

21. COLLEGAMENTI SALDATI

La saldatura è un processo che consente di collegare elementi costruttivi tra loro o con l'esterno. È un collegamento fisso e inamovibile. Da un punto di vista meccanico, le saldature possono essere considerate dei vincoli di incastro che impediscono tutti i movimenti relativi e applicano reazioni vincolari costituite da forze e momenti.

Con la *saldatura di giunzione* le parti vengono collegate mediante il cordone di saldatura costituendo l'*elemento saldato*. Diversi elementi saldati costituiscono il *gruppo saldato*, più gruppi costituiscono la *struttura o costruzione saldata*. La *saldatura di riporto*, invece, viene effettuata per la ricostruzione di superfici usurate.

Nei processi di saldatura si definiscono:

- *giunto*: il collegamento finito;
- *giunti*: gli elementi da collegare per la realizzazione del giunto;
- *lembi*: le superfici appartenenti ai giunti coinvolte nel procedimento di saldatura;
- *materiale (metallo) base*: il materiale di cui sono costituiti i giunti (acciaio, alluminio, leghe);
- *materiale (metallo) d'apporto*: il materiale non appartenente ai giunti che alcuni procedimenti di saldatura richiedono per la giunzione (il metallo d'apporto è utilizzato sotto forma di bacchette o di filo);
- *bagno di fusione*: la zona di metallo liquida che costituirà il giunto di saldatura a solidificazione avvenuta;
- *cordone*: la zona del giunto costituita dal metallo base e da quello d'apporto solidificati dopo l'operazione di saldatura;
- *cianfrinatura*: lavorazione dei lembi avente lo scopo di conferire una geometria ottimale per l'accoglimento del cordone, al fine di ottenere una estensione della saldatura all'intero spessore del giunto;
- *passata*: l'operazione di posa del cordone di saldatura (in gergo viene spesso identificata con il *cordone*);
- *penetrazione*: la profondità della zona fusa nello spessore s dei giunti;
- *zona termicamente alterata*: la zona nella quale si è avuta una modifica della struttura cristallina per il raggiungimento di una temperatura critica di trasformazione durante il processo di saldatura, avente una resistenza meccanica inferiore (tipicamente è necessario effettuare un trattamento termico per ripristinare le proprietà meccaniche);
- *ripresa*: il procedimento con il quale si completa il processo di saldatura con elettrodi, se, per l'insufficiente lunghezza di questi ultimi, non è stato completato in un'unica passata (implica la necessità di riportare a fusione l'ultimo tratto del giunto precedentemente realizzato così da avere una continuità fisica).

Il giunto può essere realizzato con una sola passata o con più passate, cioè può presentare uno o più cordoni. Il numero di passate in un giunto dipende dallo spessore degli elementi da saldare.

Esistono diverse tecniche di saldatura che si differenziano tra loro in funzione:

- delle modalità di somministrazione del calore,
- dei *materiali d'apporto* utilizzati,
- delle modalità di protezione del *bagno di fusione*.

In funzione dei materiali di apporto le saldature si possono distinguere in:

- *omogenee* nelle quali il materiale d'apporto è uguale al metallo base,
- *eterogenee* nelle quali il materiale d'apporto è diverso dal metallo base.

I procedimenti di saldatura oggi più diffusi possono essere classificati in due principali categorie:

- *saldature eterogenee* (o *brasature*), nelle quali il materiale di base non interviene attivamente e l'azione di collegamento è affidata esclusivamente al materiale d'apporto;
- *saldature autogene*, nelle quali il materiale di base partecipa attivamente al processo di saldatura, cioè anche le porzioni di materiale in prossimità delle superfici combacianti fondono assieme al materiale d'apporto.

Le saldature autogene si distinguono in

- *saldature per pressione*, nelle quali si applica una forte pressione mutua fra i lembi preventivamente portati a temperatura di fusione o di forgiatura;
- *saldature per fusione*, nelle quali la saldatura avviene semplicemente quando viene raggiunta la fusione delle parti da collegare.

La saldatura può essere effettuata sia su metalli che materie sintetiche:

- acciai,
- ghise (parzialmente),
- rame, ottone, bronzo,
- alluminio e leghe (no alluminio e magnesio),
- nichel e leghe (no nichel e ferro).

