www.dii.unipd.it

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale

VERIFICHE STATICHE E A FATICA DI GIUNZIONI SALDATE IN LEGA DI ALLUMINIO SECONDO EUROCODICE 9

Tutor universitario: Prof. Alberto Campagnolo

Laureando*: Emanuele Badesso*

Matricola: 2003782

Padova, 22/09/2025

INTRODUZIONE

www.dii.unipd.it

La relazione si prefigge l'obiettivo di presentare e confrontare i metodi di verifica statica e a fatica di giunzioni saldate in alluminio secondo le principali norme di progettazione adottate in Italia e in ambito internazionale nel corso degli anni ed evidenziarne analogie e differenze con quella relativa alle strutture in acciaio.

Le normative studiate e confrontate in ordine cronologico sono:

- UNI 8634 «Strutture di leghe di alluminio: istruzioni per il calcolo e l'esecuzione», norma italiana del 1985 e ritirata nel dicembre del 2008;
- UNI 10011 «Costruzioni in acciaio, istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione», norma italiana entrata in vigore nel 1988;
- EN 1999 «Eurocodice 9: Progettazione di strutture in lega di alluminio», normativa europea del 2008 che sostituisce per intero la UNI 8634.

I METODI DI VERIFICA: MTA VS MSL

www.dii.unipd.it

1) Metodo delle tensioni ammissibili → metodo deterministico (approccio lineare, non tiene conto della variabilità dei carichi)

$$\sigma_{id} \leq \sigma_{adm}$$

2) Metodo degli stati limite → metodo semi-probabilistico (più complesso ma più sicuro e realistico)

$$E_{d_j} \leq R_{d_j}$$

VERIFICHE DI RESISTENZA STATICA: UNI 8634

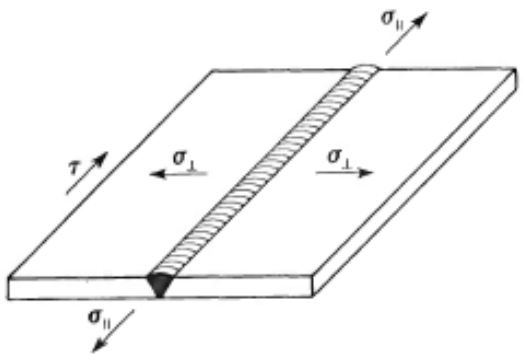
www.dii.unipd.it

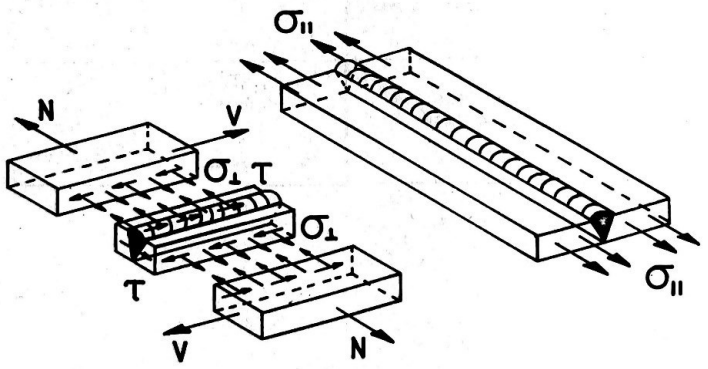
1) Calcolo della resistenza di progetto → $f_{d,w} = \eta_{w,MIN} \cdot f_{d,RED}$ e $f_{d,w} = \eta_{w,MIN} \cdot f_{d,0}$

2) Individuazione della sezione resistente

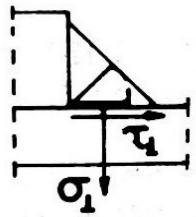
3) Calcolo dello stato tensionale → $\tau_\perp$, $\sigma_\perp$, $\tau_\parallel$, $\sigma_\parallel$

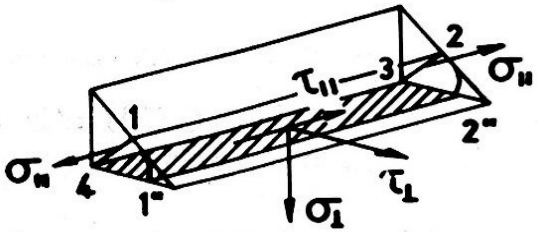
a)





b)

