

Corso di aggiornamento  
Progettazione strutturale e  
Norme Tecniche per le Costruzioni

**Progetto di aste e collegamenti in acciaio**

9 - Collegamenti saldati

Spoletto  
8-10 novembre 2012  
Aurelio Gheresi

# 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

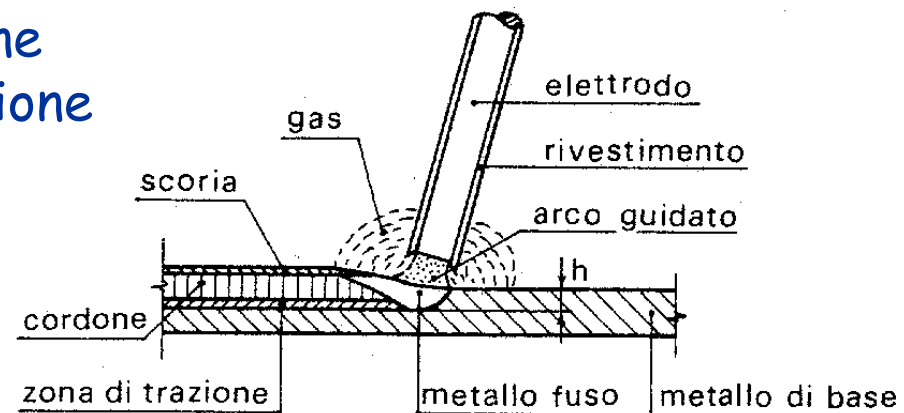
# Procedimenti di saldatura

- Procedimenti di saldatura manuali

Saldatura ossiacetilenica

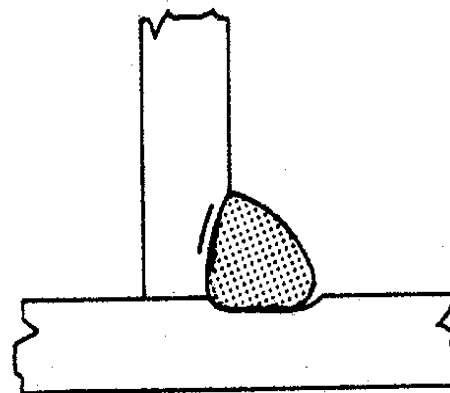
Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti

- 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



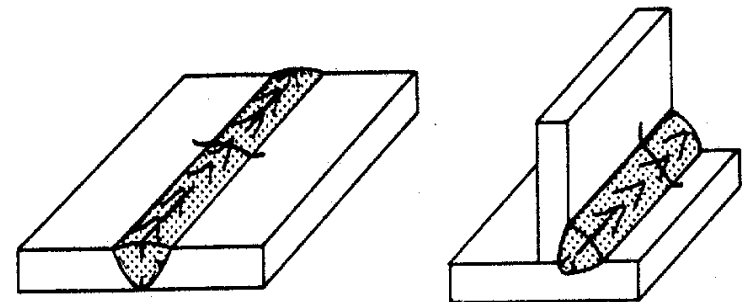
# Difetti di saldatura

- 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

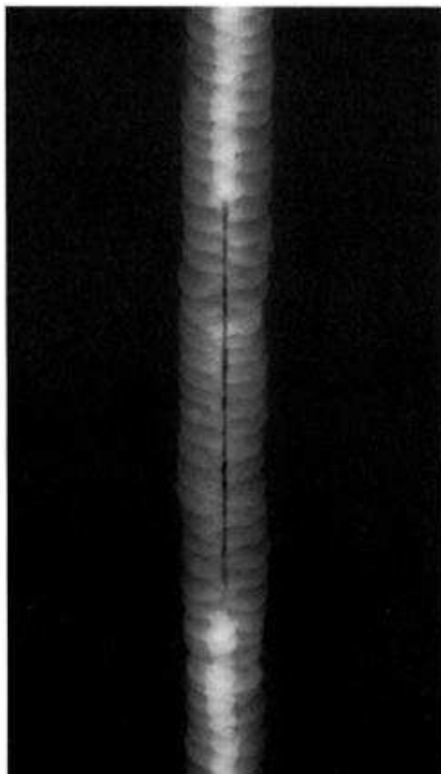
# Controlli delle saldature Esame con liquidi penetranti

<b>1 PULIZIA PRELIMINARE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elite BC1</li> <li>• MET-L-CHEK solvente ES9A</li> <li>• SHERWIN solvente D662</li> <li>• NDT detergente Elite D01A-1</li> <li>• Sabbatura con Plastic Media</li> </ul>	<b>1.1</b>  solventi BC1/ES9A/D662 spray a rapida evaporazione	<b>1.2</b>  Detergente Elite D01A-1 a caldo	<b>1.3</b>  Sabbatura con Plastic Media
<b>2 APPLICAZIONE DEL PENETRANTE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elite K71B2</li> <li>• MET-L-CHEK VP30 rosso</li> <li>• SHERWIN DP51 rosso</li> <li>(I liquidi penetranti fluorescenti sono elencati nella relativa scheda)</li> </ul>	<b>2.1</b>  spray	<b>2.2</b>  pennello	<b>2.3</b>  per immersione
<b>3 RIMOZIONE DEL PENETRANTE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elite Bio Solvent BC1</li> <li>• MET-L-CHEK solvente ES9A</li> <li>• SHERWIN solvente D662</li> <li>(Per gli emulsificatori vedi schede "Penetranti fluorescenti")</li> </ul>	<b>3.1</b>  con acqua (+ luce UV per fluorescenti)	<b>3.2</b>  manuale con solventi ES9/D662 a rapida evaporazione	<b>3.3</b>  immersione in emulsificatore (per tipo post-emulsionante)
<b>4 ASCIUGATURA</b>	 in aria libera o aria compressa	 con stracci	 con aria calda
<b>5 APPLICAZIONE SVILUPPATORE BIANCO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elite D112A a rapida evaporazione</li> <li>• MET-L-CHEK D70 a rapida evaporazione</li> <li>• SHERWIN D100 a rapida evaporazione</li> <li>(Per sviluppatori a secco e base acqua vedi schede "Penetranti fluorescenti")</li> </ul>	<b>5.1</b>  spray	<b>5.2</b>  per immersione	<b>5.3</b>  a secco (per fluorescenti)
<b>6 ISPEZIONE</b> (Pulizia finale e protezione superficiale se richieste)	 VISIVA	 sotto luce UV per fluorescenti	<b>DIFETTI RILEVABILI</b> 

