

Lezione

TECNICA DELLE COSTRUZIONI

Prof. Pier Paolo Rossi

Università degli Studi di Catania

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

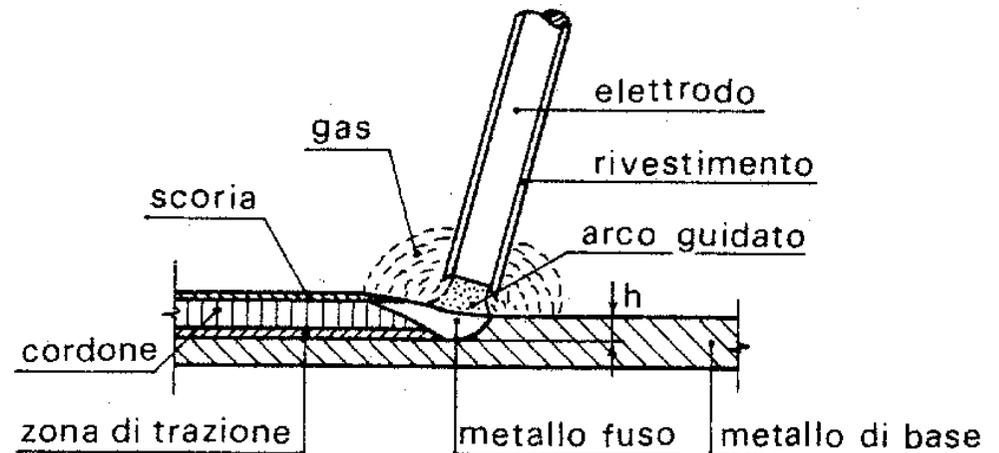
Procedimenti di saldatura

- **Procedimenti di saldatura manuali**

Saldatura ossiacetilenica

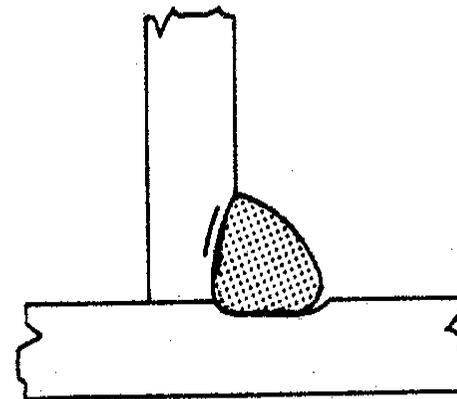
Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti

- 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



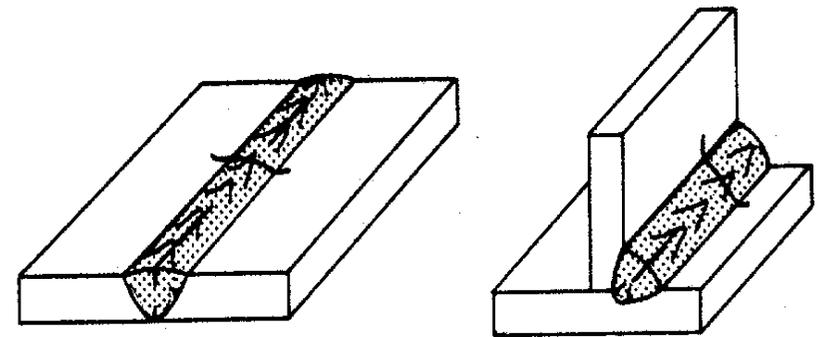
Difetti di saldatura

- 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 tempra
 - la prevenzione da questo fenomeno può ottenersi con un preriscaldamento del pezzo, facendo più passate di saldatura ed utilizzando elettrodi con rivestimento basico



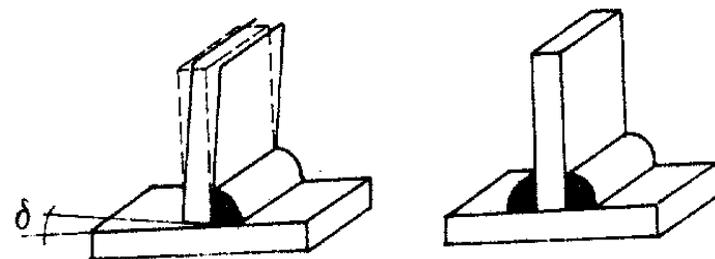
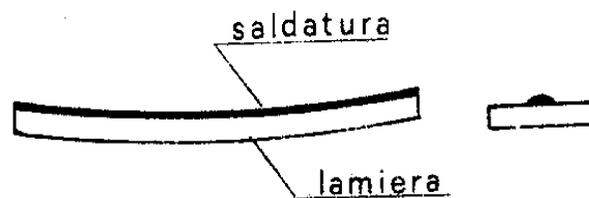
Difetti di saldatura

- 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

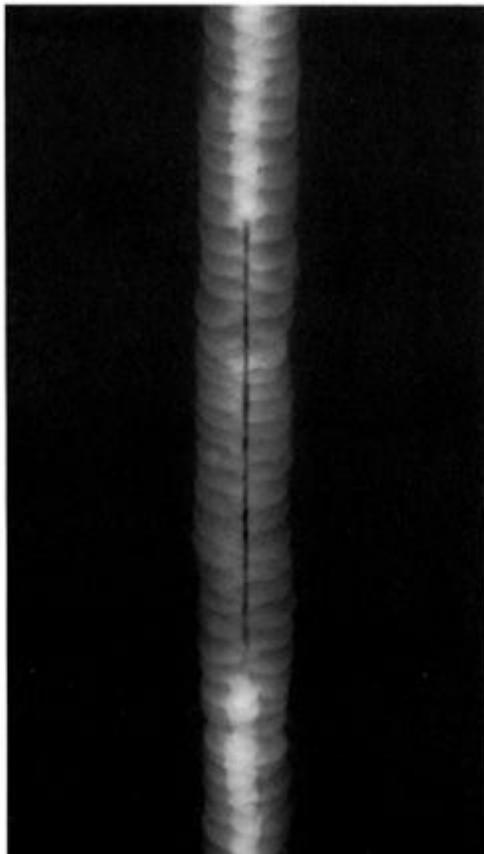
Esame con liquidi penetranti

<p>1 PULIZIA PRELIMINARE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elite BC1 • MET-L-CHEK solvente E59A • SHERWIN solvente DR62 • NDT detergente Elite 901A-1 • Sabbiettura con Plastic Media 	<p>1.1</p>  <p>solventi BC 1/E59A/DR62 spray a rapida evaporazione</p>	<p>1.2</p>  <p>Detergente Elite 901A-1 a caldo</p>	<p>1.3</p>  <p>Sabbiettura con Plastic Media</p>
<p>2 APPLICAZIONE DEL PENETRANTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elite K71B2 • MET-L-CHEK VP30 rosso • SHERWIN DPS1 rosso (I liquidi penetranti fluorescenti sono elencati nella relativa scheda) 	<p>spray</p> 	<p>penello</p> 	<p>per immersione</p> 
<p>3 RIMOZIONE DEL PENETRANTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elite Bio Solvent BC1 • MET-L-CHEK solvente E59A • SHERWIN solvente DR62 (Per gli emulsificanti vedi schede "Penetranti fluorescenti") 	<p>3.1</p>  <p>con acqua (+ luce UV per fluorescenti)</p>	<p>3.2</p>  <p>manuale con solventi E59/DR62 a rapida evaporazione</p>	<p>3.3</p>  <p>immersione in emulsificatore (per tipo post-emulsionante)</p>
<p>4 ASCIUGATURA</p>	<p>In aria libera o aria compressa</p> 	<p>con stracci</p> 	<p>con aria calda</p> 
<p>5 APPLICAZIONE SVILUPPATORE BIANCO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elite D112A a rapida evaporazione • MET-L-CHEK D70 a rapida evaporazione • SHERWIN D100 a rapida evaporazione (Per sviluppatori a secco e base acqua vedi schede "Penetranti fluorescenti") 	<p>5.1</p>  <p>spray</p>	<p>5.2</p>  <p>per immersione</p>	<p>5.3</p>  <p>a secco (per fluorescenti)</p>
<p>6 ISPEZIONE</p> <p>(Pulizia finale e protezione superficiale se richieste)</p>	<p>visiva</p> 	<p>sotto luce UV, per fluorescenti</p> 	<p>DIFETTI RILEVABILI</p> <ul style="list-style-type: none"> — cricca a freddo — cricca di solidificazione — cricche da retifica — grande cricca — pori — porosità — cricche da stress - corrosion