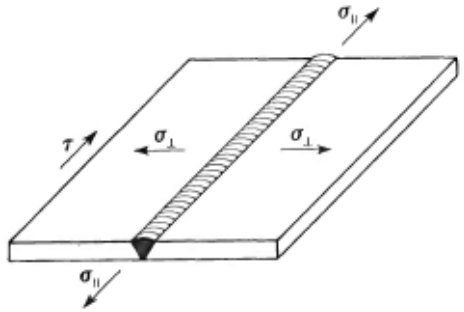




VERIFICHE DI RESISTENZA STATICA: UNI 8634

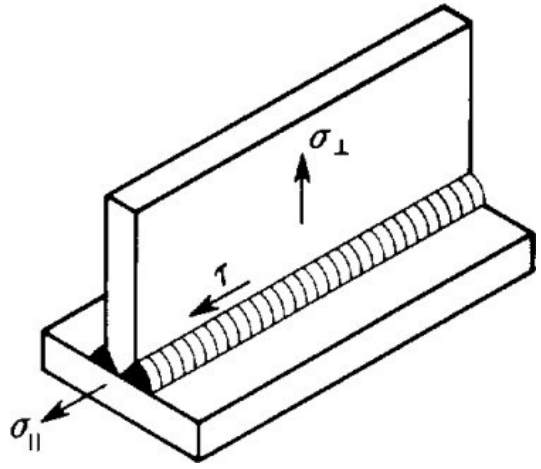
www.dii.unipd.it

4) Esecuzione della verifica



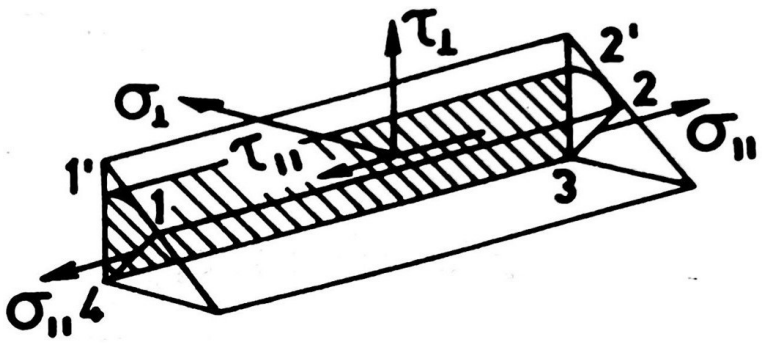
- Giunti testa a testa e a T a completa penetrazione

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp}\,\sigma_{\parallel} + 3\tau_{\parallel}^2} \leq \sigma_{adm}$$



- Giunti a cordone d'angolo
  ad esempio caso generale: $\tau_{\perp}$ e $\tau_{\parallel}$

$$\left[\frac{\tau_{\perp}}{\tau_{adm,w}}\right]^2 + \left[\frac{\tau_{\parallel}}{0{,}85\tau_{adm,w}}\right]^2 \leq 1$$



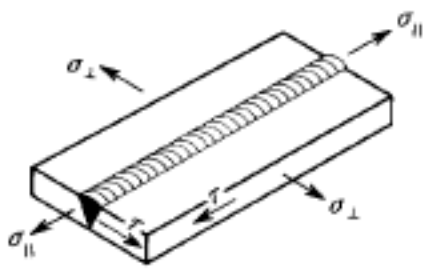
VERIFICHE DI RESISTENZA STATICA: UNI 10011

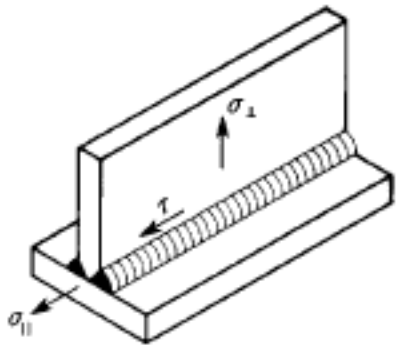
www.dii.unipd.it

Stessa procedura della UNI 8634, cambiano solamente le relazioni di verifica:

- Giunti testa a testa e a T a completa penetrazione

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_\perp^2 + \sigma_\parallel^2 - \sigma_\perp \sigma_\parallel + 3\tau_\parallel^2} \leq \sigma_{adm}$$





- Giunti a cordone d'angolo

Ad esempio caso generale con $\sigma_\perp$, $\tau_\perp$ e $\tau_\parallel$:

- Verifica agli stati limite:
  - Tre componenti di tensione $(\tau_\perp, \tau_\parallel, \sigma_\perp)$:

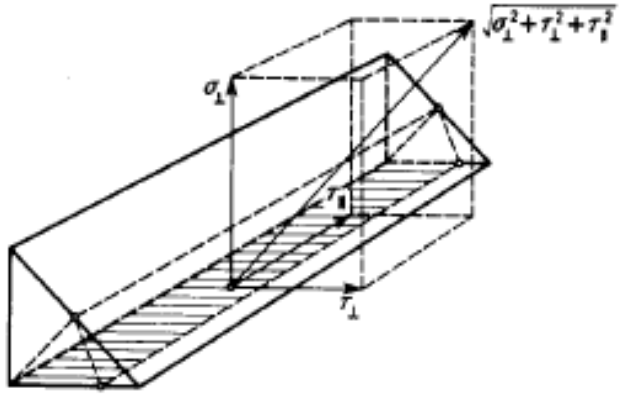
$$\sqrt{\tau_\perp^2 + \sigma_\perp^2 + \tau_\parallel^2} \leq \begin{cases} 0{,}85\, f_d \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0{,}70\, f_d \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510} \end{cases}$$

$$|\tau_\perp| + |\sigma_\perp| \leq \begin{cases} f_d \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0{,}70\, f_d \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510} \end{cases}$$