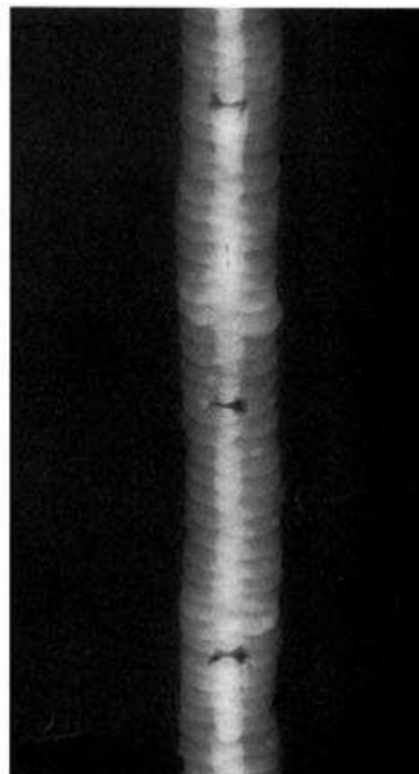
# Controlli delle saldature

## Esame radiografico

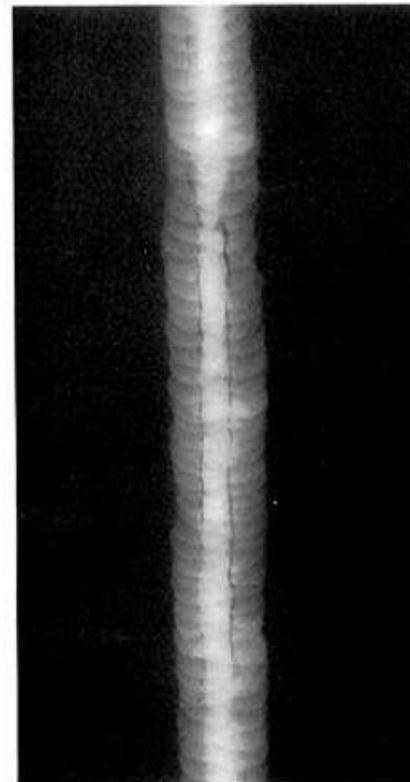
Parziale penetrazione



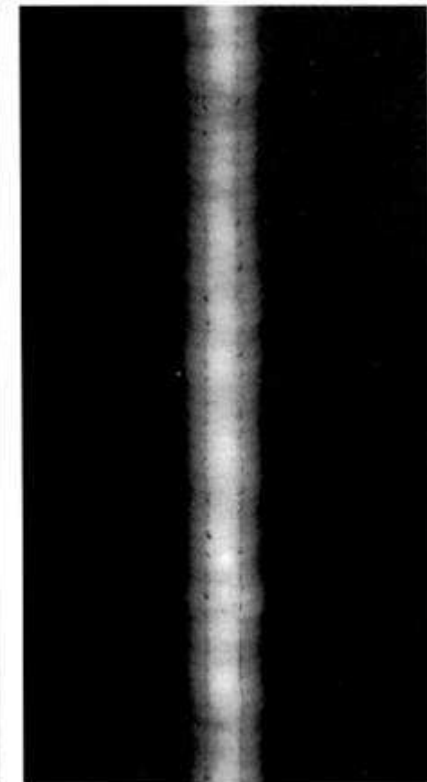
Impurità incluse all'interno



Impurità in superficie

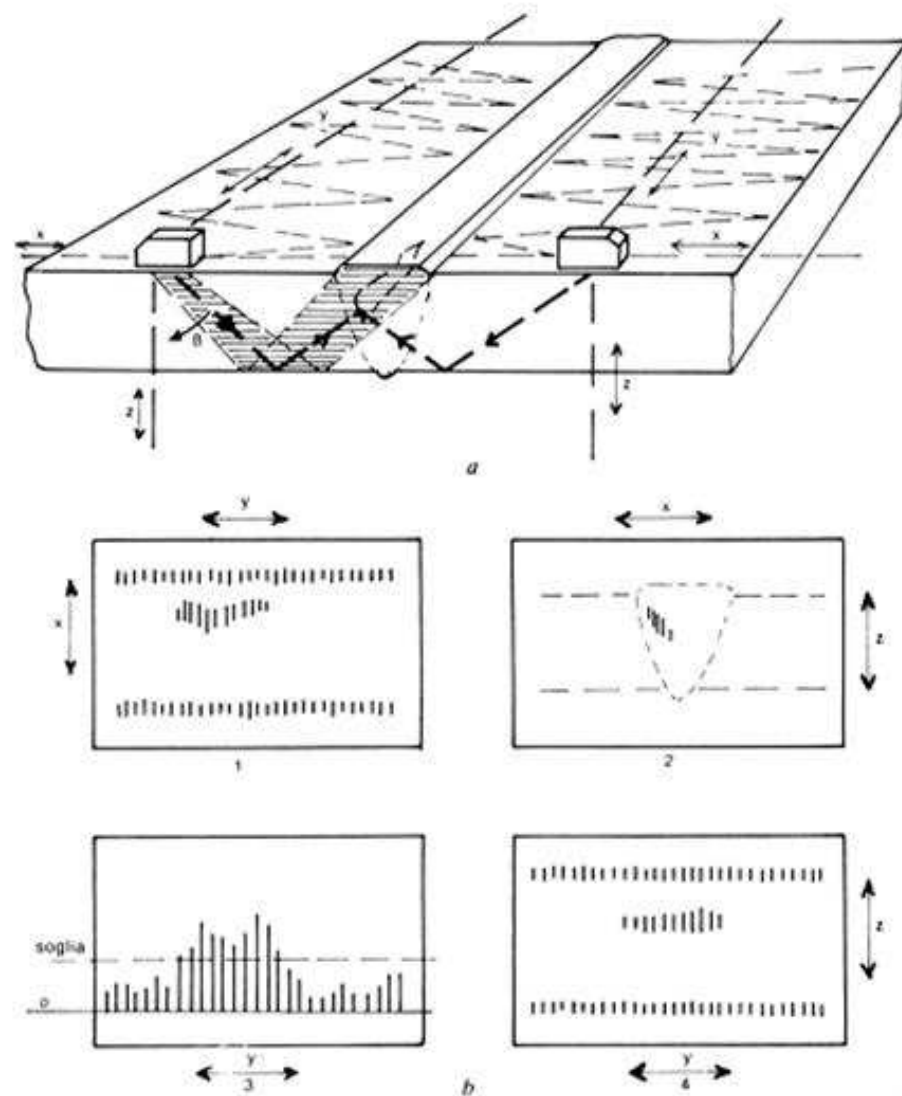


Presenza di vuoti



# Controlli delle saldature

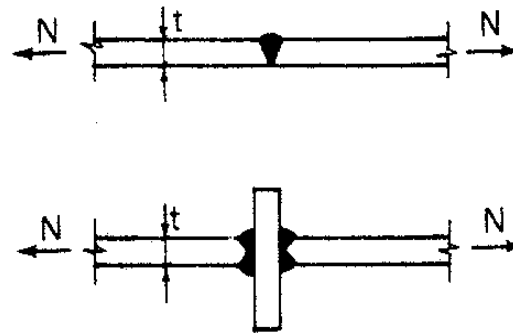
## Esame ad ultrasuoni



# Collegamenti saldati

## Classificazione

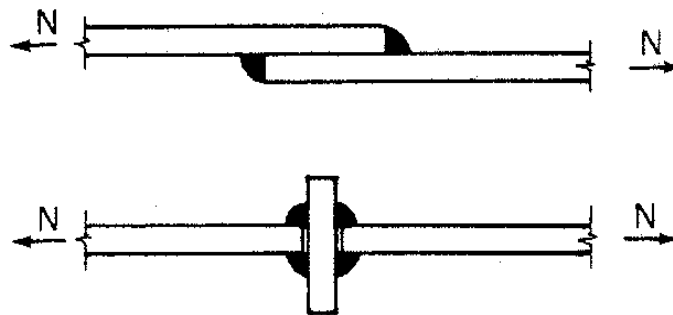
### 1. Saldature a completa penetrazione



Se rimangono tratti non collegati:

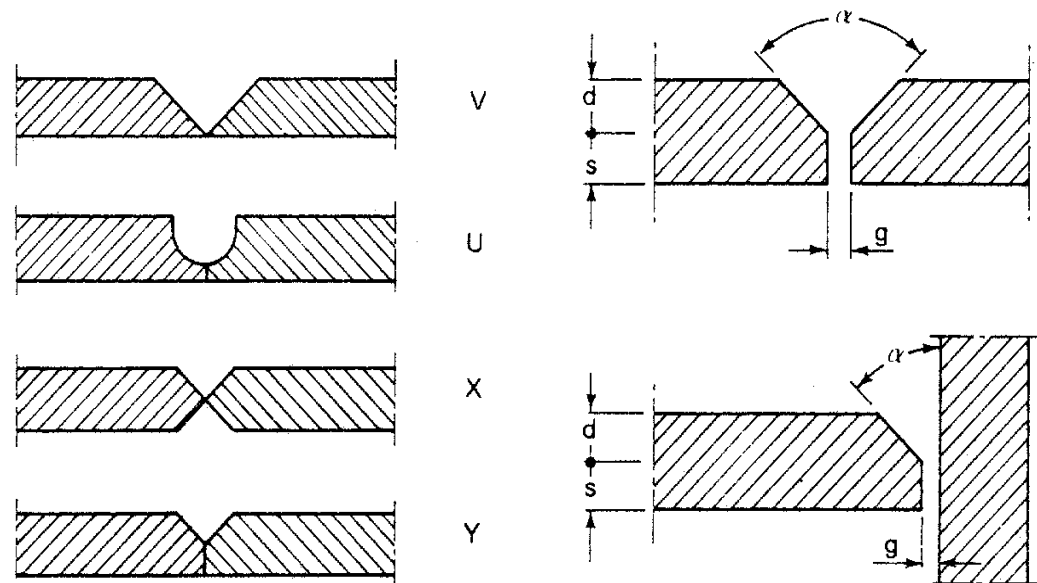
saldatura a parziale penetrazione (considerata come cordone d'angolo)