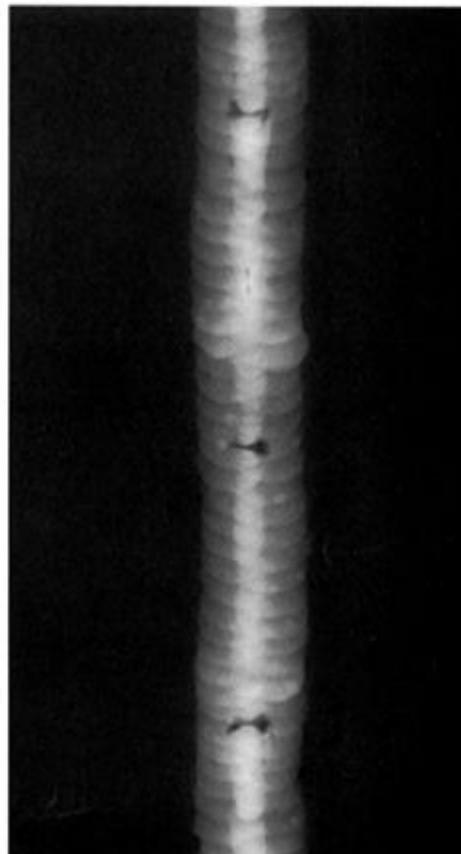
Controlli delle saldature

Esame radiografico

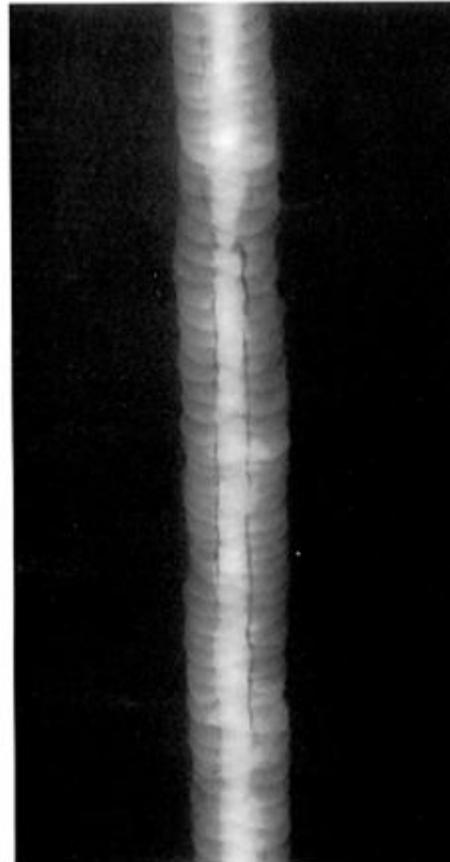
Parziale penetrazione



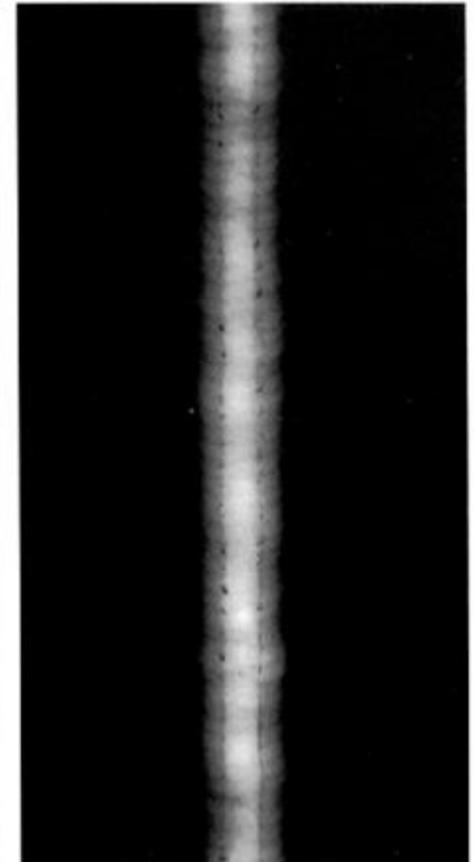
Impurità incluse all'interno



Impurità in superficie

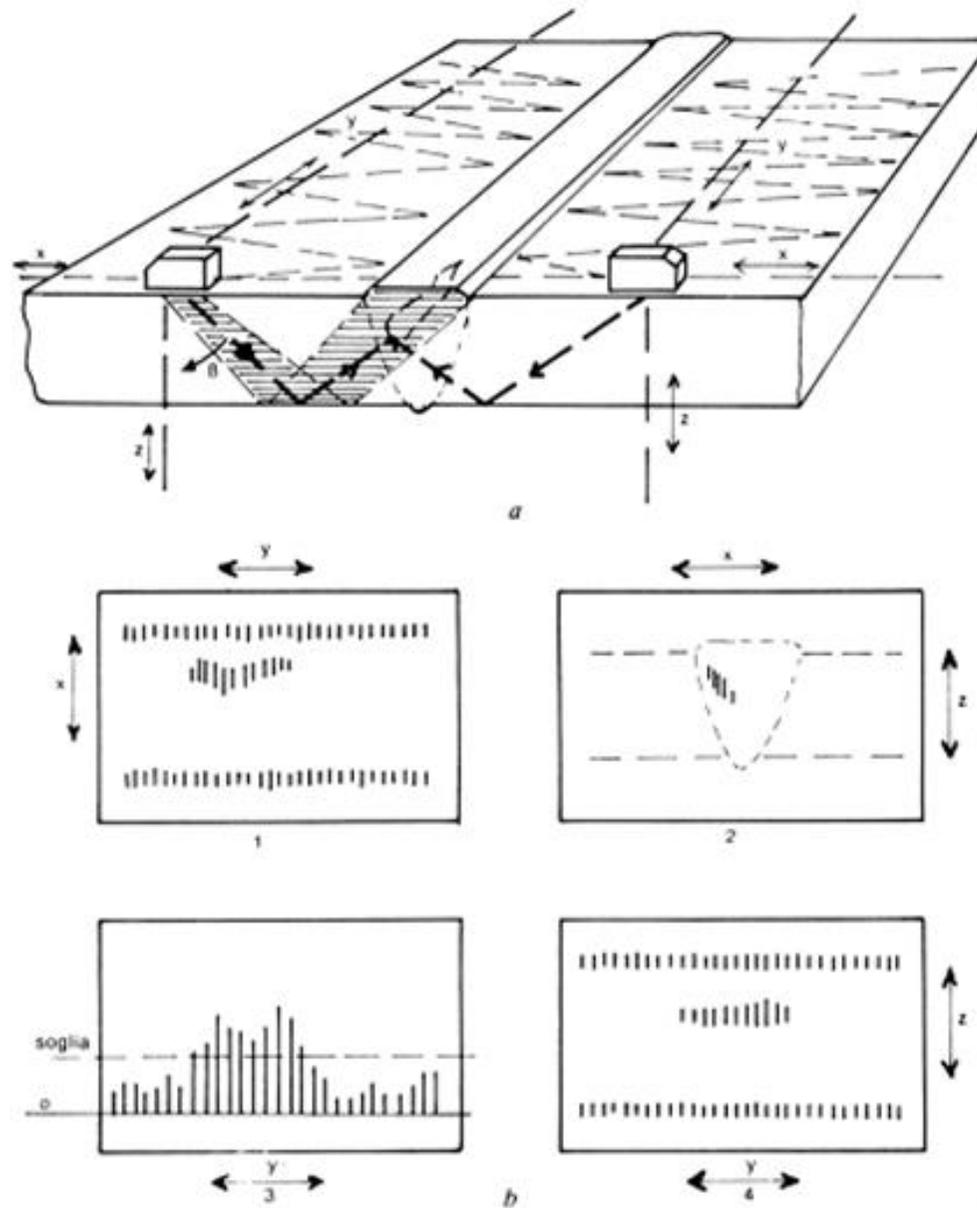


Presenza di vuoti



Controlli delle saldature

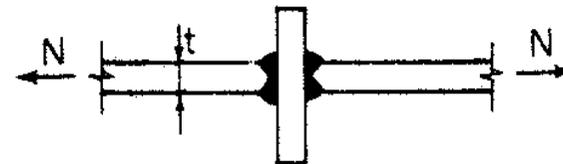
Esame ad ultrasuoni



Collegamenti saldati

Classificazione

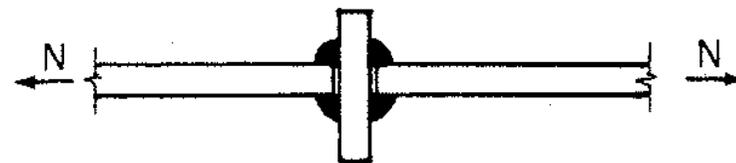
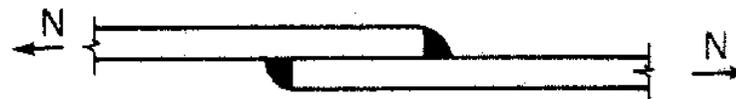
1. Saldature a completa penetrazione



Se rimangono tratti non collegati:

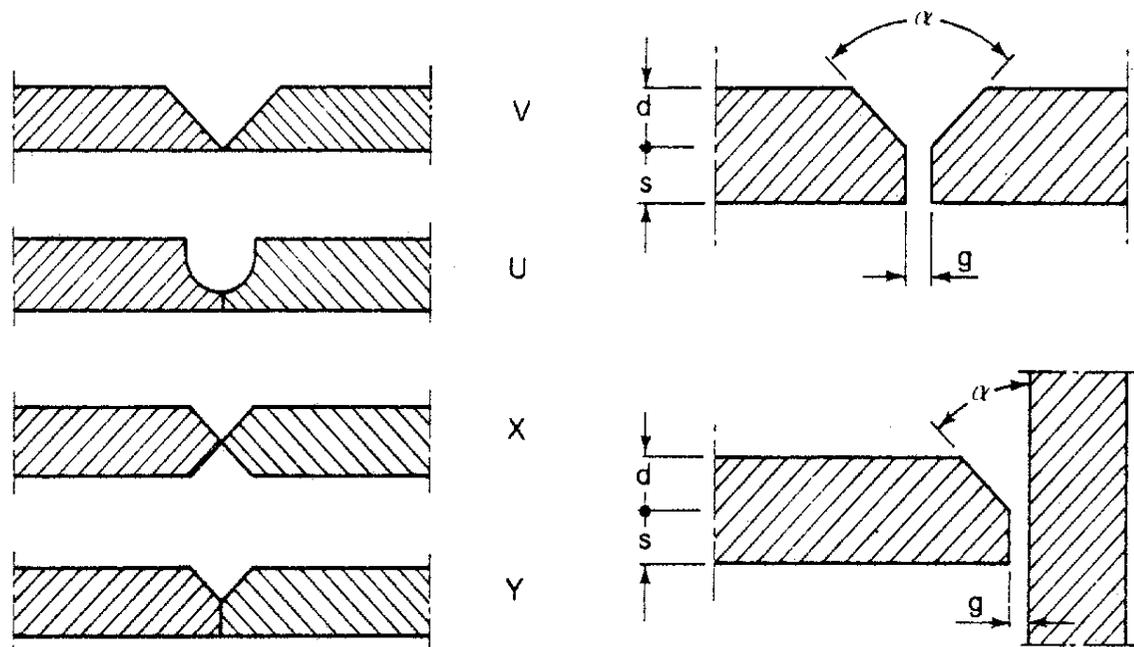
saldatura a parziale penetrazione (considerata come cordone d'angolo)