- Verifica alle tensioni ammisibili:
  - Tre componenti di tensione $(\tau_\perp, \tau_\parallel, \sigma_\perp)$:

$$\sqrt{\tau_\perp^2 + \sigma_\perp^2 + \tau_\parallel^2} \leq \begin{cases} 0{,}85\, \sigma_{adm} \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0{,}70\, \sigma_{adm} \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510} \end{cases}$$

$$|\tau_\perp| + |\sigma_\perp| \leq \begin{cases} \sigma_{adm} \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0{,}70\, \sigma_{adm} \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510} \end{cases}$$



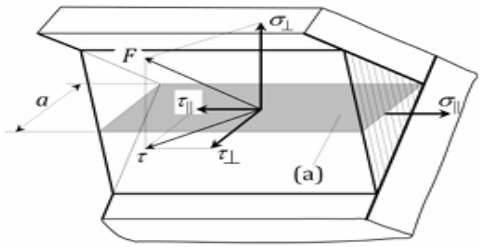
VERIFICHE DI RESISTENZA STATICA: EUROCODICE 9

www.dii.unipd.it

L'Eurocodice 9 riporta due verifiche che devono allo stesso tempo essere soddisfatte:

1) Verifica della sezione resistente:

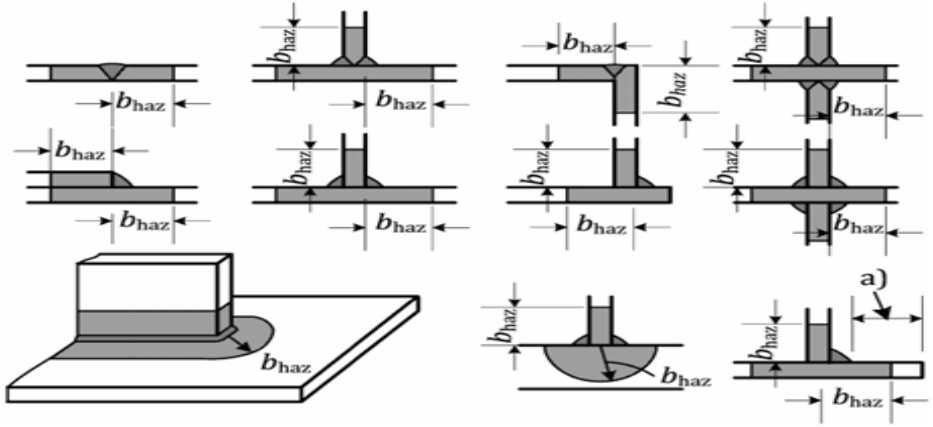
- Metodo direzionale → $\sqrt{\sigma_{\perp Ed}^2 + 3(\tau_{\parallel Ed}^2 + \tau_{\perp Ed}^2)} \leq \frac{f_\omega}{\gamma_{M_W}}$



- Metodo semplificato → $F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$

2) Verifica della HAZ (zona termicamente alterata, molto severa):
Caso generale con taglio e sforzo normale

$$\sqrt{\sigma_{HAZ,Ed}^2 + 3(\tau_{HAZ,Ed}^2)} \leq \frac{f_{u,HAZ}}{\gamma_{M_W}}$$

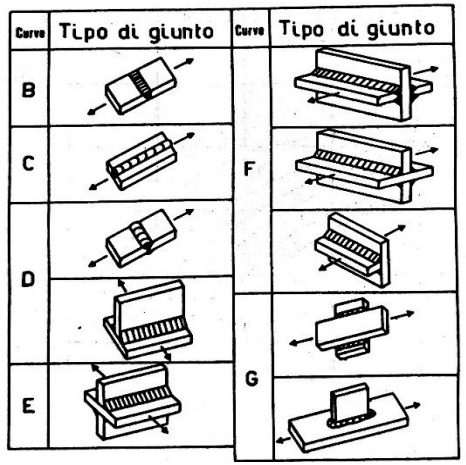


La severità della zona è mostrata da due fattori di riduzione: $\rho_{0,HAZ} = \frac{f_{0,HAZ}}{f_0}$ e $\rho_{u,HAZ} = \frac{f_{u,HAZ}}{f_u}$

VERIFICHE DI RESISTENZA A FATICA: UNI 8634

1) Identificazione della classe del particolare strutturale

f(concentrazione delle tensioni)