La resistenza di un collegamento saldato dipende dai seguenti fattori:

- | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1) conformazione della saldatura: | 2) sollecitazione agente: | 3) situazione ambientale: |
| • disposizione dei cordoni, | • livello delle tensioni, | • temperatura, |
| • spessore degli elementi collegati, | • pluriassialità, | • fattori di corrosione. |
| • flusso delle forze, | • velocità di sollecitazione. | |
| • effetti d'intaglio. | | |

Le caratteristiche dei collegamenti saldati, al fine del confronto con altri tipi di collegamento, sono riassunte in tab.1.

CARATTERISTICHE DEI COLLEGAMENTI SALDATI	
Caratteristiche Meccaniche	
Varie direzioni di carico ammissibili	Limitata resistenza dinamica
Elevata resistenza statica	Limitata resistenza alla corrosione
Rigidità dipendente dalla conformazione	
Buona resistenza alla temperatura	
Funzionalità	
Peso e ingombro ridotti	Non smontabile e/o riutilizzabile
Molteplicità di conformazione	Nessuna capacità di centratura
Caratteristiche operative	
Facilità di manutenzione e ispezione	Operatori esperti
Facilità di montaggio e automazione	
Caratteristiche economiche	
Basso costo	
Nessun costo di esercizio	

Tab.20.1 - Caratteristiche dei collegamenti saldati.

Giunzioni saldate

Le principali tipologie di giunzioni saldate e conformazione dei cordoni sono riportate in fig.1.

In particolare, le giunzioni *di testa* (fig.1a) sono effettuate con cordoni aventi varie forme, delle quali le più importanti sono a V, ad X (adatta per spessori elevati dei giunti) e ad U (più costosa), e usualmente sono sollecitate trasversalmente al cordone.

Le giunzioni *a sovrapposizione* sono sollecitate *trasversalmente* al cordone come in fig.1b e fig.1c o *parallelamente* come in fig.1d. Altri tipi di giunzione sono quelle *a T*, *a crociera*, *ad angolo* e *a spigolo*.

Le dimensioni caratteristiche del cordone sono riportate in fig.2.

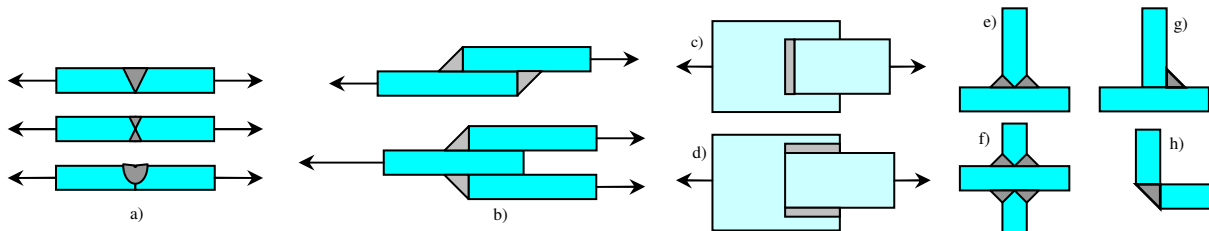


Fig.21.1 – tipi di giunzioni: a) di testa con cordone a V, X e U; b,c,d) a sovrapposizione; e) a T; f) a crociera; g) ad angolo, h) a spigolo.

Nel disegno di un collegamento saldato è bene tenere presente i seguenti accorgimenti:

- tendere alla saldatura di testa (ad esempio come in fig.1a rispetto a quella a sovrapposizione di fig.1b),
- fare in modo che gli elementi abbiano uguale spessore (per tendere alla saldatura di testa),
- se possibile non posizionare i cordoni nei punti di massima sollecitazione,
- evitare che le radici dei cordoni (la zona più sottile del cordone, ad es. il fondo della V) siano in zona tesa,
- limitare il numero dei cordoni,
- effettuare cordoni lunghi e sottili,
- evitare incroci dei cordoni,
- evitare che i cordoni siano soggetti a lavorazioni con macchine utensili (es. durante la rettifica di una superficie),
- evitare posizioni di difficile accesso dei cordoni per la loro messa in opera.