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

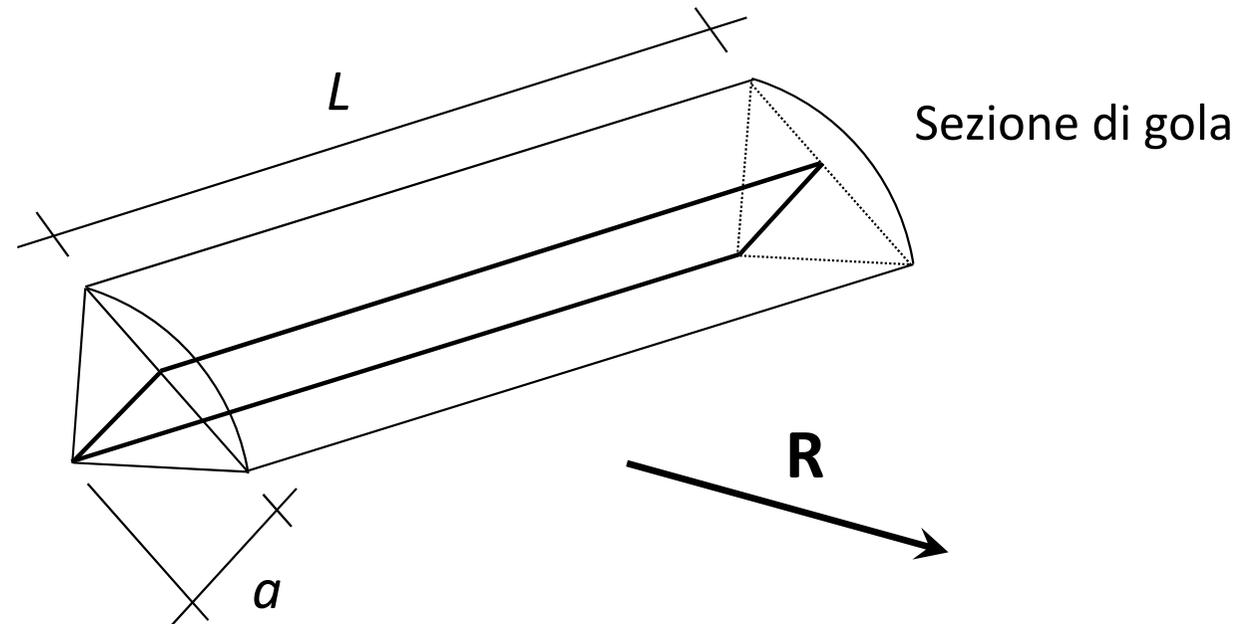
- Viene perfettamente ripristinata la continuità del materiale
- La resistenza della saldatura è almeno pari a quella dei pezzi che unisce
- In genere non è necessaria una verifica specifica