### 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

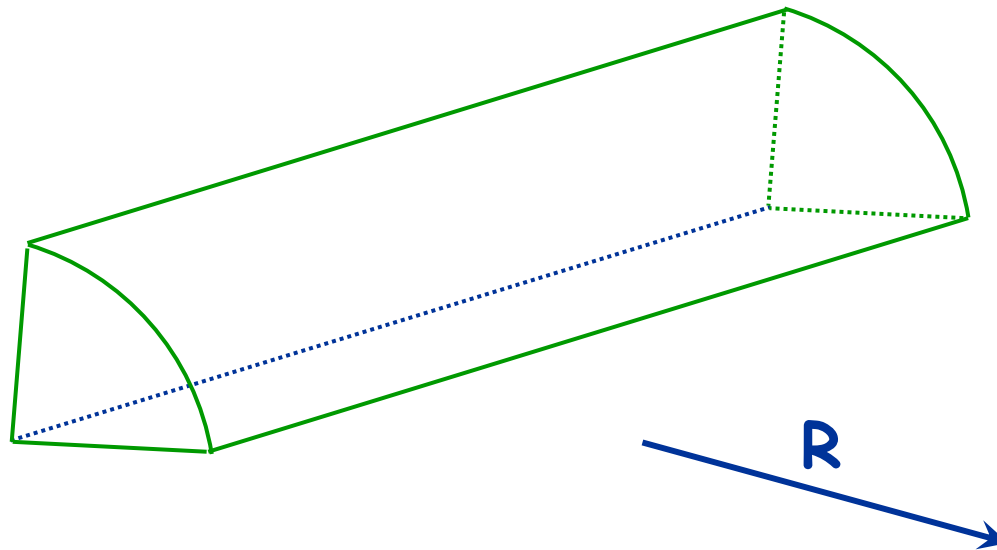
- Viene perfettamente ripristinata la continuità del materiale
- La resistenza della saldatura è almeno pari a quella dei pezzi che unisce
- In genere non è necessaria una verifica specifica