2) Scelta del metodo di verifica (distinzione tra cicli ad ampiezza costante e variabile)

a) <u>metodo diretto</u>

$$|\sigma_{max}| \leq \frac{f_{d,\mu}}{\nu}$$

Diagrammi

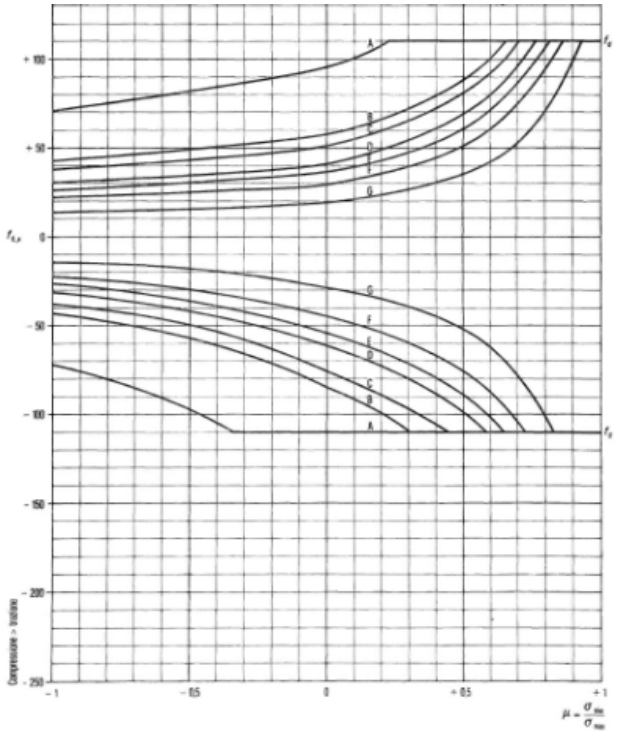


Tabelle (esempio gruppo D)

μ	$n = 10^5$						$n = 6 \times 10^5$						$n = 2 \times 10^6$						$n = 2 \times 10^7$					
	P-Al Mg4,4 P-Al Mg4,5		P-Al Mg Si1 Mn P-Al Mg1 Si Cu		P-Al Zn4,5 Mg		P-Al Mg4,4 P-Al Mg4,5		P-Al Mg Si1 Mn P-Al Mg1 Si Cu		P-Al Zn4,5 Mg		P-Al Mg4,4 P-Al Mg4,5		P-Al Mg Si1 Mn P-Al Mg1 Si Cu		P-Al Zn4,5 Mg		P-Al Mg4,4 P-Al Mg4,5		P-Al Mg Si1 Mn P-Al Mg1 Si Cu		P-Al Zn4,5 Mg	
	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C
−1	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
−0,8	65,5	69,0	65,5	69,0	65,5	69,0	43,0	45,5	43,0	45,0	43,0	45,5	32,5	34,5	32,5	34,5	32,5	34,5	28,5	30,0	28,5	30,0	28,5	30,0
−0,6	69,0	78,0	69,0	78,0	69,0	78,0	45,5	51,5	45,5	51,5	45,5	51,5	34,5	39,0	34,5	39,0	34,5	39,0	30,0	34,0	30,0	34,0	30,0	34,0
−0,4	73,0	89,0	73,0	89,0	73,0	89,0	48,5	58,5	48,5	58,5	48,5	58,5	36,5	44,5	36,5	44,5	36,5	44,5	32,0	38,5	32,0	38,5	32,0	38,5
−0,2	78,0	103,5	78,0	103,5	78,0	103,5	51,5	68,5	51,5	68,5	51,5	68,5	39,0	51,5	39,0	51,5	39,0	51,5	34,0	45,0	34,0	45,0	34,0	45,0
0	83,0	110,0	83,0	110,0	83,0	124,5	54,5	82,0	54,5	82,0	54,5	82,0	41,5	62,0	41,5	62,0	41,5	62,0	36,0	54,0	36,0	54,0	36,0	54,0
0,2	94,5	—	95,0	—	96,0	141,5	64,5	95,0	64,5	95,0	65,0	96,5	49,5	73,0	49,5	73,0	49,5	74,0	43,5	64,5	43,5	64,5	43,5	65,0
0,4	110,0	—	110,0	—	114,5	164,0	78,0	110,0	78,5	110,0	80,0	116,5	61,0	89,0	61,5	89,5	62,5	91,5	54,0	79,0	54,5	79,5	55,0	81,0
0,6	—	—	—	—	141,5	190,0	99,0	—	100,0	—	104,5	147,5	80,5	110,0	81,0	110,0	84,0	119,5	72,0	102,5	73,0	103,5	75,0	107,5
0,8	—	—	—	—	185,0	—	110,0	—	110,0	—	150,5	190,0	110,0	110,0	110,0	—	128,0	173,5	108,5	110,0	110,0	110,0	117,5	160,5
1	—	—	—	—	190,0	—	—	—	—	—	190,0	—	—	—	—	—	190,0	190,0	110,0	—	—	—	190,0	190,0

T = trazione, o trazione maggiore che compressione

C = compressione, o compressione maggiore che trazione

www.dii.unipd.it

VERIFICHE DI RESISTENZA A FATICA: UNI 8634

b) <u>metodo generale</u> (applicabile anche con cicli maggiori di 2 x 10^7)