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

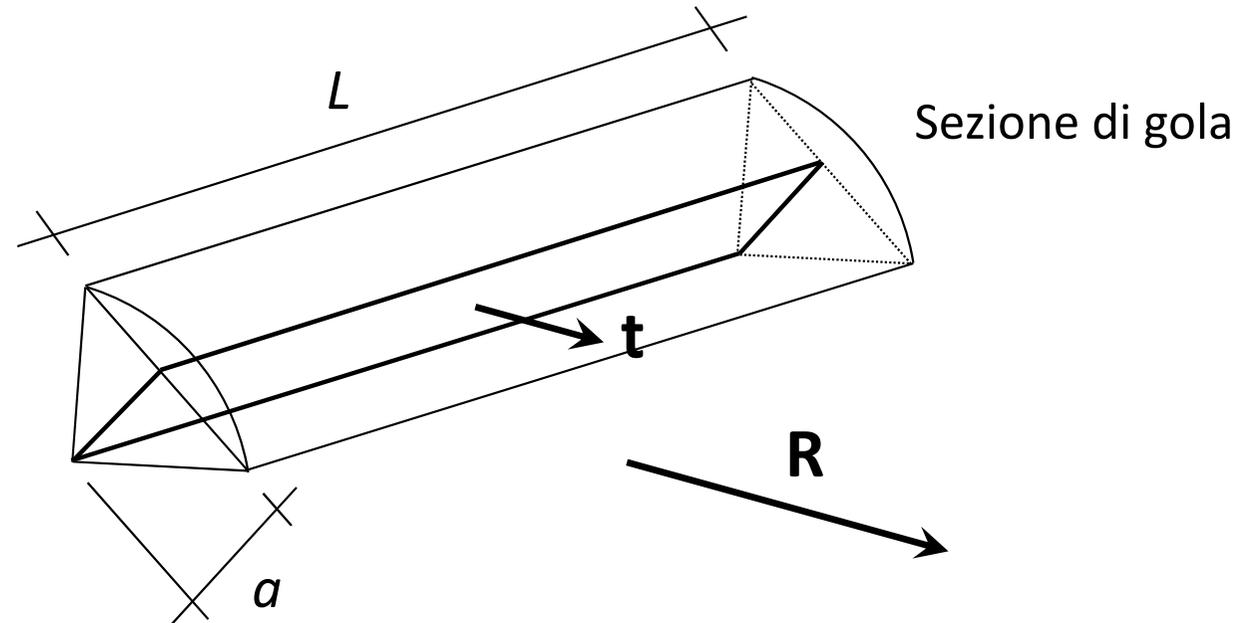
Resistenza dei cordoni di saldatura



R Forza agente sul cordone d'angolo

Saldatura a cordoni d'angolo

Resistenza dei cordoni di saldatura



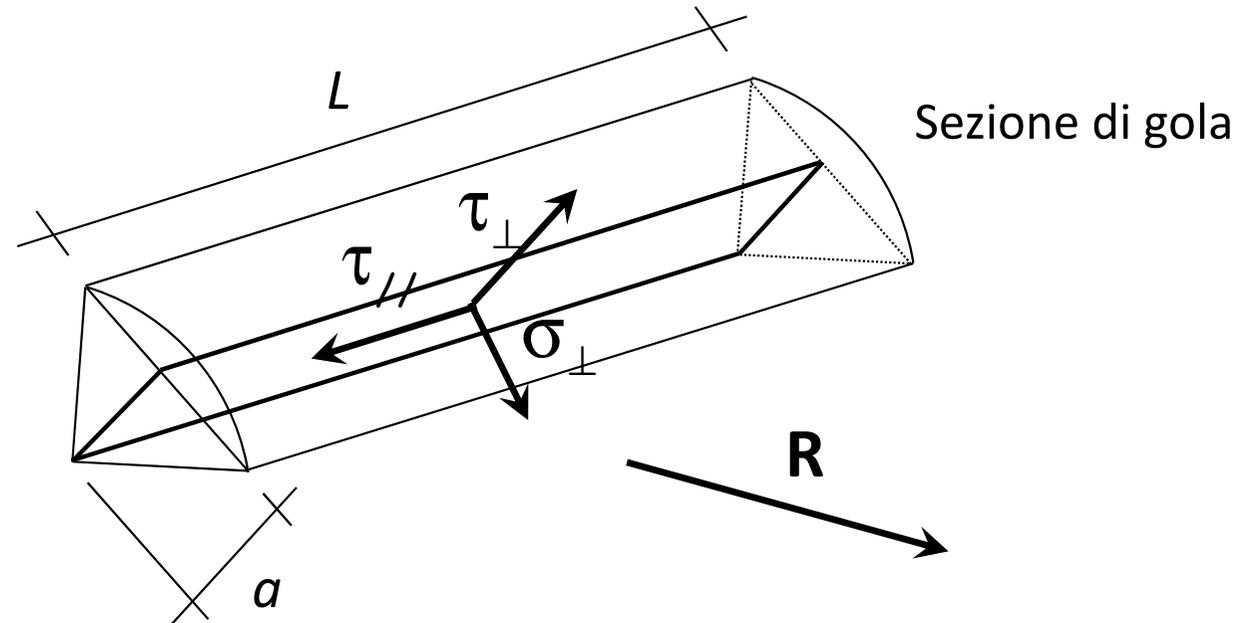
R Forza agente sul cordone d'angolo

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

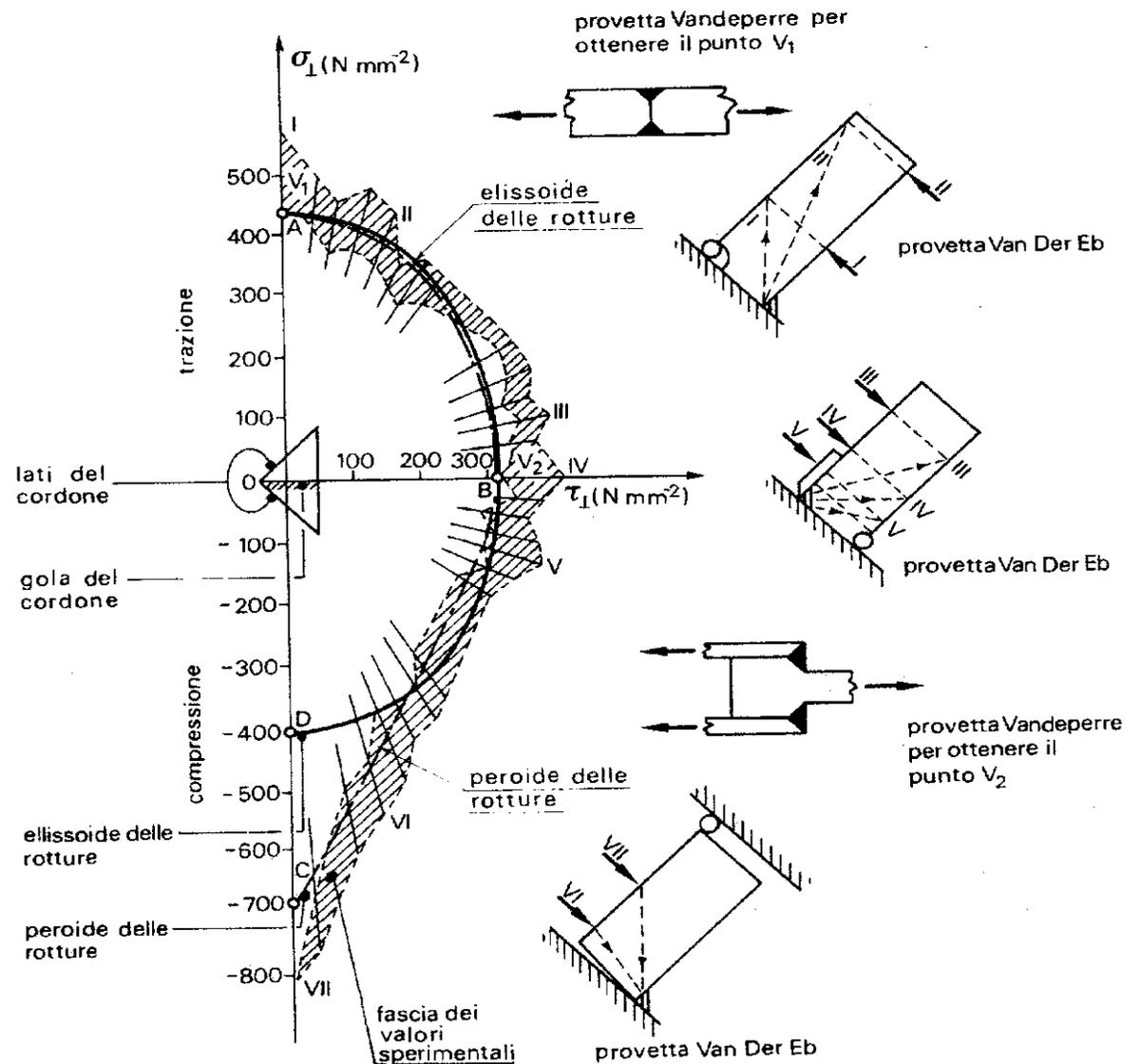
σ_{\perp} $\tau_{//}$ τ_{\perp} Componenti di **t**

Saldatura a cordoni d'angolo

Resistenza dei cordoni di saldatura

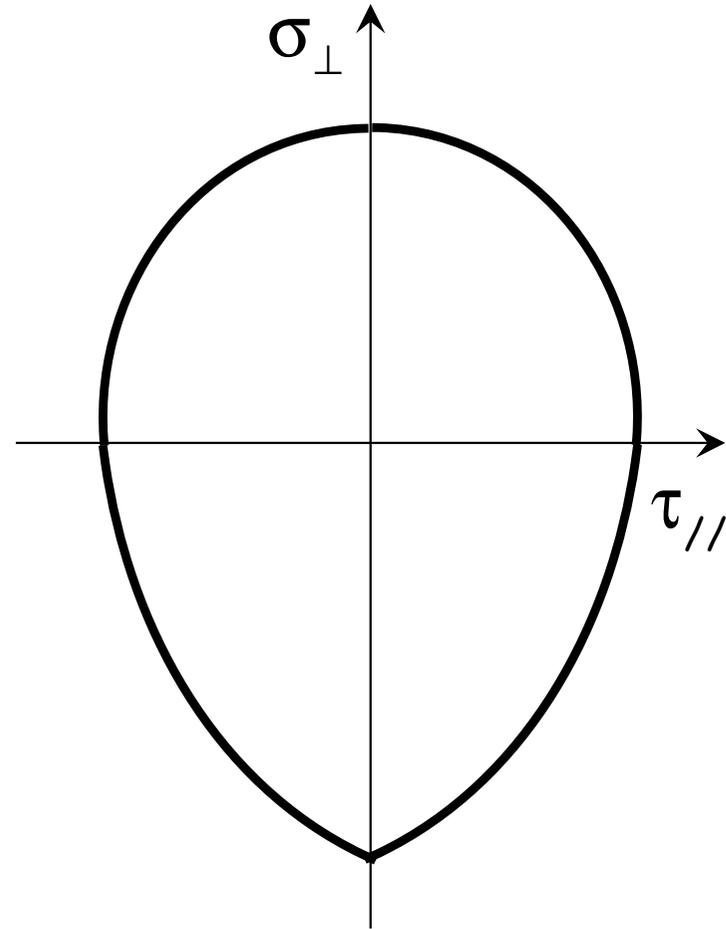
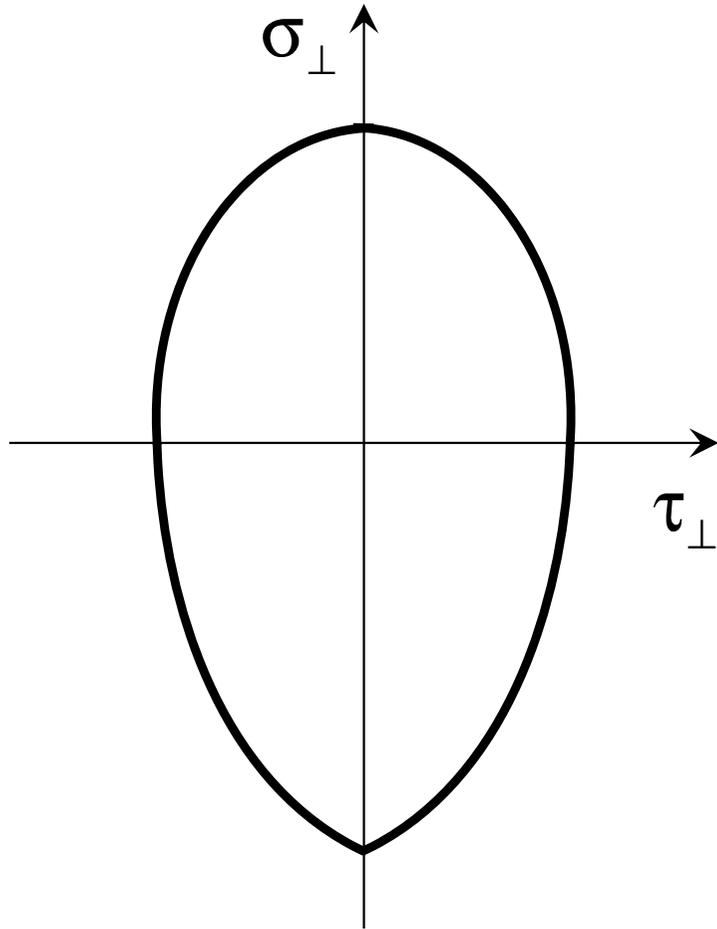
Il dominio di rottura di un cordone di saldatura è stato determinato sperimentalmente