## *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



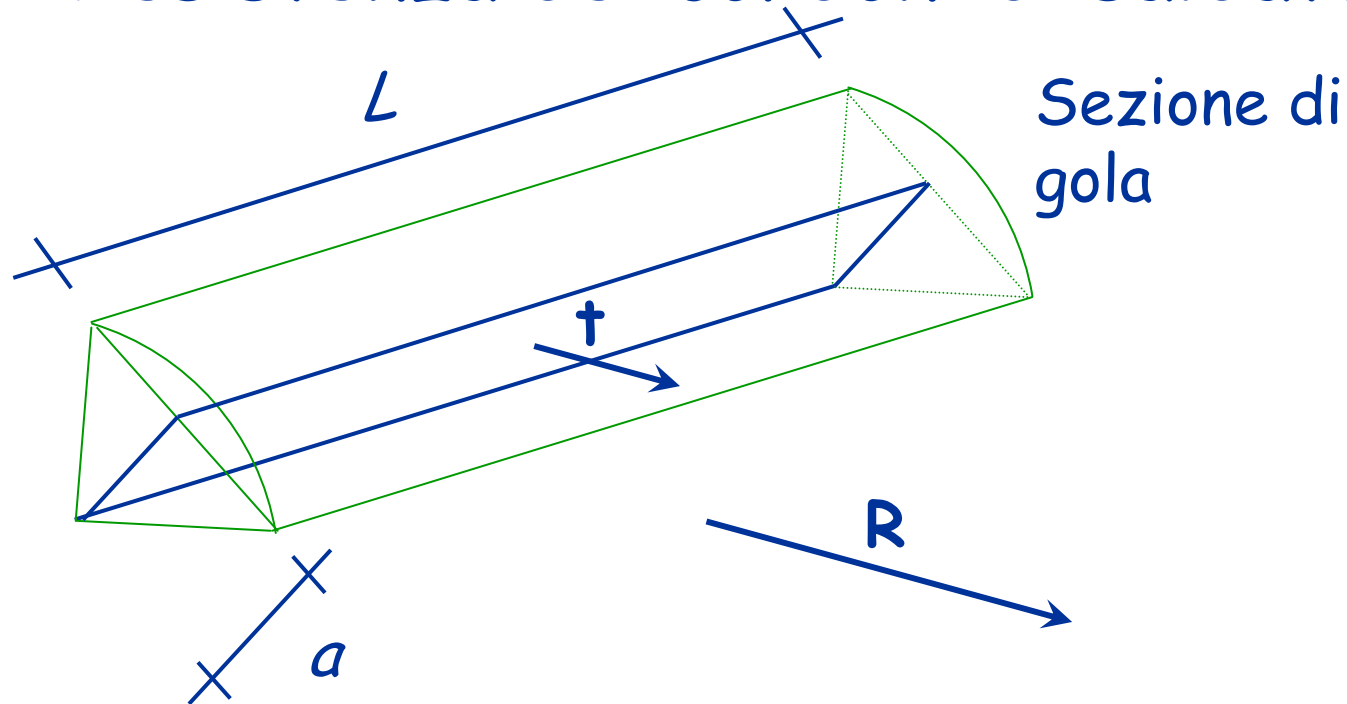
$R$

Forza agente sul cordone d'angolo



# Saldatura a cordoni d'angolo

## Resistenza dei cordoni di saldatura



**R**

Forza agente sul cordone d'angolo

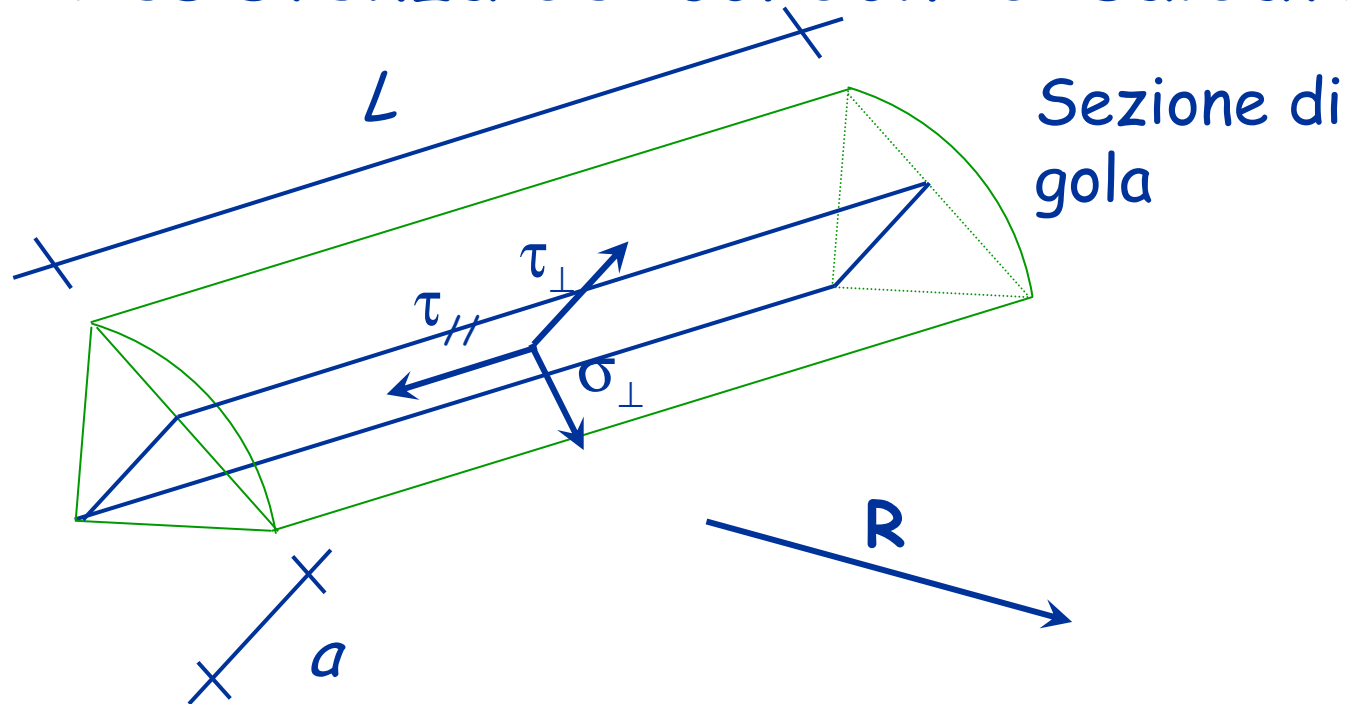
**t**

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 *peroide*

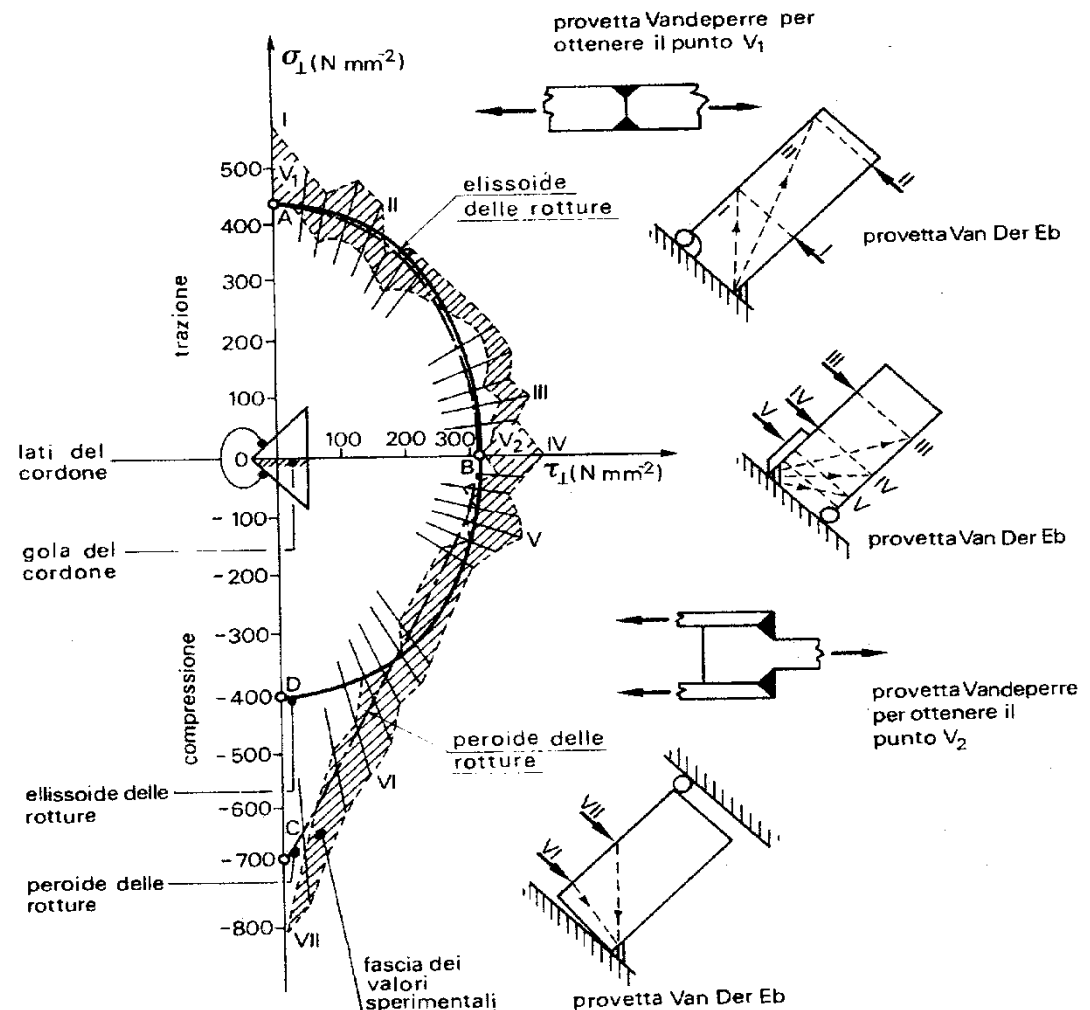
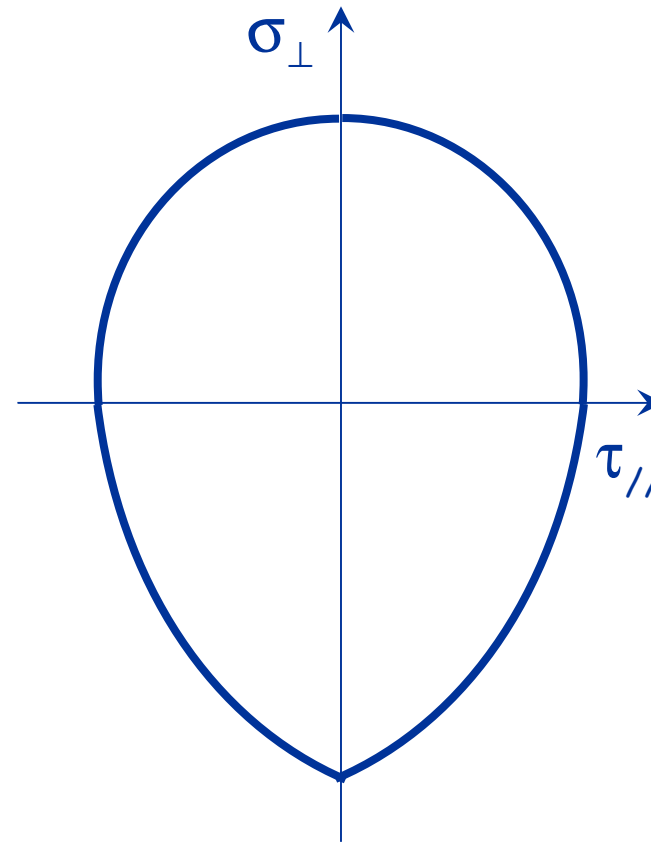
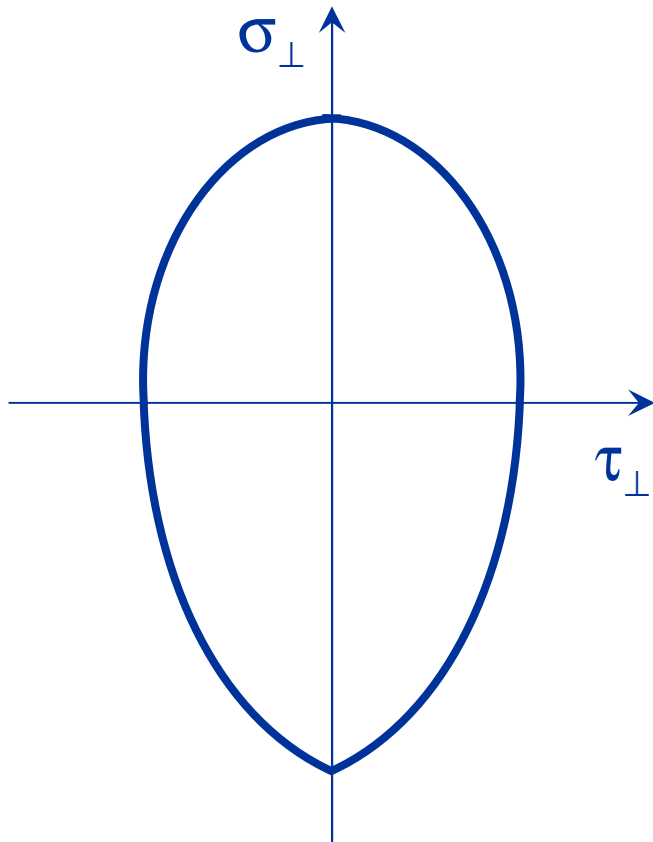


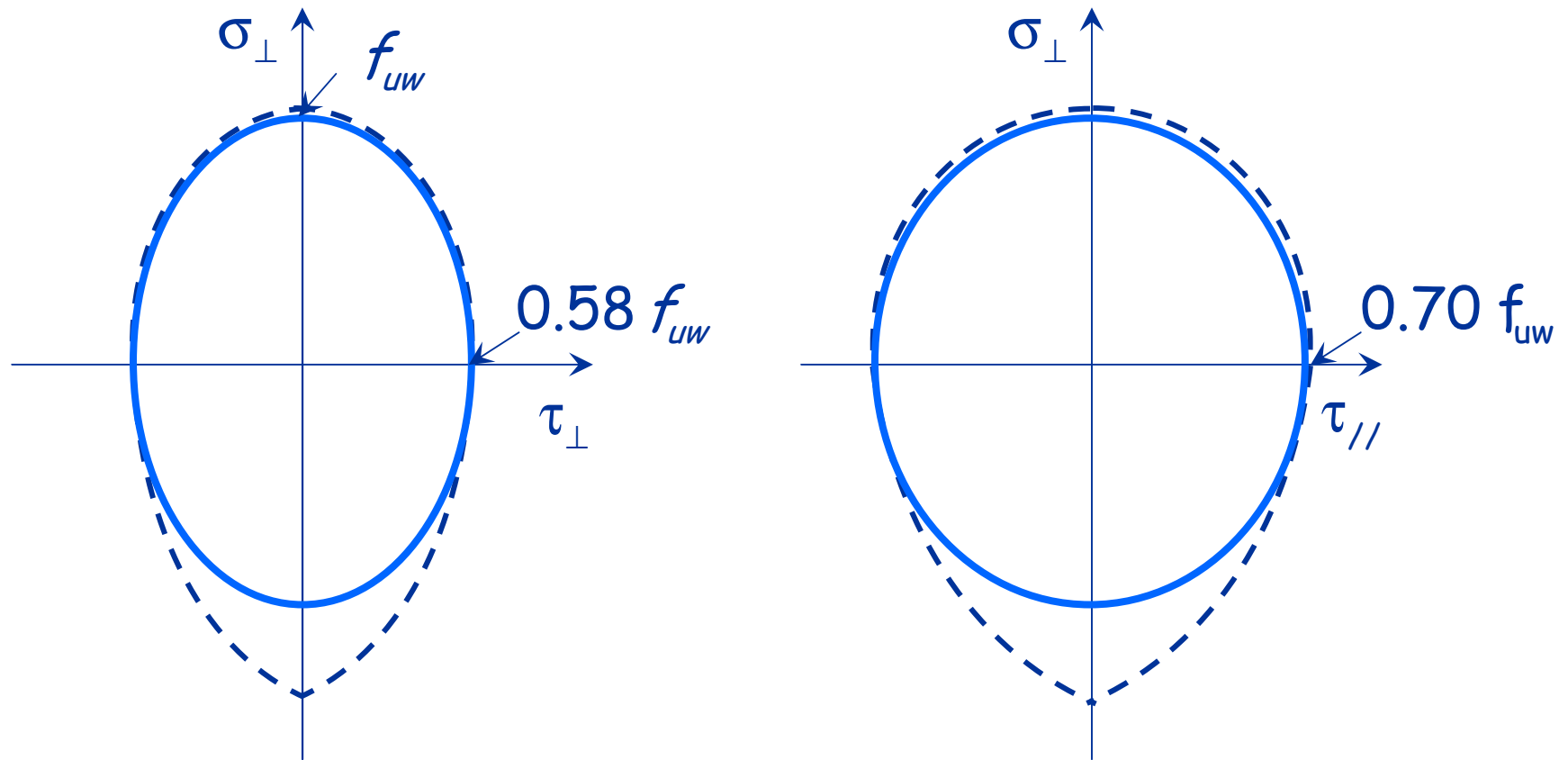
Figura tratta Da Ballio, Mazzolani. Strutture in acciaio