1) Dati di resistenza da tabelle

2) Diagramma di Smith per $\mu \neq 1$

3) Costruzione curva di Wöhler

4) Verifica ipotesi di Miner

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

Gruppo	n_G	$n = n_G$ $f_{d,-1}$			f_t			f_d		
		P-Al Mg4,4 P-Al Mg4,5	P-Al Mg Si1 Mn P-Al Mg1 Si Cu	P-Al-Zn4,5 Mg	P-Al Mg4,4 P-Al Mg4,5	P-Al Mg Si1 Mn P-Al Mg1 Si Cu	P-Al Zn4,5 Mg	P-Al Mg4,4 P-Al Mg4,5	P-Al Mg Si1 Mn P-Al Mg1 Si Cu	P-Al Zn4,5 Mg
A	2×10^6	72	90	87	255	265	315	110	225	215
B	2×10^6	43						110	110	190
C	2×10^6	38						110	225	215
D	2×10^6	31						110	110	190
E	2×10^6	27						110	110	190
F	$3{,}2 \times 10^6$	20						110	110	190
G	10^7	10						110	225	215

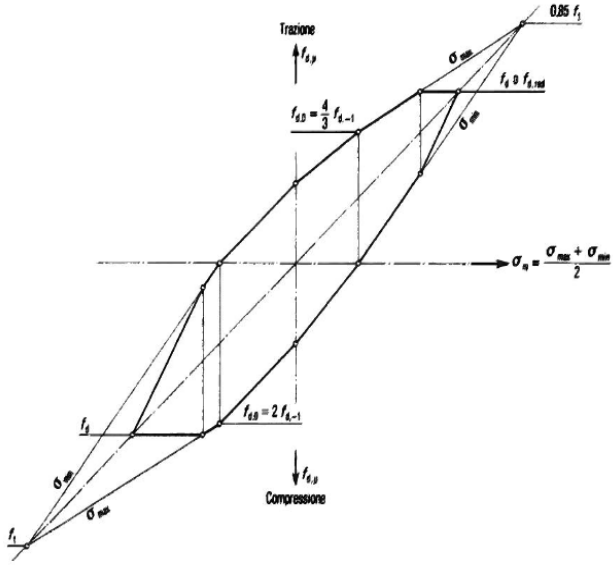
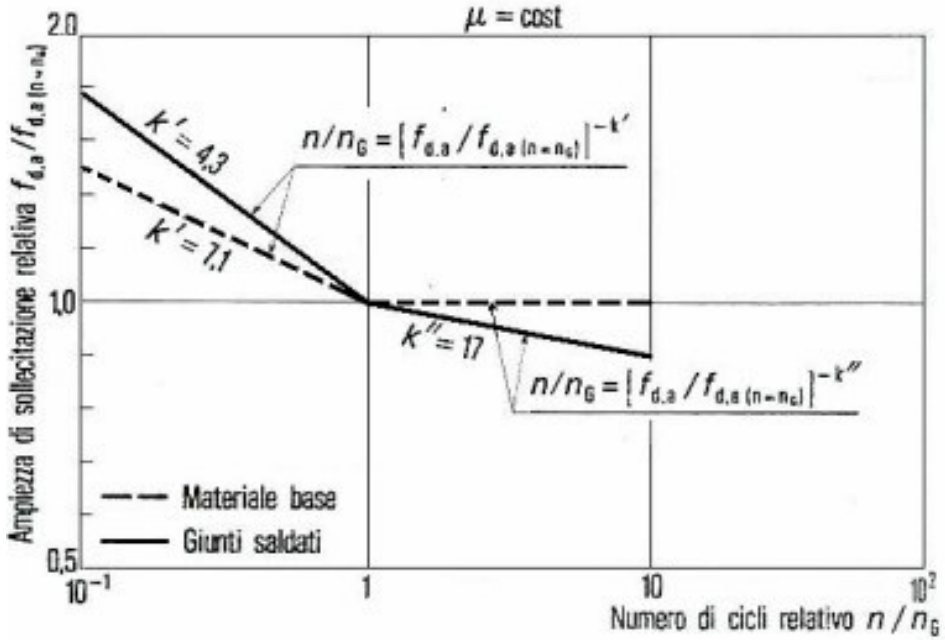


Fig. 20 — Correlazione tra $f_{d,\mu}$ e $f_{d,-1}$

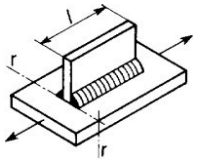


www.dii.unipd.it

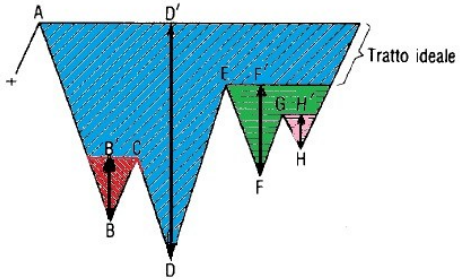
VERIFICHE DI RESISTENZA A FATICA: UNI 10011

www.dii.unipd.it

1) Classificazione $\Delta\sigma_A$ più ampia e dettagliata

Gruppo II.3 – Particolari saldati – Attacchi vari			
$\Delta\sigma_A$ N/mm^2	Particolare strutturale (rr = sezione di rottura)	Indicazioni	
80		$l \leq 50\ mm$	Estremità di irrigiditori longitudinali
71		$50\ mm < l \leq 100\ mm$	
56		$100\ mm < l$	