Per la sua forma irregolare è stato denominato *peroide*



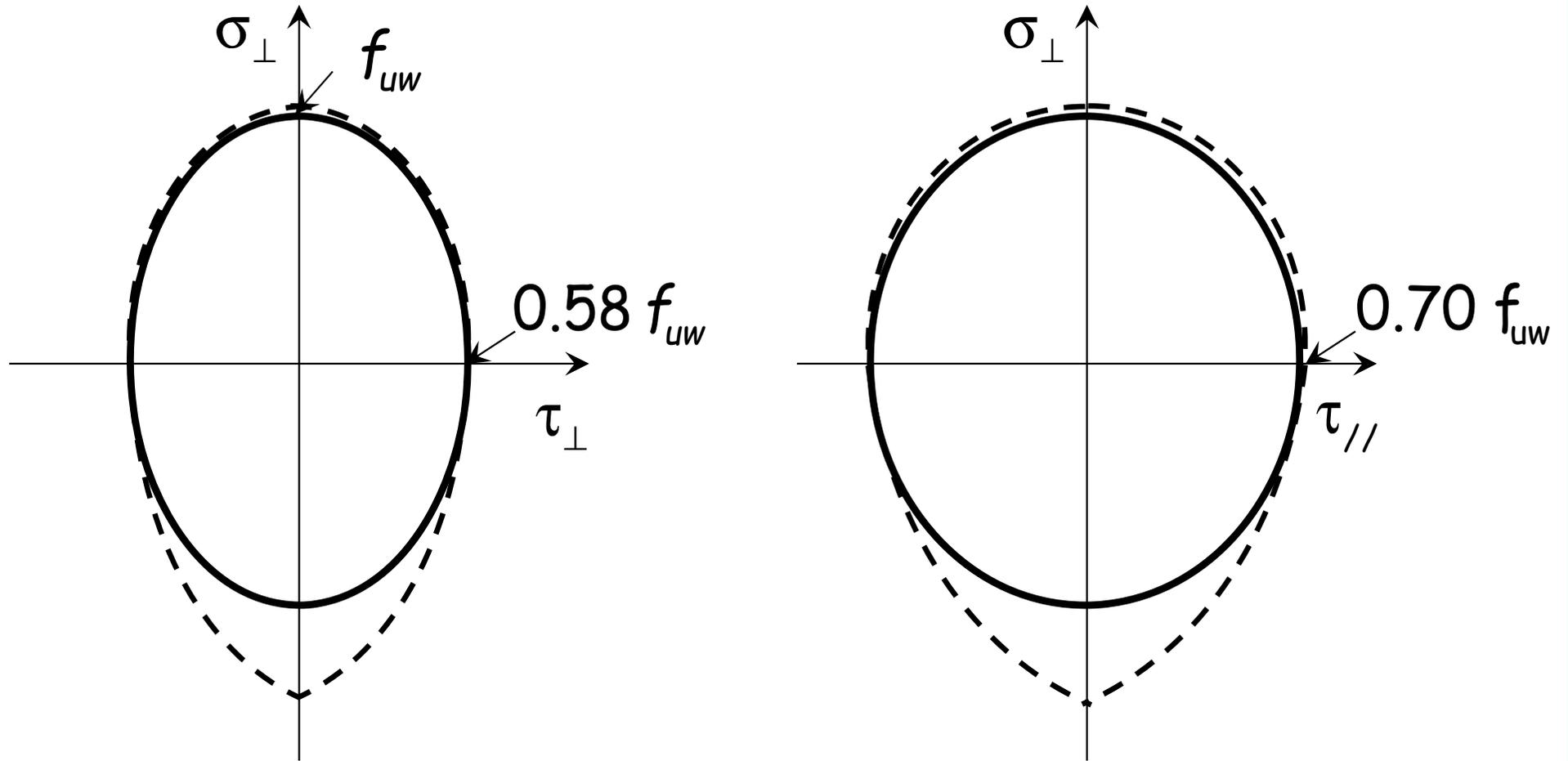
Dominio di resistenza sperimentale

Peroide



Domini di resistenza analitici

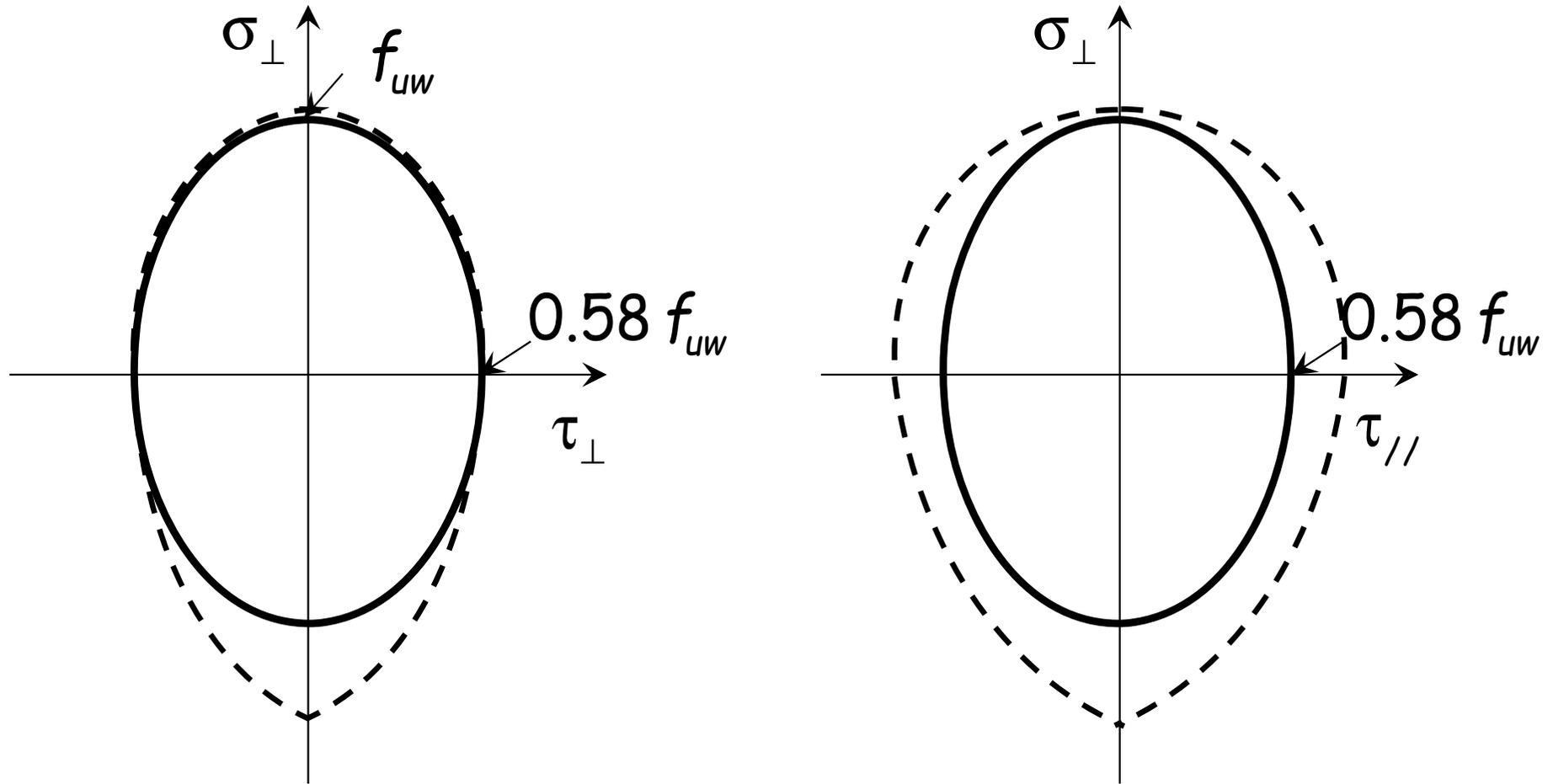
Ellissoide



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

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

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

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

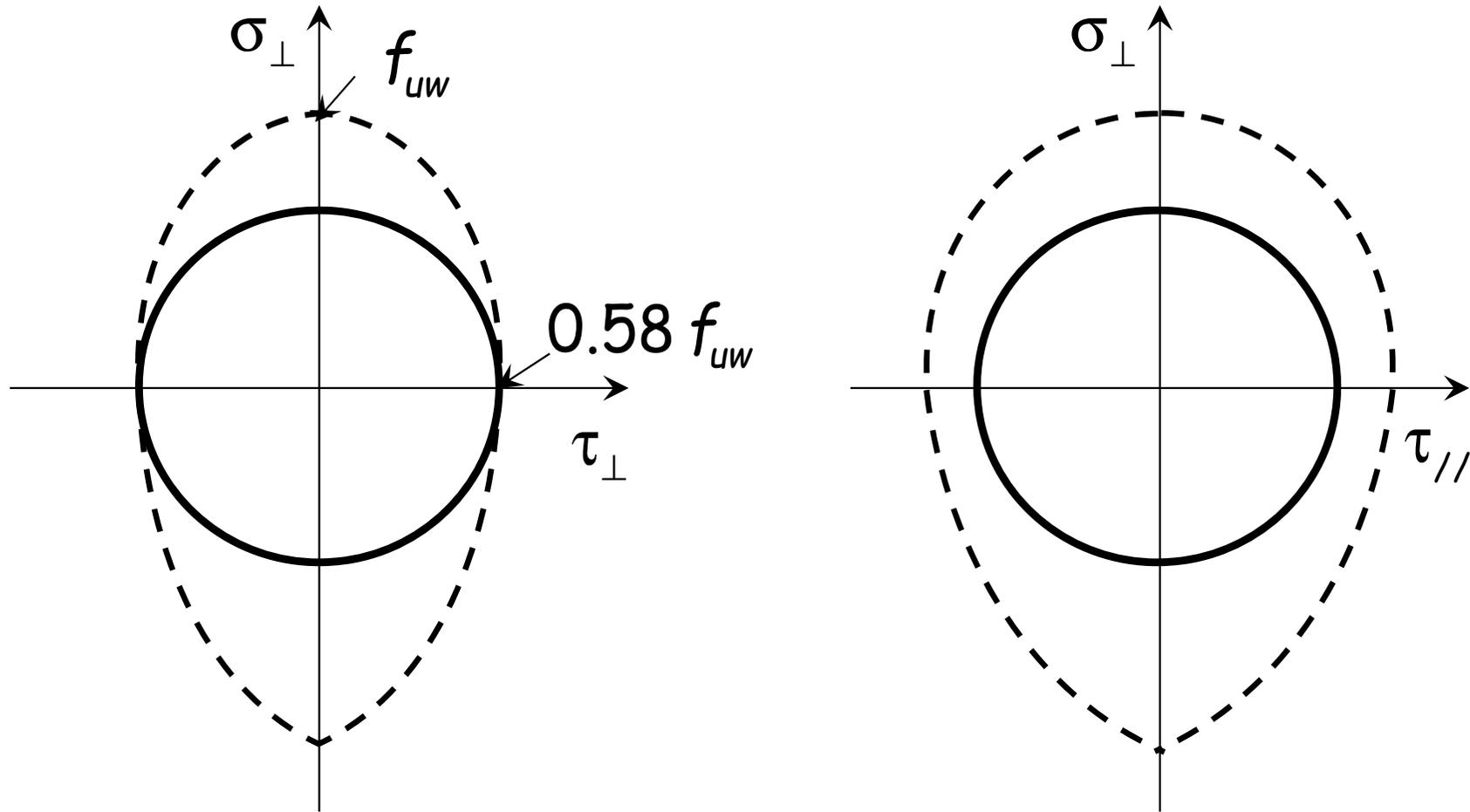
Svantaggio:

Bisogna calcolare le componenti della tensione t rispetto al sistema di riferimento della sezione di gola