# Dominio di resistenza sperimentale Peroide



# Domini di resistenza analitici

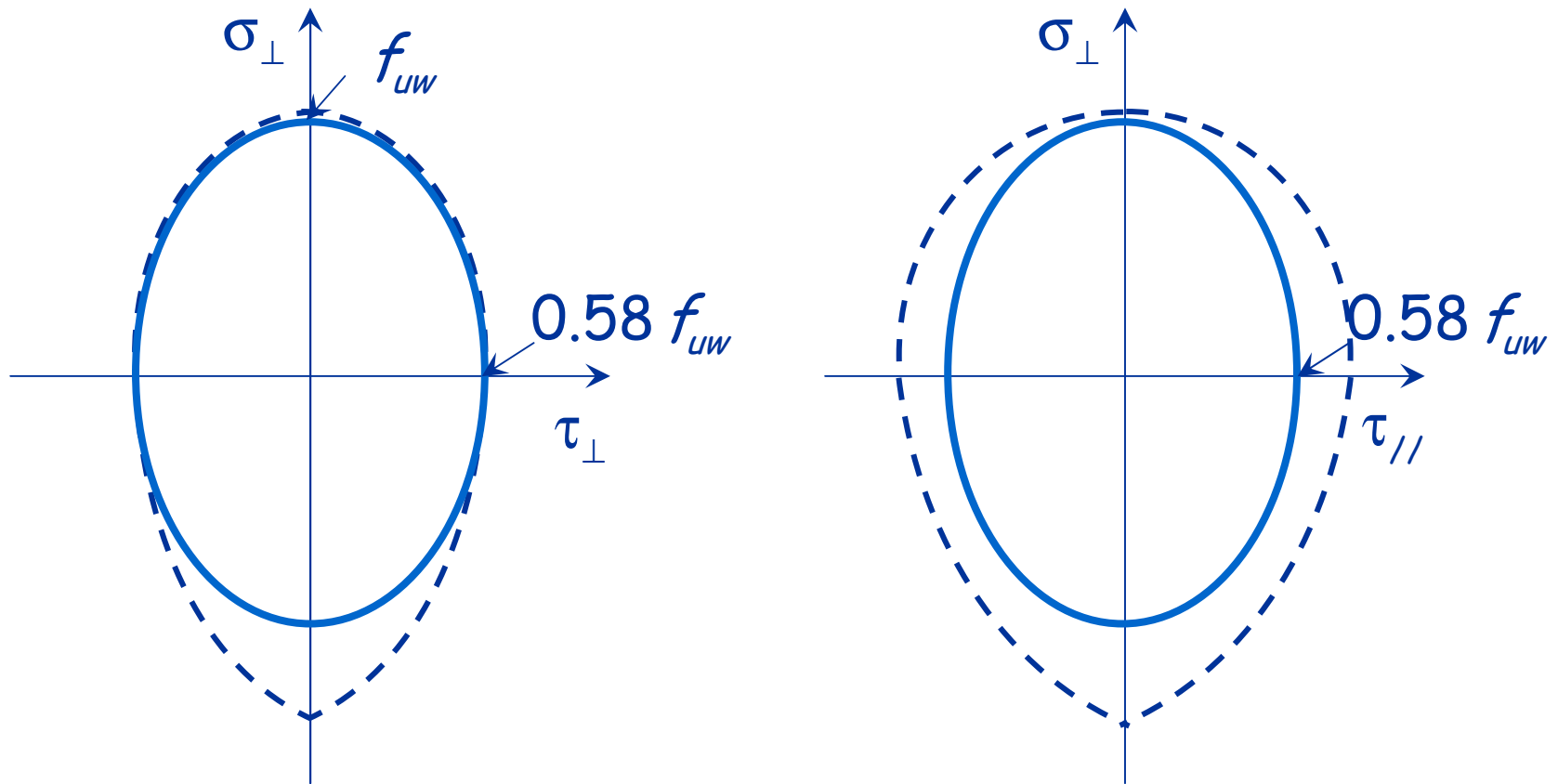
## Ellissoide



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

# 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

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

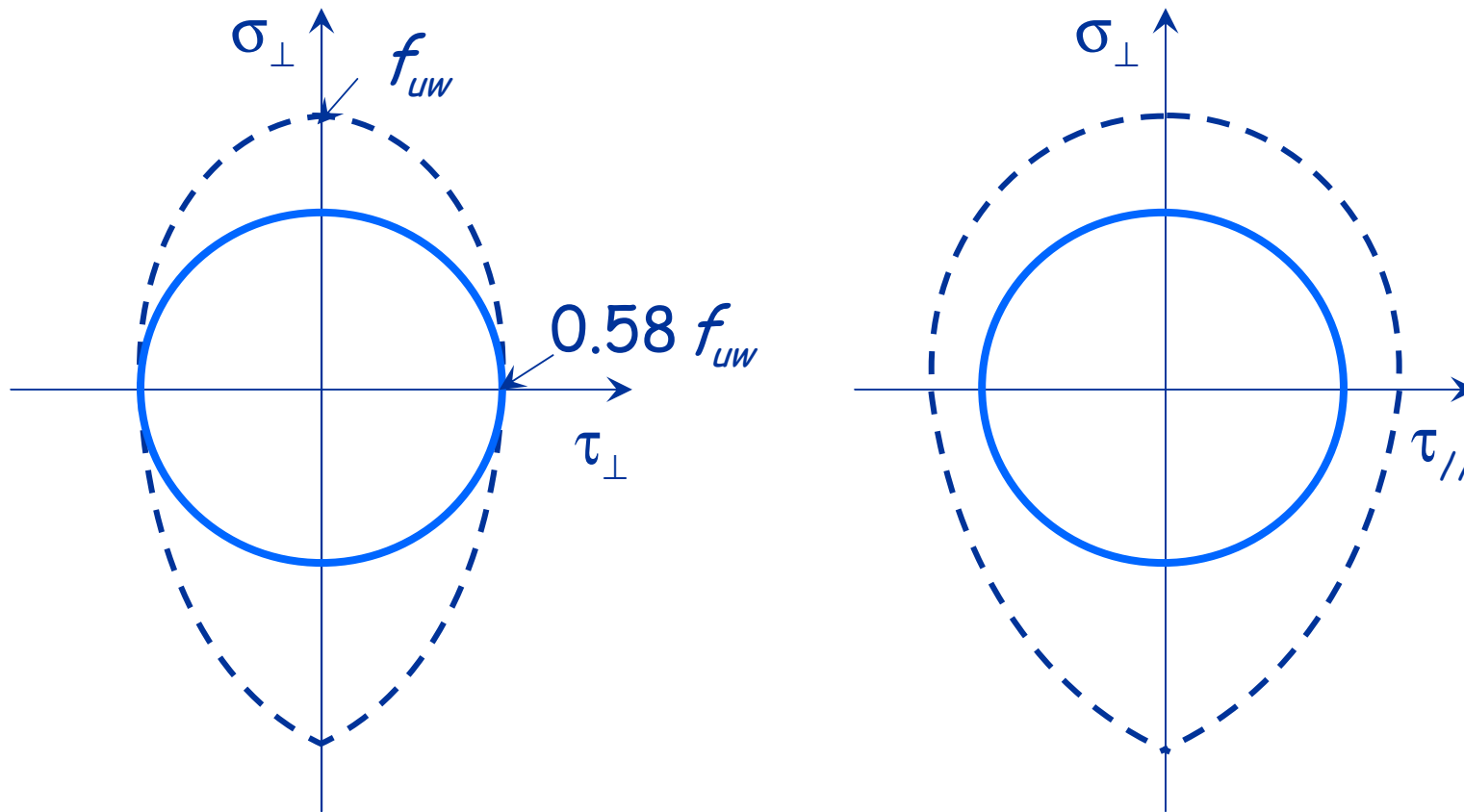
$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{f_{uw}^2} + \frac{\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2}{(0.58 f_{uw})^2} \leq 1$$