2) Conoscenza dell'istogramma di carico normalizzato → metodo del serbatoio



3) Curva di Wöhler

4) Modifica curva di Wöhler → $\Delta\sigma_A^* = f(\text{P.S., dimensioni, trattamenti termici})$

5) Verifica di resistenza a fatica → $\sum_i \frac{n_i}{n_i^*} \leq 1$

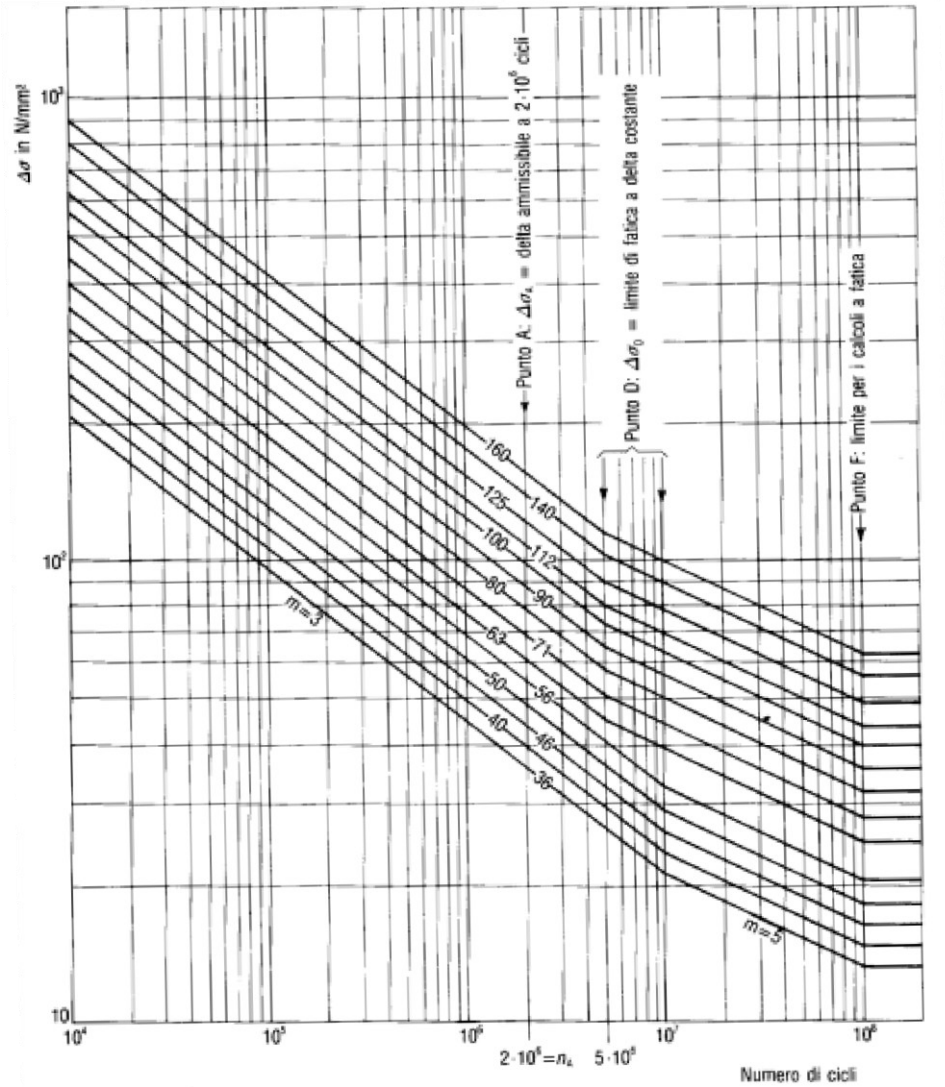
VERIFICHE DI RESISTENZA A FATICA: UNI 10011