$$\sigma_{\perp}, \tau_{\perp} \text{ e } \tau_{//}$$

Domini di resistenza

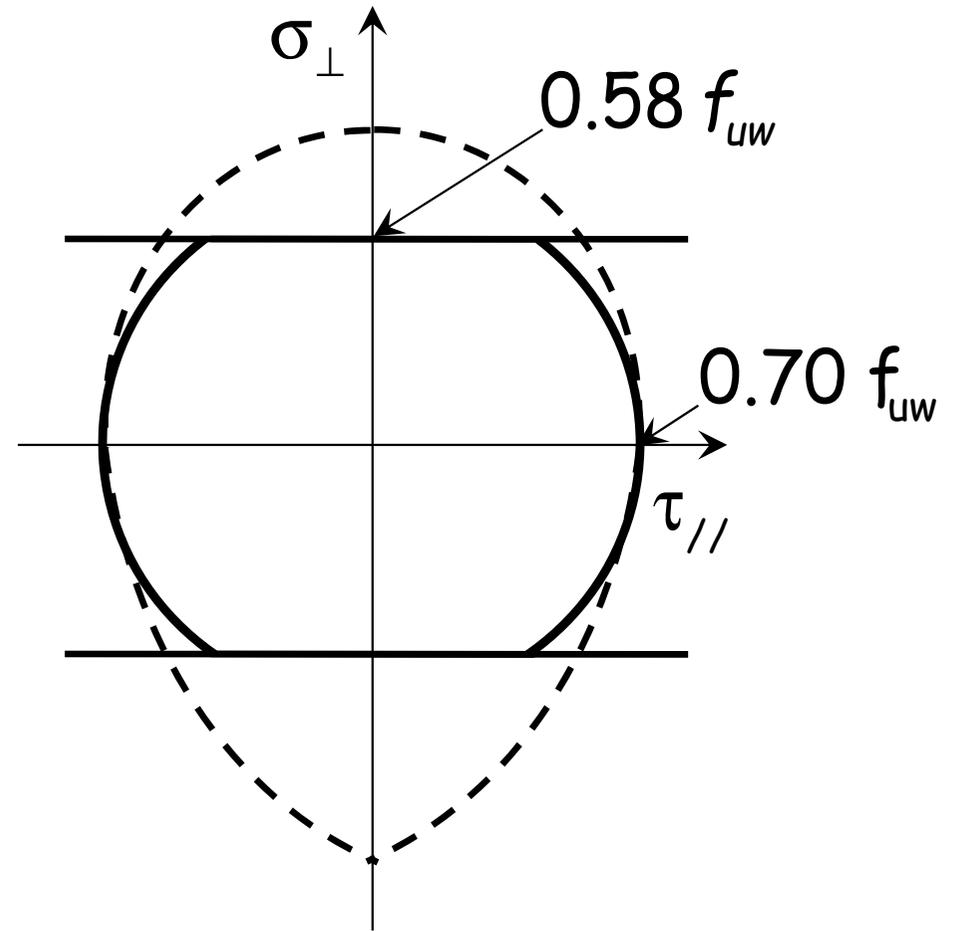
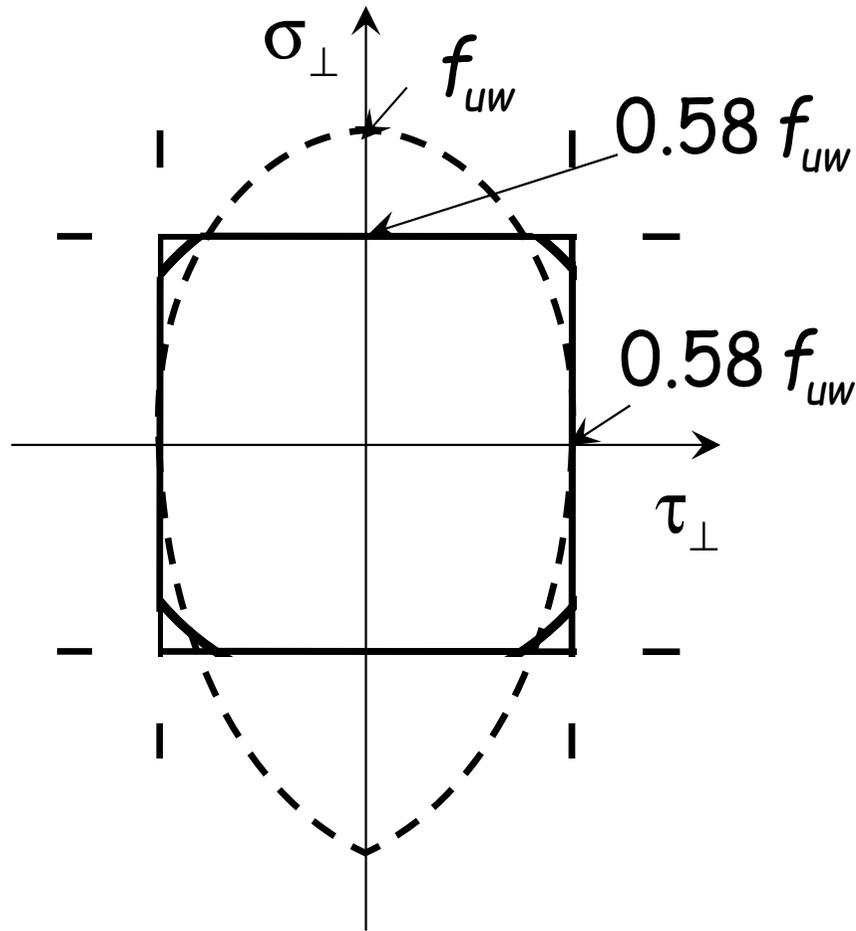
Dominio sferico



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

Domini di resistenza

Sfera mozza



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

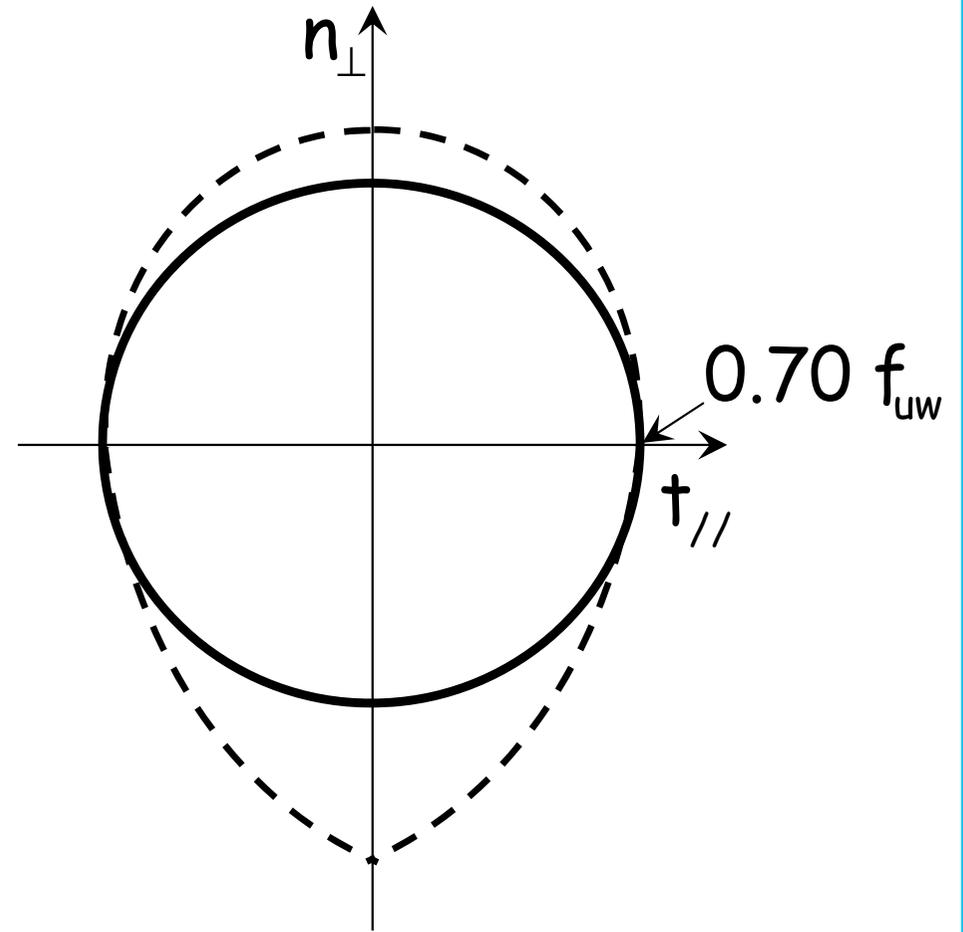
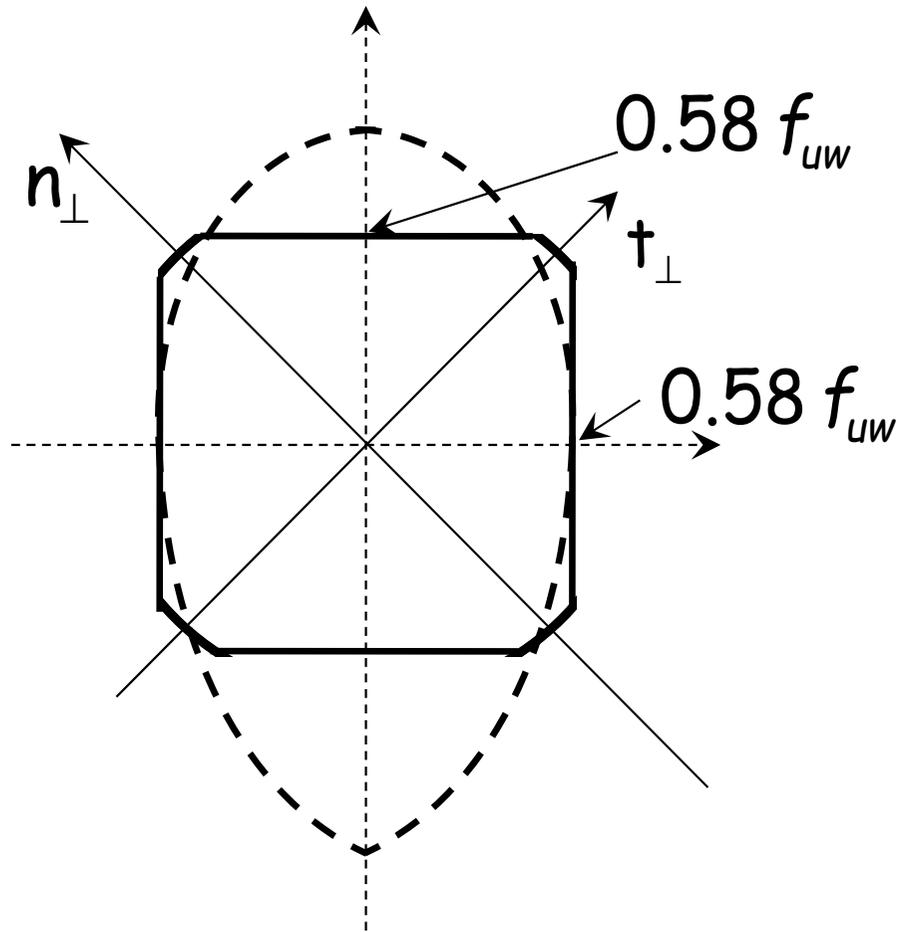
Inoltre ...