**Svantaggio:**

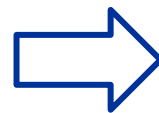
Bisogna calcolare le componenti della tensione  $t$  rispetto al sistema di riferimento della sezione di gola  $\sigma_{\perp}$ ,  $\tau_{\perp}$  e  $\tau_{//}$

# Domini di resistenza

## Dominio sferico



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

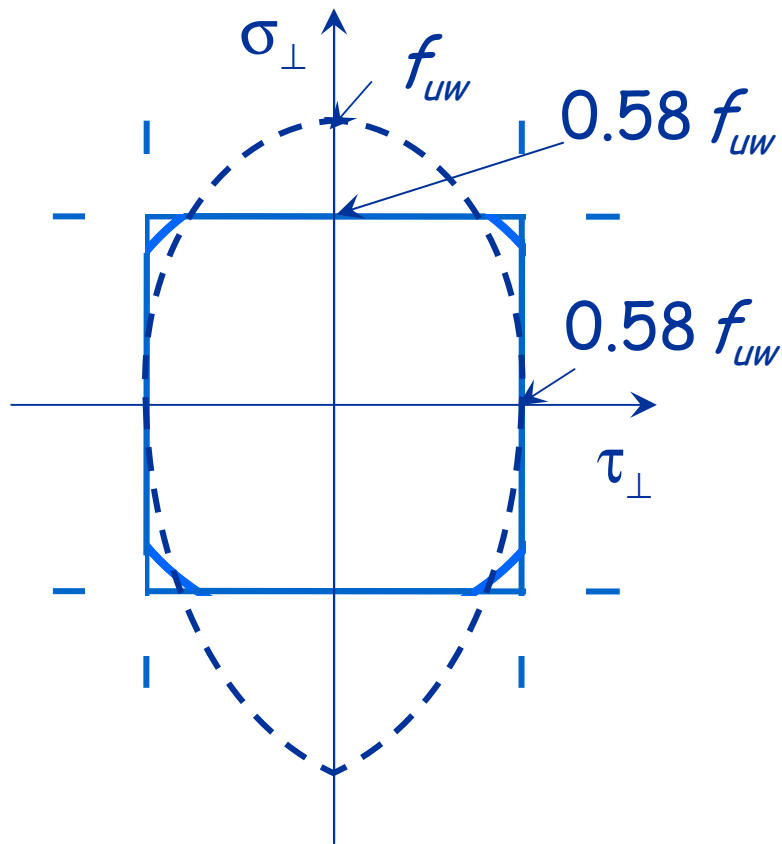


$$\tau \leq 0.58 f_{uw}$$



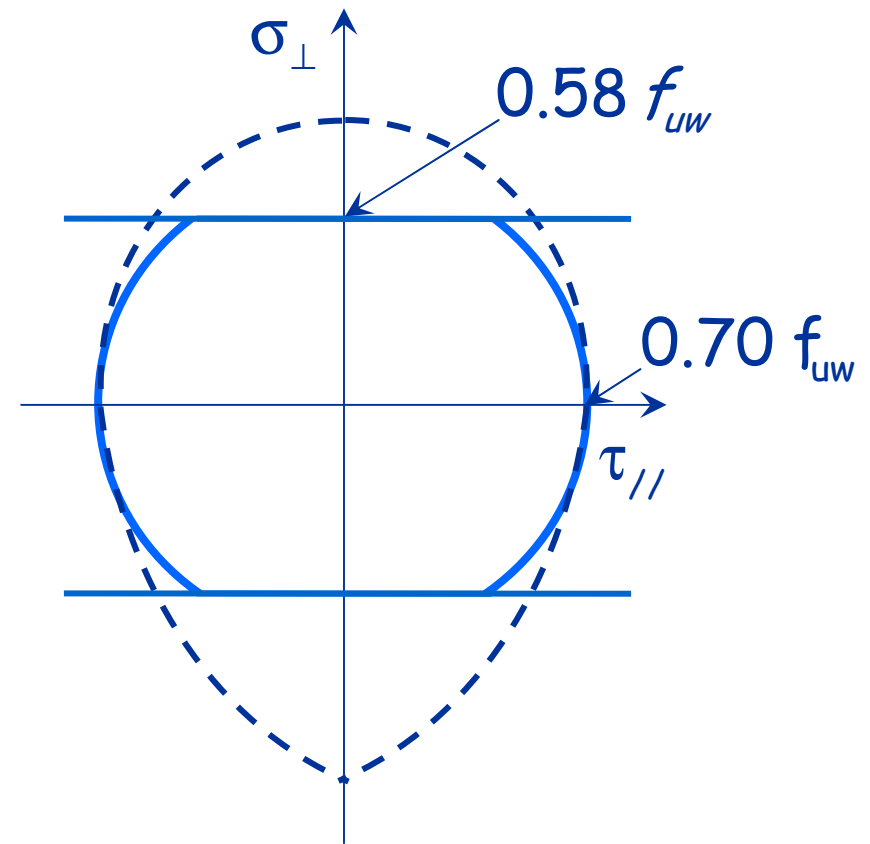
# Domini di resistenza

## Sfera mozza



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

Inoltre ...

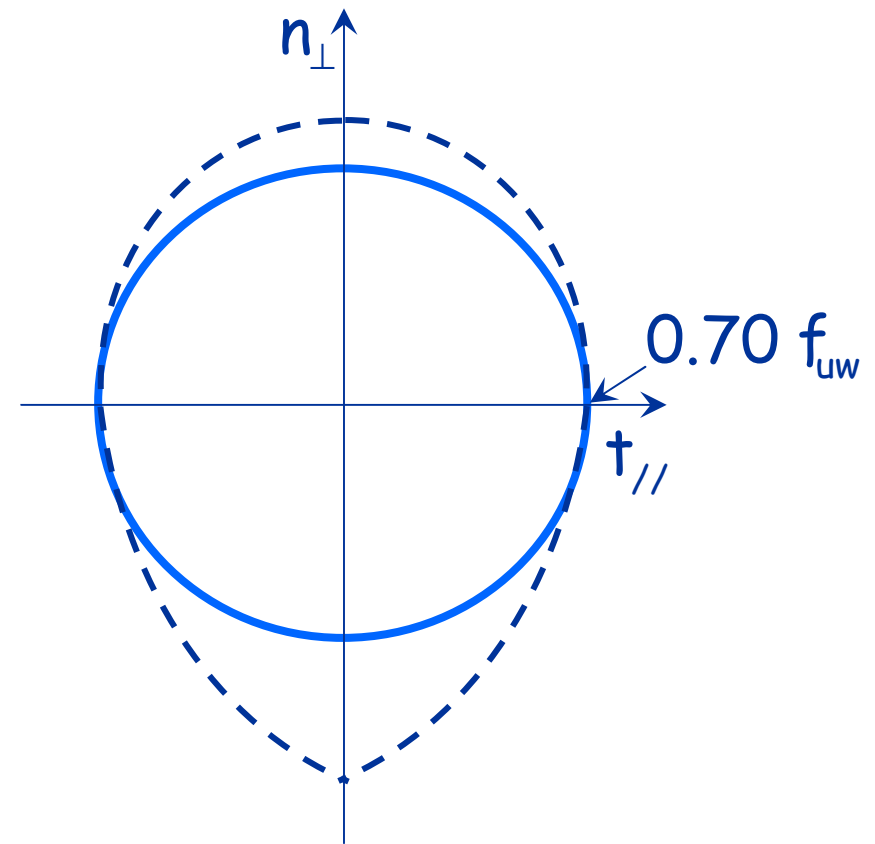
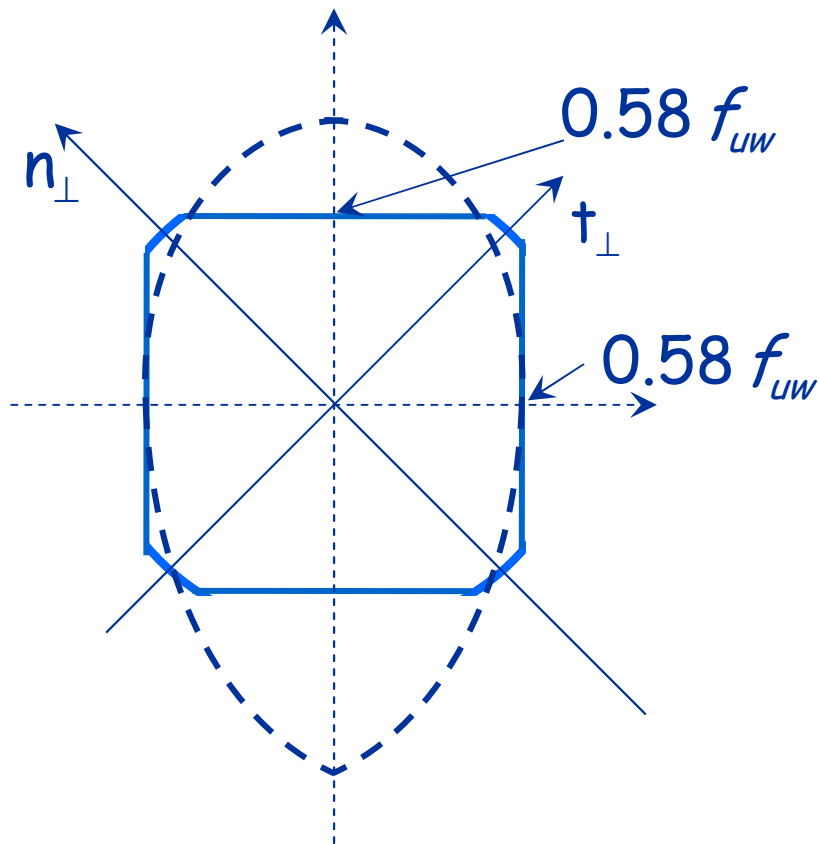