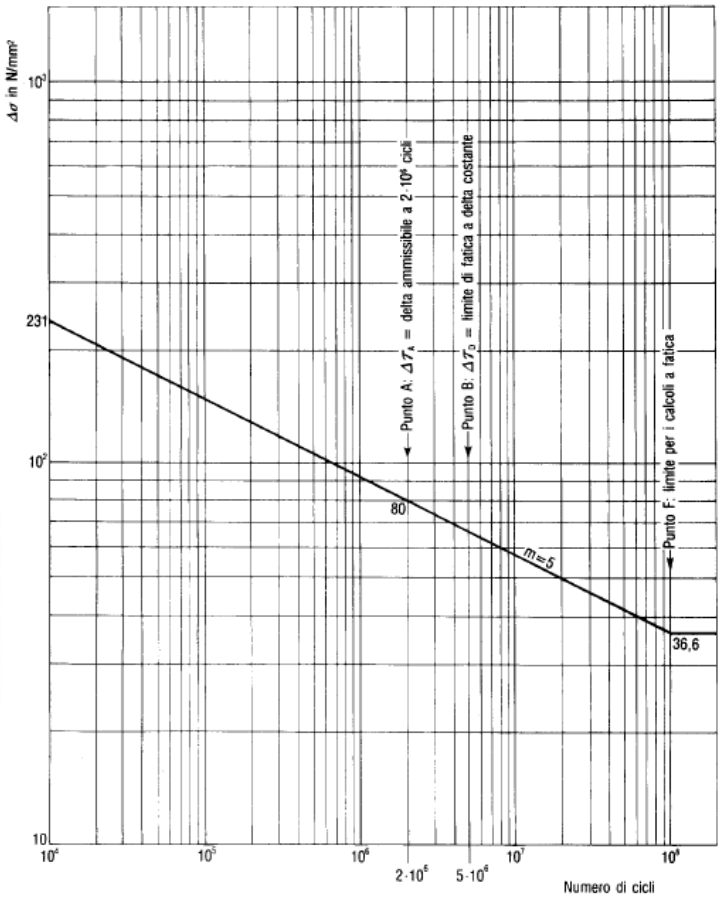
www.dii.unipd.it

Caratteristiche curva di Wöhler:

- punti A, D, F
- pendenze costanti
- limiti di fatica

$$\boxed{\Delta\sigma_i^m \cdot n_i = cost}$$

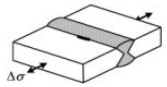




VERIFICHE DI RESISTENZA A FATICA: EUROCODICE 9

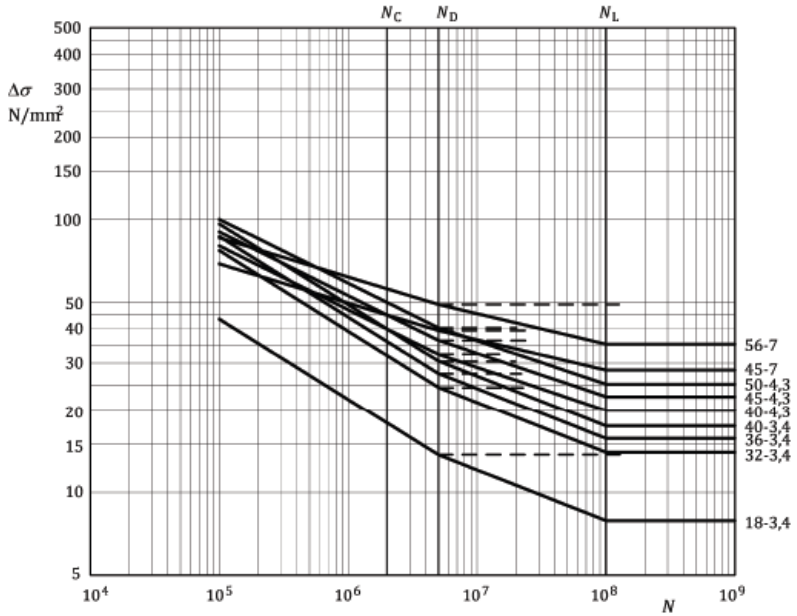
1) Classificazione dettaglio costruttivo:

- direzione della tensione
- punto d'innesco della cricca
- disposizione geometrica e dimensione

N° di riferimento del dettaglio	Classe del dettaglio costruttivo $\Delta\sigma - m_1$	Dettaglio costruttivo Punto d'innesco	Tipo di saldatura	Parti collegate	Analisi delle tensioni	Requisiti di esecuzione: Requisiti di saldatura	Livello di qualità[a]: Interna	Livello di qualità[a]: Superficie e geometria	Addizionale
7.2.1	$50 - 4{,}3$	 Piede della saldatura	Completa penetrazione su entrambi i lati	Piatti, a sezione piena	Sezione netta	b	B	B	c

a In accordo con la EN ISO 10042:2018.
b Con piastre di estensione e cordoni molati a raso in direzione dello sforzo.
c Angolo del sovraspessore ≥ 150° per entrambi i lati della saldatura.