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

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

Domini di resistenza

Sfera mozza

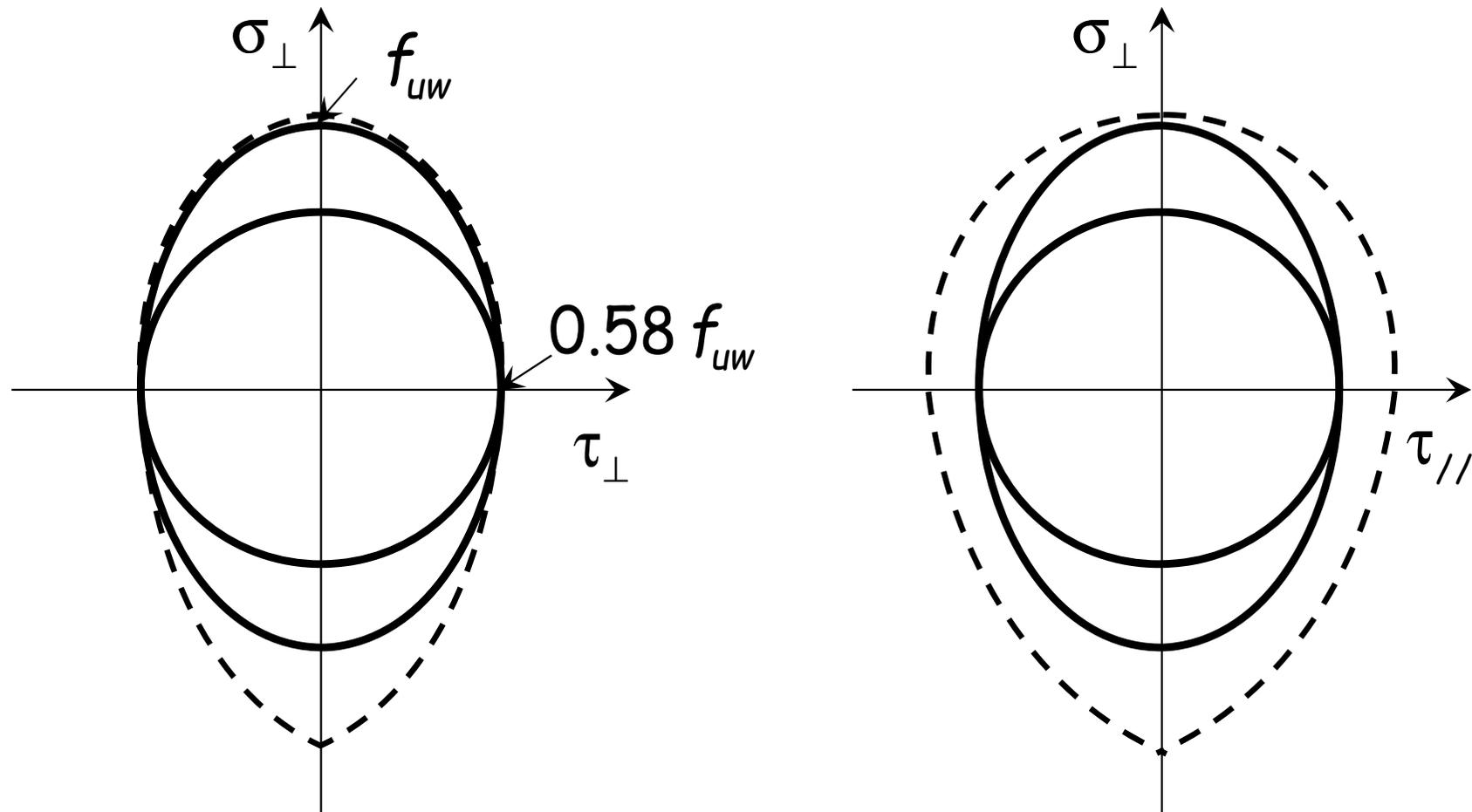


$$\frac{n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2 + t_{//}^2}{(0.70 f_{uw})^2} \leq 1$$

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

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

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 sulle saldature

L'altezza di gola:

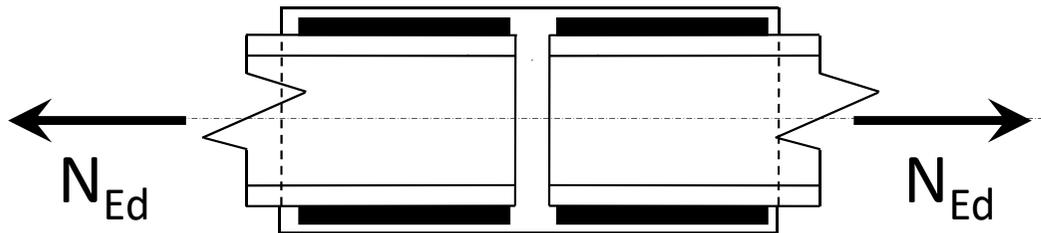
- deve essere pari almeno a 3 mm

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

Collegamento saldato

Esempio



N_{Ed}

150 kN

4 Cordoni
(per lato)

$a = 3$ mm

$L = 80$ mm

Acciaio

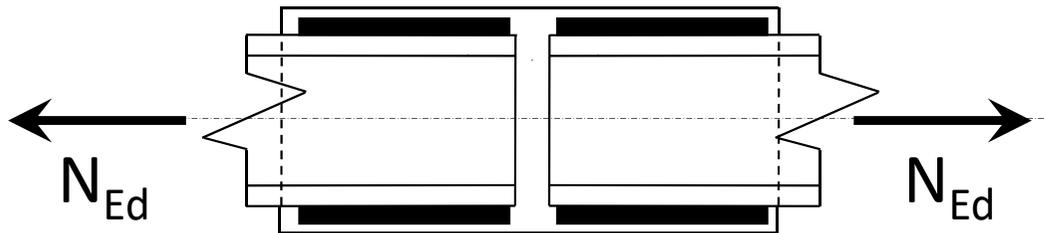
S235

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

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

Collegamento saldato

Esempio



N_{Ed}	150 kN
4 Cordoni (per lato)	$a = 3$ mm $L = 80$ 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

Verifica di cordoni di saldatura

Ellissoide di rotazione

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

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

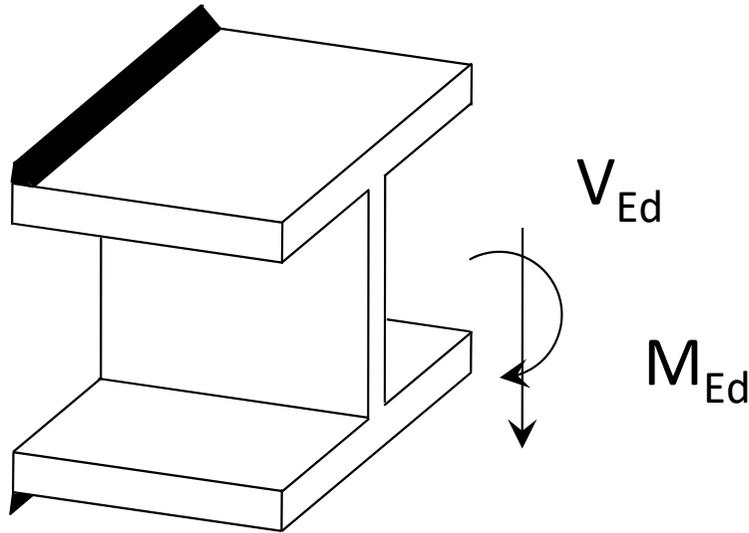
o in alternativa ...

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

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

Collegamento saldato

Esempio



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

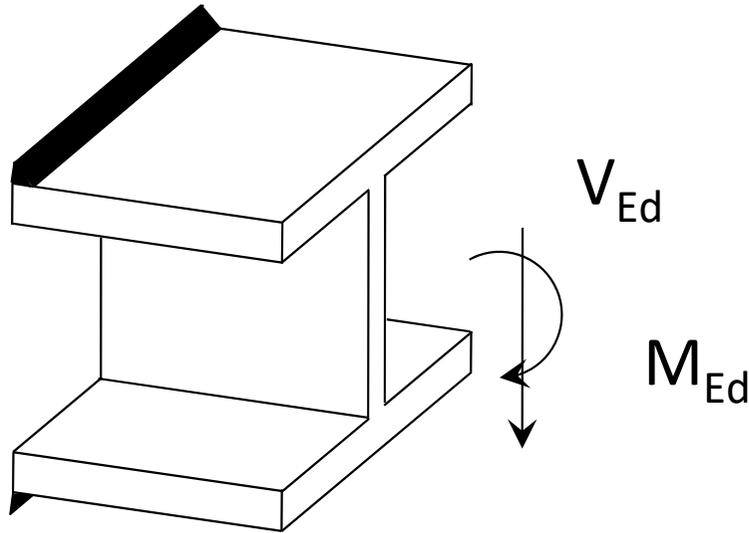
1. Determinazione delle tensioni dovute al taglio

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

F_V Forza verticale applicata sul cordone per effetto del taglio

Collegamento saldato

Esempio



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

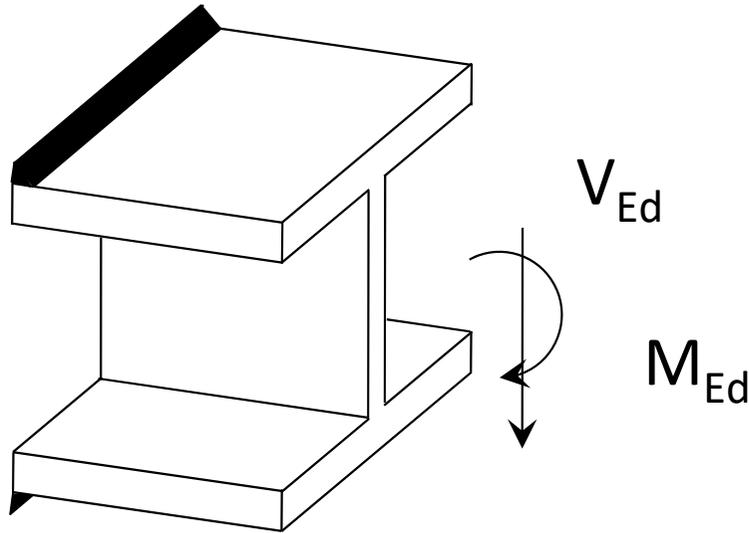
1. Determinazione delle tensioni dovute al taglio