Riscaldamento e raffreddamento disomogenei possono introdurre tensioni residue nella saldatura per cui, prima della saldatura, è bene effettuare un riscaldamento uniforme delle parti da saldare, successivamente è opportuno effettuare un trattamento di distensione. Il raffreddamento è più uniforme se gli elementi sono di uguale spessore.

Si definisce efficienza della saldatura $e = \sigma_{ams} / \sigma_{am}$ il rapporto tra la tensione ammissibile della saldatura e quella degli elementi senza la saldatura per carico statico.

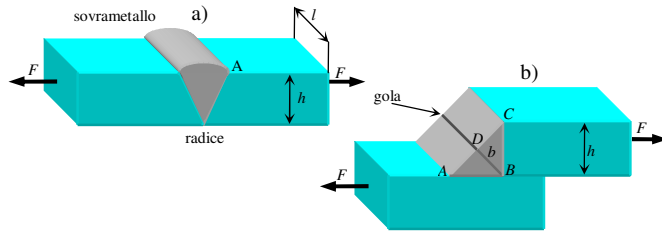


Fig.21.2 - Dimensioni caratteristiche del cordone.

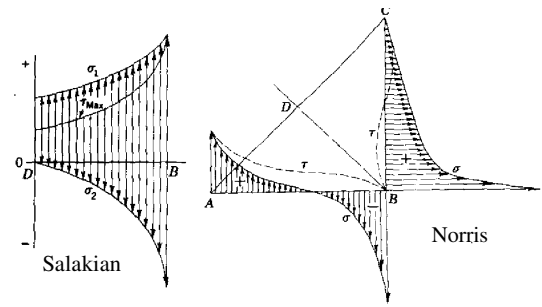


Fig. 21.3 – Tensioni agenti nelle sezioni DB, AB e CB del cordone.

Sollecitazioni nei giunti di testa

Per il dimensionamento dei cordoni si utilizzano formule approssimate ed elevati coefficienti di sicurezza ($n=3\div 4$). Le fig.1a e 2a mostrano una giunzione di testa caricata da una forza di trazione F . Per carichi di trazione o compressione la tensione normale media è:

$$\sigma = \frac{F}{hl} \quad (21.1)$$

dove h è lo spessore delle lamiera ed l è la lunghezza della saldatura. Il valore di h non include il sovrametallo che è di dimensioni variabili e produce effetti di concentrazione delle tensioni nel punto A di fig.2a. La sua presenza è influente nel caso di sollecitazioni statiche; mentre per sollecitazioni di fatica è meglio che sia eliminato.

Per carico trasversale di taglio T (agente in direzione ortogonale al piano dei giunti) la tensione tangenziale media nel giunto saldato è:

$$\tau = \frac{F}{hl} \quad (21.2)$$

In genere le formule vanno applicate con l'uso di elevati valori del coefficiente di sicurezza.

Sollecitazioni nei giunti a sovrapposizione, ad angolo e spigolo

Le saldature dei giunti a sovrapposizione, ad angolo e a spigolo hanno uno spessore trasversale rappresentato dal segmento $BD=b$ in fig.2b, la cui lunghezza è pari a

$$b = h \cos 45^\circ = 0.707 h \quad (21.3)$$

La sezione di cui il segmento b è la proiezione è definita *gola* del cordone.

In fig.3 è mostrato un esempio di distribuzione delle tensioni lungo lo spessore BD della saldatura, misurate sperimentalmente da Salakian mediante il metodo fotoelastico. Il grafico è di particolare interesse perché usualmente la rottura avviene proprio lungo la gola; la figura mostra una concentrazione di tensione nel punto B.

La fig.3 mostra anche le tensioni sui lati AB e BC della saldatura ottenute da Norris. Si osserva una concentrazione delle tensioni in A e B sul lato orizzontale e in B su quello verticale.

Poiché gli andamenti effettivi delle tensioni, delle quali quelle mostrate in fig.3 sono un esempio, non sono ottenibili in modo teorico per i vari casi reali, nel dimensionamento delle saldature si utilizza una *tensione nominale media*, ottenibile nel modo descritto nei paragrafi successivi, con elevati coefficienti di sicurezza. Per i carichi di fatica si introduce l'opportuno fattore di riduzione della resistenza per concentrazione di tensione k_f .