$$\sigma_{\perp} \leq 0.58 f_{uw}$$

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

# Domini di resistenza

## Sfera mozza

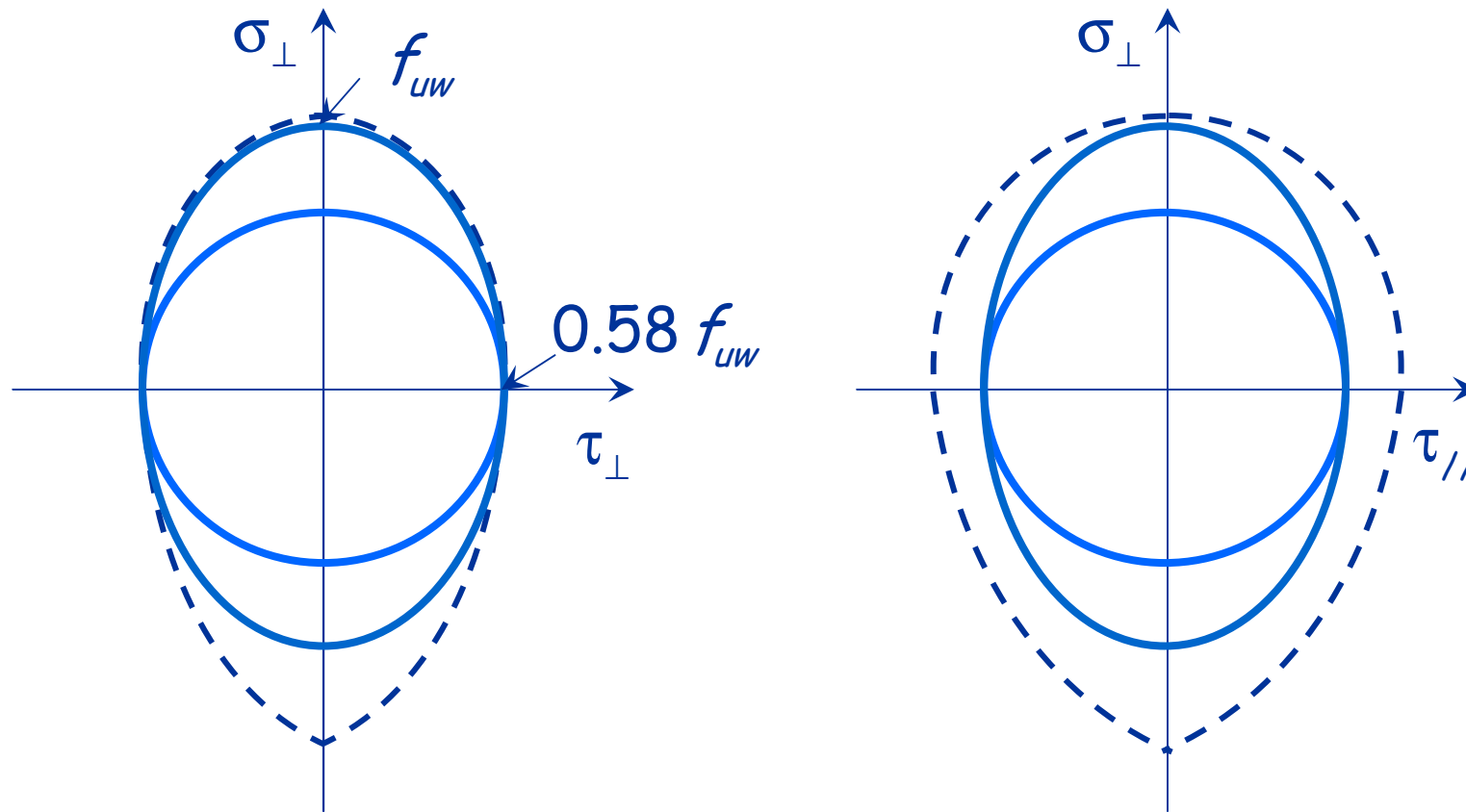


$$\frac{n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2 + t_{//}^2}{(0.70 f_{uw})^2} \leq 1$$

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

$\beta_w$  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

$\beta_w$  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

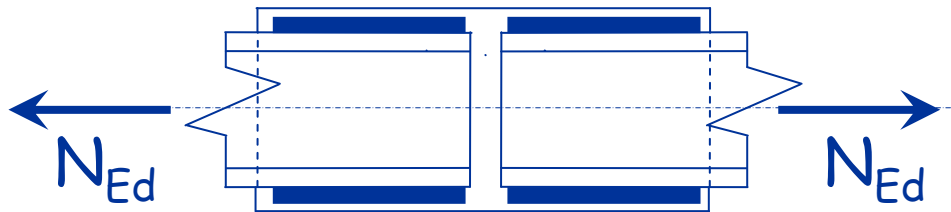
Lunghezza efficace:

- 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

EN 1993, parte 1-8, punto 4.51 e 4.5.2

# Esempio

Dati:



$N_{Ed}$   
4 Cordon  
(per lato)  
Acciaio

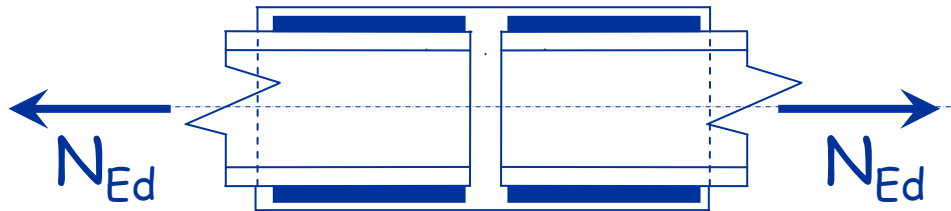
150 kN  
 $a = 3 \text{ mm}$   
 $L = 80 \text{ mm}$   
S235

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)	$a = 3 \text{ mm}$
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 ...