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

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

Collegamento saldato

Esempio



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

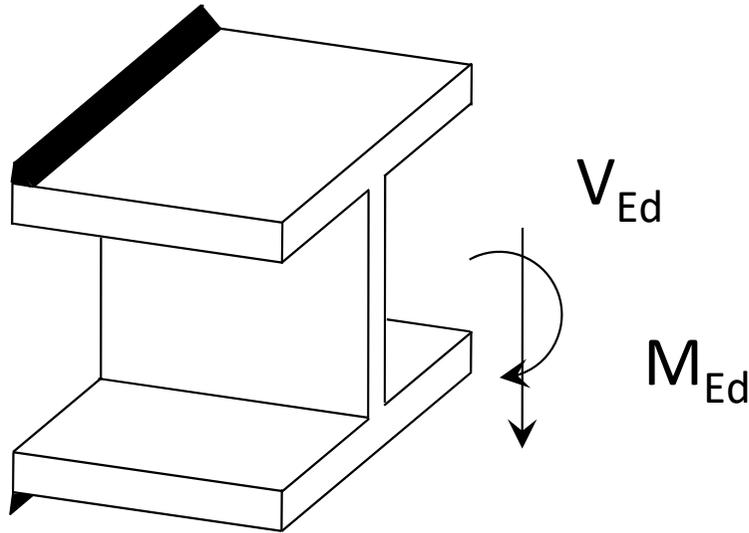
2. Determinazione delle tensioni dovute al Momento

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

F_M Forza orizzontale applicata sul cordone per effetto del momento flettente

Collegamento saldato

Esempio



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

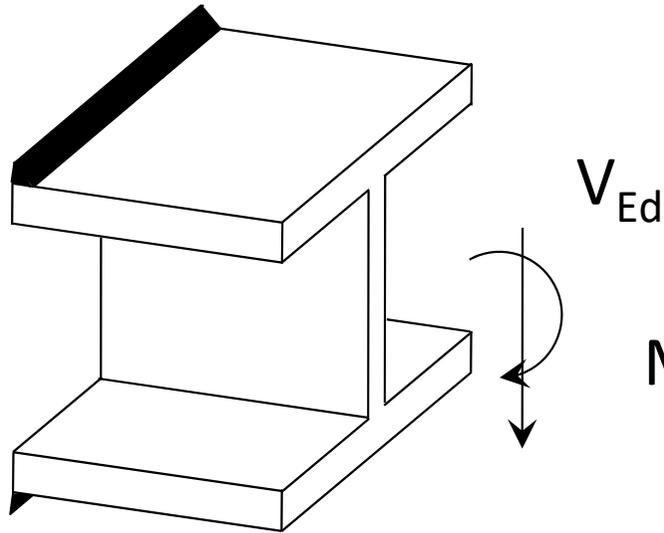
2. Determinazione delle tensioni dovute al Momento

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

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

Collegamento saldato

Esempio



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

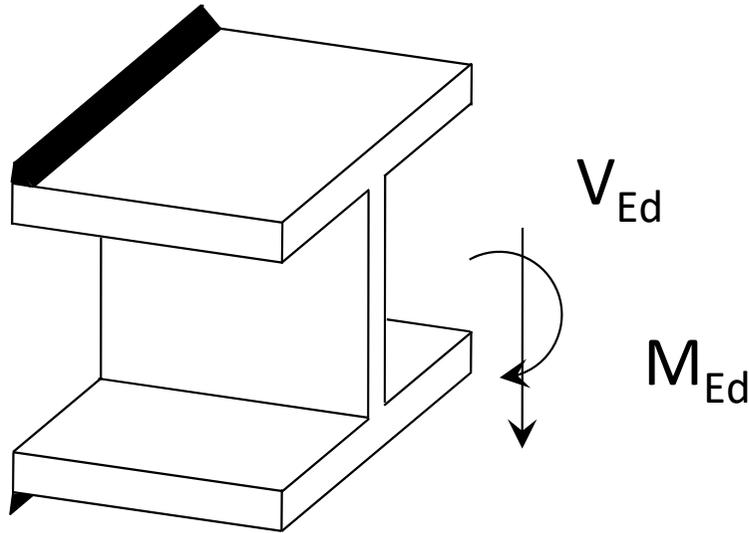
3. Determinazione delle tensioni totali

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

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

Collegamento saldato

Esempio



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

4. Verifica

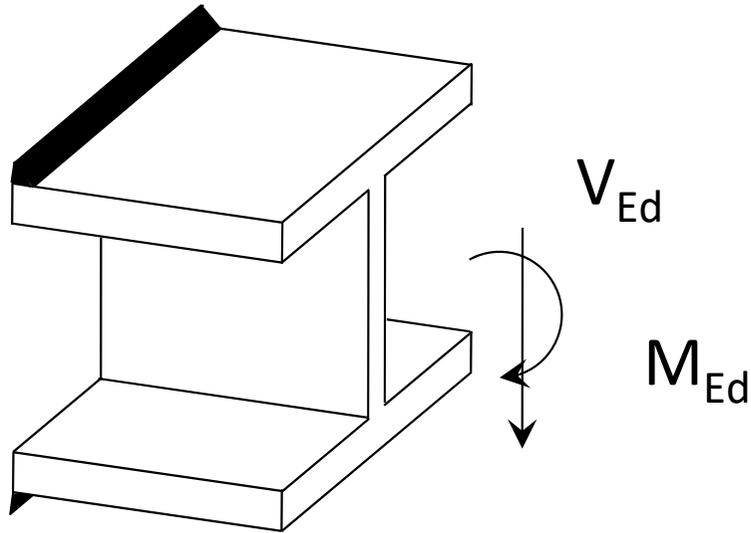
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2} = \sqrt{176.1^2 + 3 \times 130.3^2} = 286.3 \text{ MPa}$$

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

I cordoni sono verificati

Collegamento saldato

Esempio

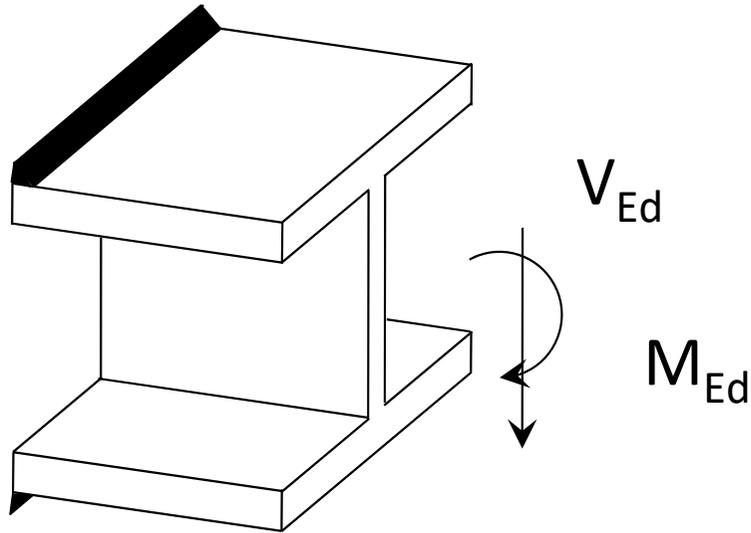


V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

E se avessi eseguito la verifica con il dominio sferico?

Collegamento saldato

Esempio



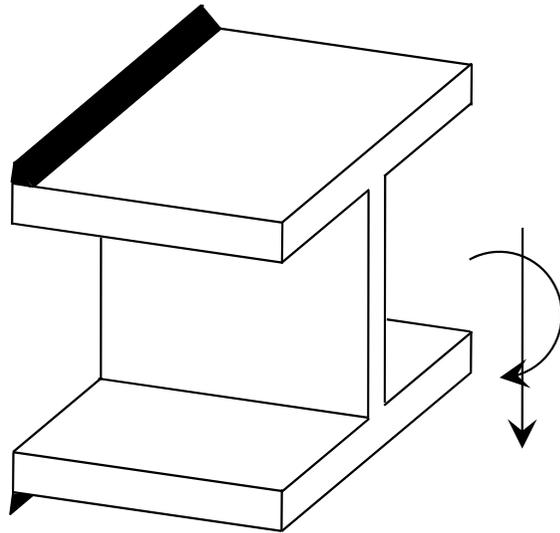
V_{Ed}	70 kN
M_{Ed}	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$ $L = 180 \text{ mm}$

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

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

Collegamento saldato

Esempio



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

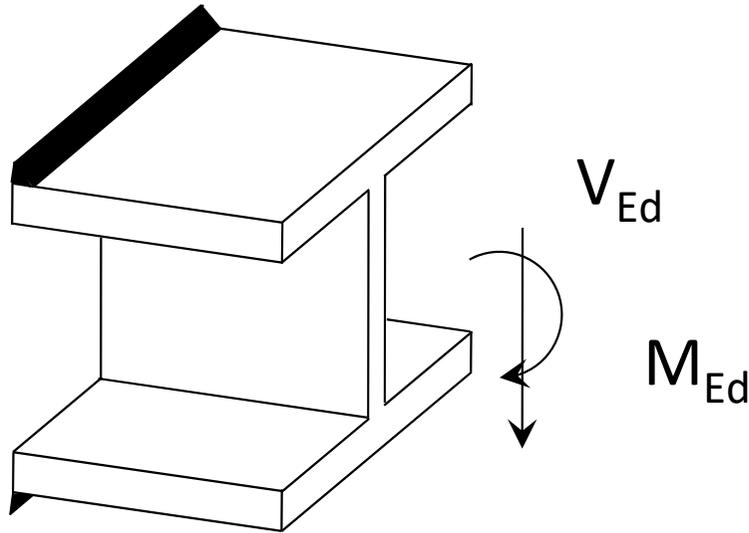
$$F_V = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ kN}$$

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

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

Collegamento saldato

Esempio



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

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

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

FINE