Carico trasversale

Assumendo una terna cartesiana con gli assi x e y paralleli ai giunti e l'asse y parallelo all'asse longitudinale del cordone (fig.4a), il carico *trasversale* agisce in direzione normale alla lunghezza del cordone, in direzione x o in direzione z (fig.1b, 1c, 4a). Tipicamente nel dimensionamento della saldatura si assume che lo spessore della sezione sia sollecitato a taglio. Come detto, poiché la tensione effettivamente agente nei punti del cordone non può essere valutata teoricamente, si considera la tensione media. In particolare, la tensione media agente in direzione x sulla sezione di gola, avente giacitura n e area $A=bl$, è data da:

$$p_n = p_{nx} = \frac{F}{A} = \frac{F}{bl} = \frac{F}{0.707 hl} = 1.414 \frac{F}{hl} \quad (21.4)$$

Le componenti normale e tangenziale corrispondenti sono date rispettivamente da:

$$\sigma_n = p \cos 45^\circ = \frac{F}{hl} \quad \tau_n = p \cos 45^\circ = \frac{F}{hl} \quad (21.5,6)$$

La tensione principale e la tangenziale massima sono rispettivamente

$$\sigma_1 = \frac{F}{2hl} + \sqrt{\left(\frac{F}{2hl}\right)^2 + \left(\frac{F}{hl}\right)^2} = 1.618 \frac{F}{hl} \quad \tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{F}{2hl}\right)^2 + \left(\frac{F}{hl}\right)^2} = 1.118 \frac{F}{hl} \quad (21.7,8)$$

Usualmente si preferisce approssimare per eccesso la tensione tangenziale utilizzando direttamente la (4). In pratica si calcola il modulo del vettore \mathbf{p}_n e si assume che la tensione tangenziale abbia lo stesso valore:

$$\tau' = \frac{F}{A} = \frac{F}{bl} \quad (21.9)$$

il valore calcolato con la (9) è definito *taglio primario* e risulta essere 1.26 volte maggiore di quello previsto dall'eq.(8), quindi conservativo. Nel caso di più cordoni nella (9) deve esserne introdotta l'area totale.

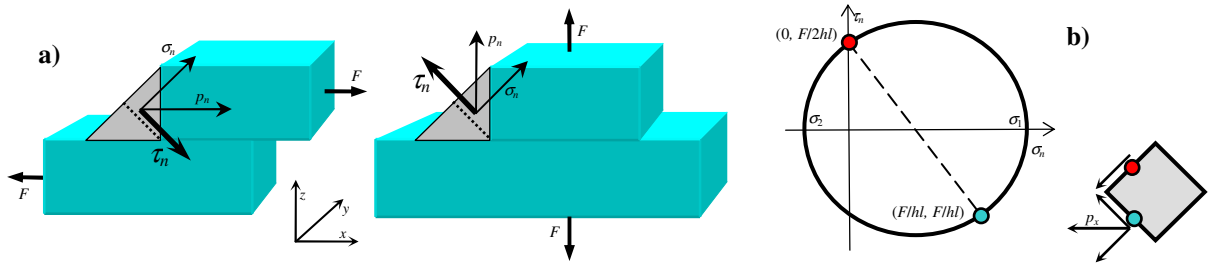


Fig.21.4 – Carico trasversale: a) tensioni medie agenti sulla gola per carico trasversale orizzontale e verticale, b) cerchio di Mohr corrispondente.

Carico parallelo

Nel caso di forza F agente in direzione parallela alla saldatura (fig.1d e fig.5) l'assunzione che la sollecitazione sia costituita da una tensione di taglio τ nella sezione di gola del cordone, agente parallelamente al cordone stesso, è più realistica. Nella realtà la distribuzione delle tensioni lungo il cordone non è uniforme e, anche in questo caso, si prende in considerazione la tensione media. È importante notare che il coefficiente di concentrazione delle tensioni di questa configurazione è il più elevato ed essa risulta meno adatta nel caso di fatica. In definitiva, la tensione tangenziale media dovuta ad una forza F agente in direzione parallela al cordone può essere ottenuta utilizzando ancora la (9).