2) Costruzione curva di Wöhler



3) Verifica di resistenza a fatica seguendo l'approccio SLD in vita sicura e basato sull'accumulo lineare del danno, ma esistono altri metodi (approccio con $\Delta\sigma_{EQ,2e}$ e secondo metodo DTD con tolleranza ai danni)

$$D_{L,d} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

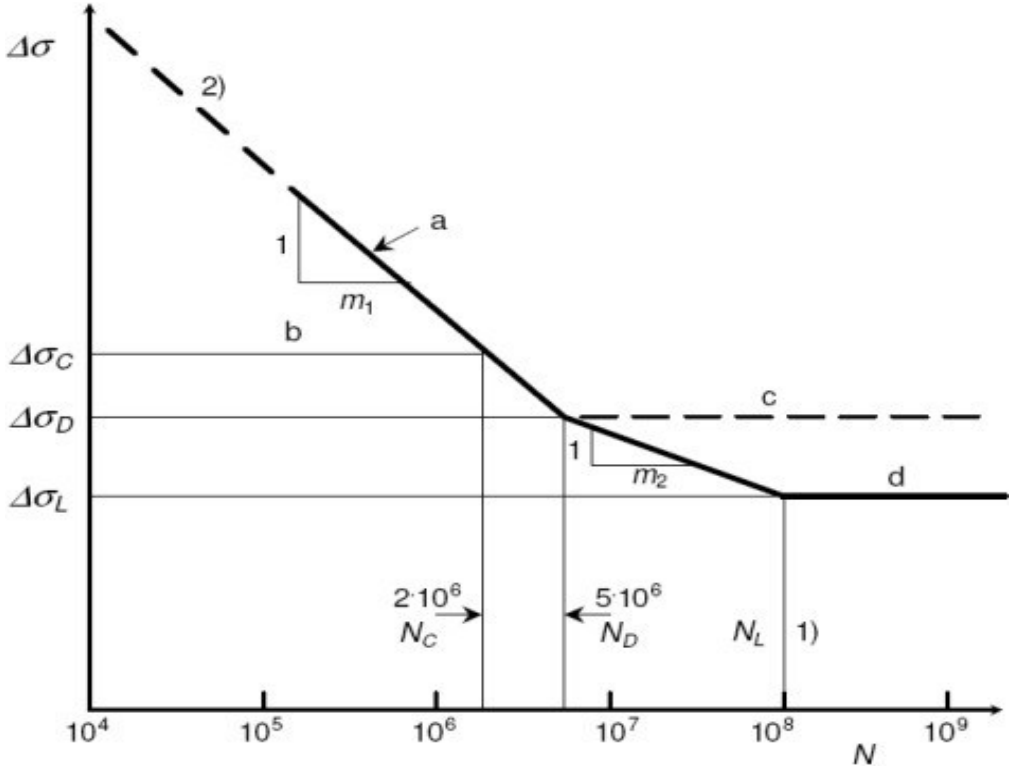
www.dii.unipd.it

VERIFICHE DI RESISTENZA A FATICA: EUROCODICE 9

www.dii.unipd.it

Caratteristiche curva di resistenza a fatica:

- punti C, D, L
- pendenze <u>non</u> costanti → $m_i = f(\text{classe})$
- limiti di fatica
- Valutazione della fatica ad alto e a basso numero di cicli (tra 10^3 e 10^5 cicli)



$$N_i = 10^5 \cdot \left(\frac{\Delta_{\sigma_c}}{\Delta\sigma_i} \cdot \frac{1}{\gamma_{F_f} \cdot \gamma_{M_f}}\right)^{m_0} 20^{\frac{m_0}{m_1}}$$

In un range tra: 10^3 e 10^5 cicli

$$N_i = (2 \cdot 10^6) \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{\mathrm{Ff}} \cdot \gamma_{\mathrm{Mf}}}\right)^{m_1}$$

10^5 e 5 x 10^6 cicli

$$N_i = (5 \cdot 10^6) \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{\mathrm{Ff}} \cdot \gamma_{\mathrm{Mf}}}\right)^{m_2} \cdot \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{m_2}{m_1}}$$

5 x 10^6 e 10^8 cicli

CONCLUSIONI

	UNI 8634	UNI 10011	EUROCODICE 9
Metodo di verifica	• MTA	• MTA • MSL	• MSL
Verifica di resistenza statica	• verifica sezione resistente (include verifica HAZ)	• verifica sezione resistente	• verifica sezione resistente • verifica HAZ
Classificazione dettagli costruttivi	• concentrazione delle tensioni	• geometria e dimensioni • direzione della tensione	• geometria e dimensioni • direzione della tensione • punto innesco cricca
Caratteristiche curva di Wöhler	• pendenza costante k'=4.3 • nessun limite di fatica • unica curva che trasla per 7 gruppi	• pendenza costante • limiti di fatica • 15 linee S-N • 2 punti angolosi: D, F	• pendenza variabile • limiti di fatica • diverse curve in base al dettaglio • 3 punti caratteristici: C, D, L
Parametri d'influenza	• classe • materiale • rapporto di sollecitazione	• classe • P.S. • effetto scala • trattamento termico di distensione	• classe • P.S.
Verifica a fatica	• regola di Miner per ampiezza variabile • no metodo del serbatoio	• regola di Miner • metodo serbatoio • metodo del Δ equivalente	• regola di Miner • metodo serbatoio • metodo del Δ equivalente

www.dii.unipd.it