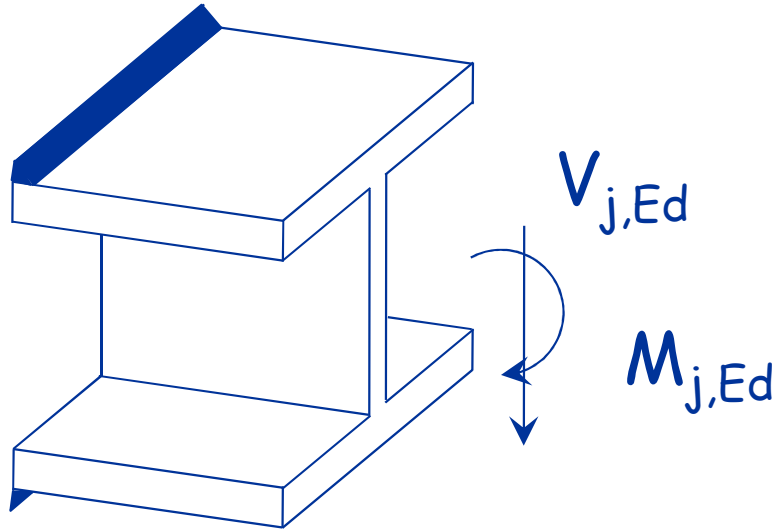
$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\perp}^V + \sigma_{\perp}^M = 22.9 + 153.2 = 176.1 \text{ MPa}$$

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

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

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

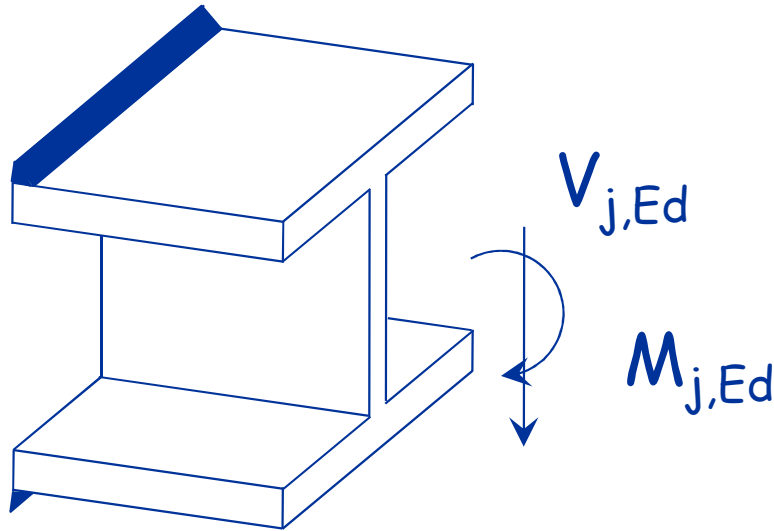
$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0.8 \times 1.25} = 360 \text{ MPa}$$

I cordoni sono verificati

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

Dati:



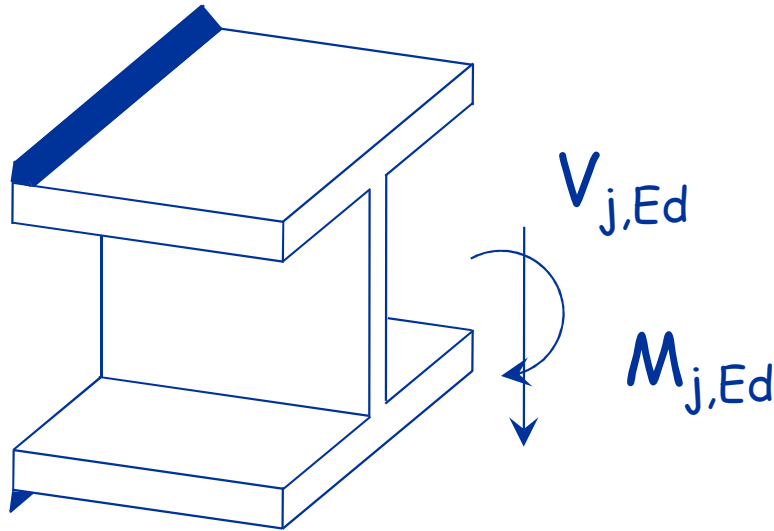
V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$
	$L = 180 \text{ mm}$

E se avessi eseguito la verifica con il dominio sferico?

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

Dati:



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

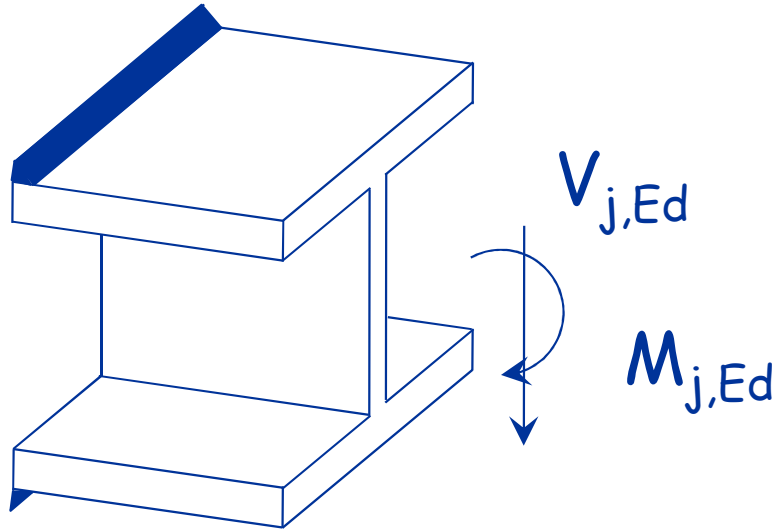
1 - Determinazione di $f_{vw,d}$

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

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

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

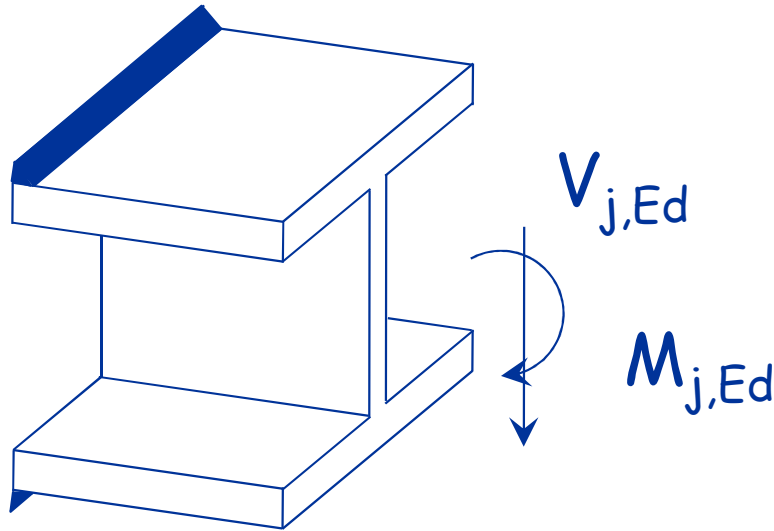
$$F_M = \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{40}{0.171} = 233.9 \text{ kN}$$

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

Esempio

profilo HE con ali saldate a un piatto

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

NTC08, punto 4.2.8.2.1