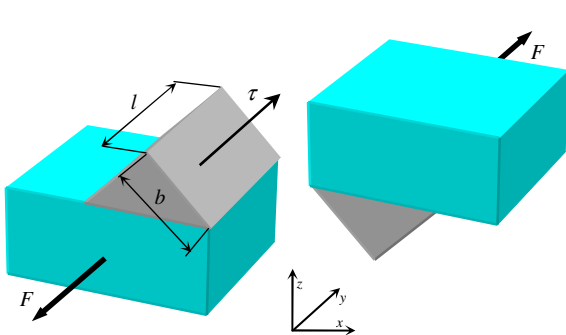


Fig.21.5 – Sollecitazione di carico parallelo.

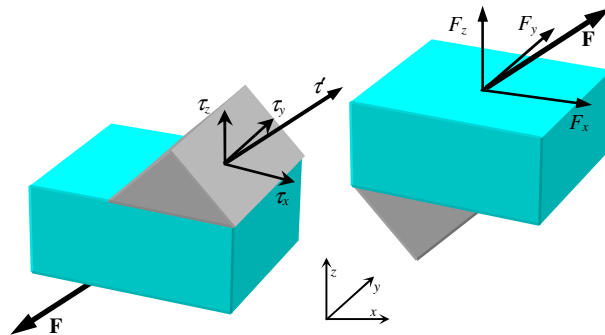


Fig.21.6 - Sollecitazione generica.

Carico composto

In generale la forza F agente sul cordone ha direzione non coincidente con le direzioni del carico trasversale o parallelo, come mostrato, ad esempio, in fig.6. In questo caso si considera che il taglio primario τ' risultante ha la stessa direzione della forza e il suo modulo è ottenibile semplicemente dividendo la forza per la superficie della sezione di gola del cordone con la (9). Anche in questo caso più generale si ipotizza che la tensione tangenziale media nel cordone abbia lo stesso valore di tale risultante, analogamente a quanto supposto per l'utilizzazione delle eq.(8) e (9).

Carico composto, torsione e flessione nelle saldature

In generale le forze agenti sugli elementi collegati mediante saldature provocano dei momenti flettenti e torcenti sui cordoni (fig.7). Come visto, una forza **F** dà luogo alle tensioni medie calcolate con le formule già introdotte definite taglio *primario* τ , mentre i momenti flettenti e torcenti danno luogo a tensioni definite taglio *secondario* τ' . Per ottenere le sollecitazioni totali occorre sommare vettorialmente le componenti di taglio primario e secondario; per questo motivo è necessario calcolare tali sollecitazioni in termini di componenti cartesiane.

Al fine di valutare in modo completo le sollecitazioni, la geometria della saldatura e i carichi agenti possono essere descritti utilizzando un sistema di assi cartesiani *xyz*, con orientazione levogira, con gli assi *xy* giacenti nel piano dei cordoni come quello mostrato in fig.7a.