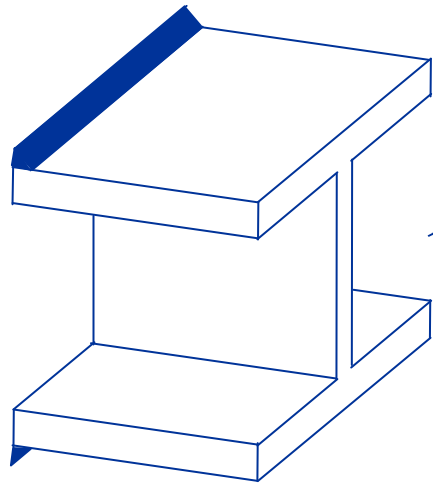
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq f_{uw} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$\beta_w$  e  $\gamma_{M2}$  hanno lo stesso significato fisico ed assumono gli stessi valori mostrati nel caso di dominio sferico

NTC08, punto 4.2.8.2.1

# Esempio

Dati:



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

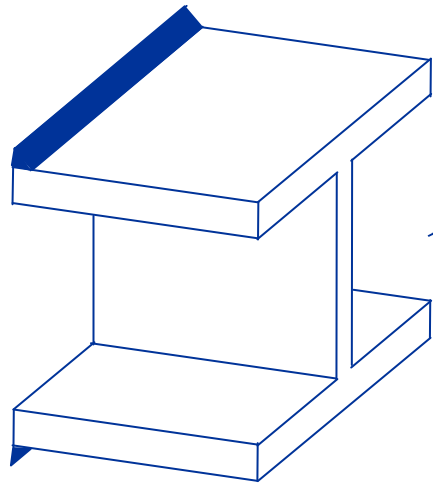
1 - Determinazione delle tensioni dovute al taglio

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

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

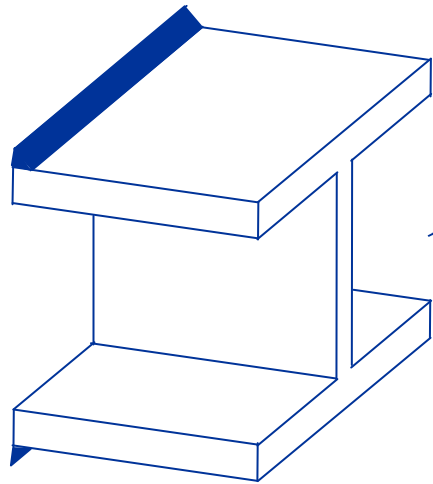
1 - Determinazione delle tensioni dovute al taglio

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

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

# Esempio

Dati:



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

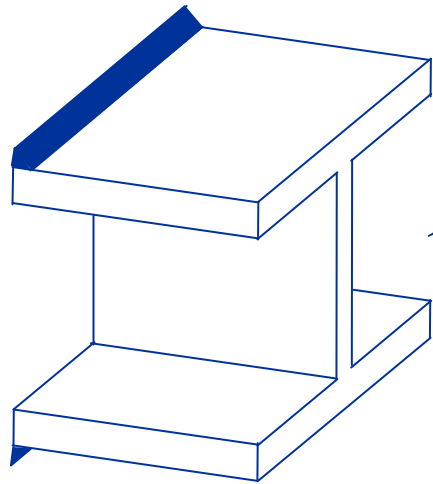
## 2 - Determinazione delle tensioni dovute al Momento

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

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

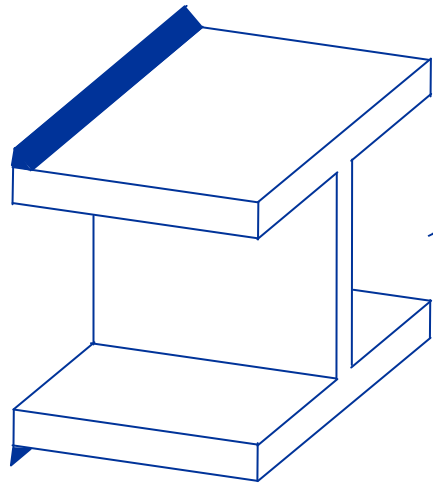
2 - Determinazione delle tensioni dovute al Momento

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

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

# Esempio

Dati:



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

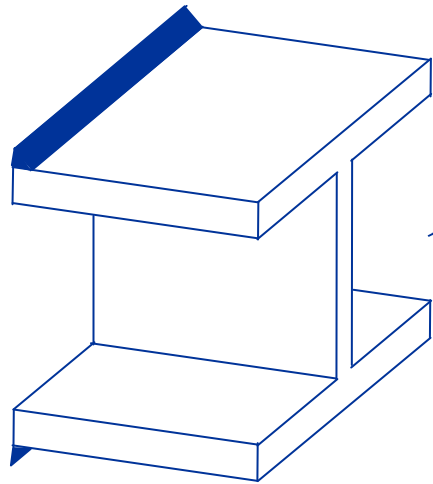
## 3 - Determinazione delle tensioni totali

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

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

# Esempio

Dati:



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

## 4 - Verifica

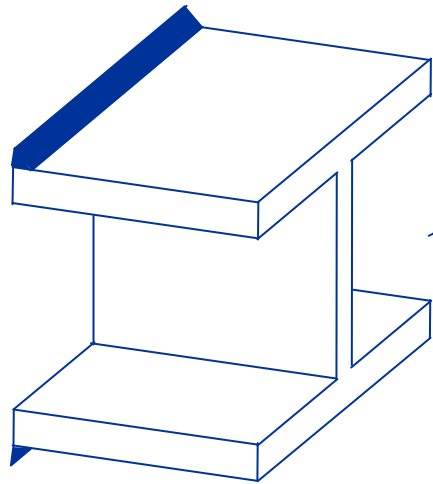
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2} = \sqrt{176.1^2 + 3 \times 130.3^2} = 286.3 \text{ MPa}$$

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

I cordoni sono verificati

# Esempio

Dati:



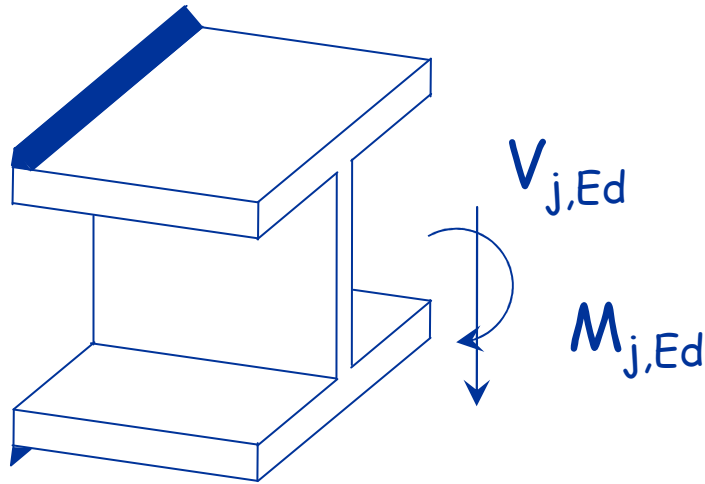
$V_{Ed}$	70 kN
$M_{Ed}$	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$
	$L = 180 \text{ mm}$

E se avessi eseguito la verifica con il dominio sferico?



# Esempio

Dati:



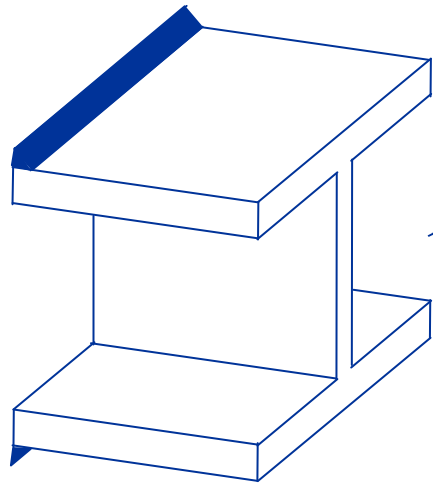
$V_{Ed}$	70 kN
$M_{Ed}$	40 kNm
Acciaio	S235
Asta	HEA 180
Cordoni	$a = 6 \text{ mm}$
	$L = 180 \text{ mm}$

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

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

# Esempio

Dati:



$V_{Ed}$	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

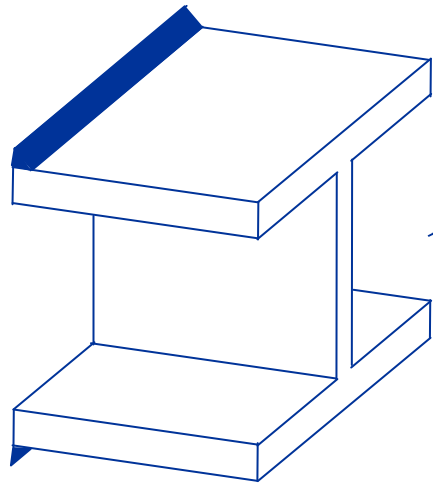
$$F_V = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ kN}$$

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

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

# 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:

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

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

$\beta_1$  e  $\beta_2$     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