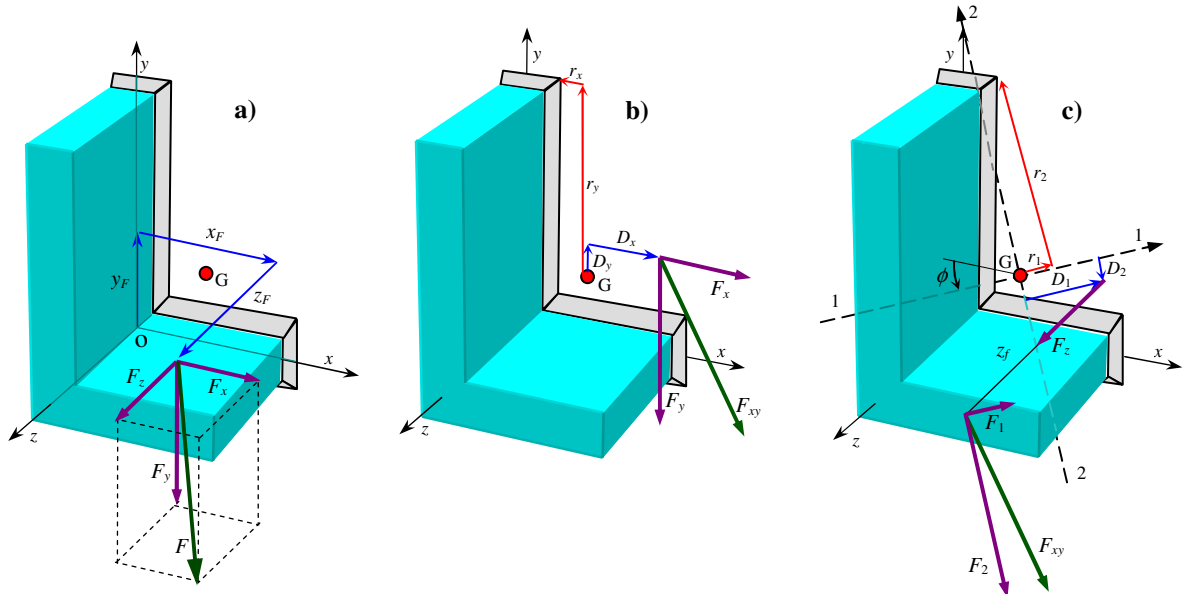


Fig.21.7 - Cordoni soggetti a una forza che provoca sollecitazioni di torsione e flessione: a) il sistema di riferimento, b) la torsione, c) la flessione.

Caratteristiche geometriche dei cordoni

I parametri geometrici *indispensabili* per la descrizione geometrica della saldatura possono essere limitati a (fig.8a):

- le posizioni dei 2 *estremi* dei cordoni,
- gli *spessori* dei cordoni.

Le posizioni degli estremi possono essere quantificate mediante 2 coppie di coordinate $x_{c1i}, x_{c2i}, y_{c1i}$ e y_{c2i} , con $i=1,2...N$, essendo N il numero dei cordoni.

Gli spessori dei cordoni possono essere quantificati da valori b_i assegnati o essere assunti inizialmente di spessore unitario nel caso in cui lo spessore debba essere determinato.

A partire dalla conoscenza dei suddetti parametri possono essere ricavati tutti gli altri parametri necessari alla descrizione geometrica del cordone, in particolare (fig.8b):

- l_i lunghezza dell'*i*-esimo cordone
- A_i area dell'*i*-esimo cordone
- α_i angolo formato dall'asse longitudinale dell'*i*-esimo cordone con l'asse *x*
- x_{gi}, y_{gi} coordinate del baricentro dell'*i*-esimo cordone rispetto agli assi *x* e *y*

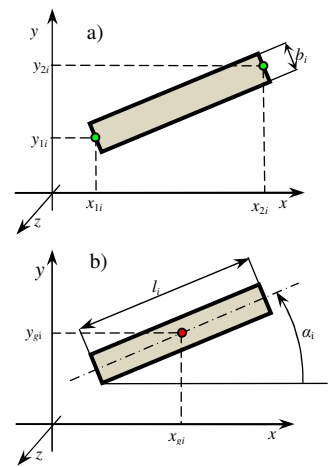


Fig.21.8 – Parametri geometrici dei cordoni: a) essenziali, b) calcolabili.

$$l_i = \sqrt{(x_{c2i} - x_{c1i})^2 + (y_{c2i} - y_{c1i})^2} \quad A_i = l_i b_i$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_{c2i} - y_{c1i}}{x_{c2i} - x_{c1i}} \right) \quad (21.10a-e)$$

$$x_{gi} = \frac{x_{c2i} + x_{c1i}}{2} \quad y_{gi} = \frac{y_{c2i} + y_{c1i}}{2}$$

Determinate le caratteristiche dei cordoni, parametri necessari alla descrizione della geometria della saldatura nel suo complesso sono:

- A superficie complessiva della saldatura
- x_G, y_G coordinate del baricentro G della saldatura

$$A = \sum_{i=1}^N A_i \quad (21.11)$$

$$x_G = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N A_i x_{g_i} \quad y_G = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N A_i y_{g_i} \quad (21.12a,b)$$

Si ricorda che, in generale, il baricentro si trova sugli assi di simmetria della sezione, per cui se una sezione ha due assi di simmetria, il baricentro si trova all'intersezione.

In generale, è opportuno scegliere l'origine e l'orientazione degli assi xy in modo da semplificare l'introduzione delle coordinate degli estremi dei cordoni; se i cordoni hanno assi di simmetria è opportuno scegliere assi xy paralleli ad essi e, se possibile, baricentrici (per cui $x_G=0, y_G=0$), per facilitare il calcolo delle sollecitazioni di flessione come spiegato nel seguito.

Sollecitazioni

Fissato il sistema di riferimento, la forza risultante trasmessa dall'elemento saldato alla saldatura può essere rappresentata da un vettore $\mathbf{F}=[F_x, F_y, F_z]^T$ applicata nel punto di coordinate x_F, y_F e z_F (fig.7a). La componente della forza \mathbf{F} agente nel piano parallelo ai cordoni, data dalla somma vettoriale dei componenti F_x ed F_y è indicata con F_{xy} .

In generale la forza \mathbf{F} provoca:

- un momento *torcente* (il cui vettore è normale al piano contenente i cordoni), nel caso in cui le componenti F_y e F_x trasportate nel piano contenente i cordoni abbiano braccio $\mathbf{D}_{xy}=[D_x D_y]^T$ rispetto al baricentro della saldatura, come in fig.7b;
- un momento *flettente* (il cui vettore è parallelo al piano dei cordoni), nel caso in cui la componente F_{xy} , agisca in un piano a distanza z_F dal piano dei cordoni (fig.7c) e/o nel caso in cui \mathbf{F} abbia una componente F_z (agente in direzione ortogonale al piano contenente i cordoni), la cui retta d'azione non passa per il baricentro dei cordoni, ovvero interseca il piano xy in un punto posto distanza $\mathbf{D}_{12}=[D_1 D_2]^T$ dagli assi centrali d'inerzia della saldatura (fig.7c).

Quello mostrato in fig.7 è il caso più generale di *flessione deviata*, nella quale l'asse momento non risulta coincidente con un asse centrale d'inerzia e la flessione può essere considerata composta da due flessioni rette, ciascuna delle quali ha asse momento coincidente con uno dei 2 assi centrali d'inerzia.

Nel caso più semplice di *flessione retta* (descritto nel seguito e mostrato in fig.11) il vettore momento è parallelo ad un asse centrale d'inerzia e l'asse neutro della flessione, passante per il baricentro della saldatura, risulta parallelo ad essi. Se la struttura possiede un asse di simmetria è opportuno orientare gli assi di riferimento in modo che uno gli risulti parallelo, affinché gli assi di riferimento stessi siano principali; se gli assi di simmetria sono 2 è opportuno che siano scelti come assi di riferimento in modo tale che risultino assi centrali.

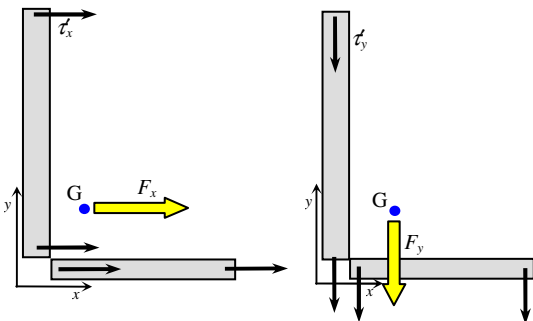


Fig.21.9 – Le componenti del taglio primario.

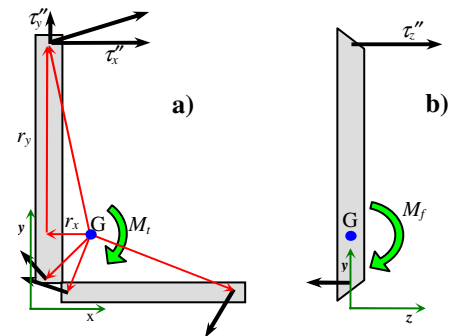


Fig.21.10 – Le componenti del taglio secondario: a) di torsione, b) di flessione.

Taglio primario

Il taglio primario risultante si ottiene con la relazione (9) relativa alle sollecitazioni semplici. Il taglio primario agisce in direzione parallela alla forza \mathbf{F} . Al fine di comporre la sollecitazione dovuta alla forza con quella dovuta ai momenti è *più opportuno valutare le componenti cartesiane* del taglio primario $\tau'_x, \tau'_y, \tau'_z$ (fig.9) dividendo le componenti cartesiane della forza \mathbf{F} per l'area A della superficie attiva complessiva dei cordoni (11):

$$\tau'_x = \frac{F_x}{A} \quad \tau'_y = \frac{F_y}{A} \quad \tau'_z = \frac{F_z}{A} \quad (21.13a-c)$$

Taglio secondario di torsione

Il taglio secondario dovuto al momento torcente (fig.7b) agisce nel piano dei cordoni xy e risulta ortogonale alla congiungente tra il punto del cordone considerato e il baricentro della saldatura (fig.10a). Le componenti cartesiane possono essere ottenute mediante le seguenti espressioni:

$$\tau_x'' = -\frac{M_t}{J} r_y \quad \tau_y'' = \frac{M_t}{J} r_x \quad (21.14a,b)$$

nelle quali:

- M_t è il momento torcente,
- r_x, r_y sono le distanze degli estremi dei cordoni dal baricentro G ,
- J è il momento d'inerzia polare della saldatura rispetto al baricentro G .

Il momento torcente può essere calcolato mediante la seguente relazione:

$$M_t = -F_x D_y + F_y D_x \quad (21.15)$$

nella quale D_x, D_y sono le componenti cartesiane della distanza tra il punto di applicazione della forza e il baricentro (fig.7b):

$$D_x = x_F - x_G \quad D_y = y_F - y_G \quad (21.16a,b)$$

Le distanze r_x ed r_y degli estremi dei cordoni dal baricentro G (fig.7b, 10a) sono ottenibili semplicemente come

$$r_x = x_{c_i} - x_G \quad r_y = y_{c_i} - y_G \quad (21.17a,b)$$

Il momento d'inerzia polare della saldatura rispetto a G è dato dalla somma dei momenti polari J_i dei singoli cordoni rispetto al baricentro G :

$$J = \sum_{i=1}^N J_i \quad (21.18)$$

che sono ottenibili mediante la seguente relazione derivante dalla (7.19) nella quale si ponga $\alpha=0$

$$J_i = I_{L_i} + I_{T_i} + A_i (X_{g_i}^2 + Y_{g_i}^2) \quad (21.19)$$

Nella (19) I_{T_i} e I_{L_i} sono i momenti d'inerzia dell' i -esimo cordone rispetto ai propri assi centrali, rispettivamente trasversale e longitudinale, dati dalle seguenti, ben note, espressioni:

$$I_{T_i} = \frac{b_i l_i^3}{12} \quad I_{L_i} = \frac{b_i^3 l_i}{12} \quad (21.20a,b)$$

e X_{g_i} e Y_{g_i} sono le distanze del baricentro g_i dell' i -esimo cordone dal baricentro G della saldatura

$$X_{g_i} = x_{g_i} - x_G \quad Y_{g_i} = y_{g_i} - y_G \quad (21.21a,b)$$

essendo x_{g_i} e y_{g_i} le coordinate del baricentro dell' i -esimo cordone definite nelle (10d,e).

Taglio secondario di flessione

Il taglio secondario dovuto al momento flettente agisce in direzione z (fig.10b) e può essere quantificato mediante la seguente espressione:

$$\tau_z'' = \frac{M_1}{I_1} r_2 - \frac{M_2}{I_2} r_1 \quad (21.22)$$

nella quale

- I_1, I_2 sono i momenti centrali d'inerzia della saldatura,
- M_1, M_2 sono i momenti flettenti rispetto agli assi centrali d'inerzia 1 e 2,
- r_1, r_2 sono le distanze degli estremi dei cordoni dagli assi centrali d'inerzia 2 e 1.

Nel caso più generale, i momenti centrali d'inerzia I_1 e I_2 e sono ottenibili mediante la (7.16) qui riscritta:

$$I_1 = \frac{1}{2} \left[I_X + I_Y + \sqrt{(I_X - I_Y)^2 + 4I_{XY}^2} \right] \quad I_2 = \frac{1}{2} \left[I_X + I_Y - \sqrt{(I_X - I_Y)^2 + 4I_{XY}^2} \right] \quad (21.23a,b)$$

nelle quali I_X, I_Y, I_{XY} sono i momenti d'inerzia assiali e centrifugo della saldatura rispetto agli assi cartesiani baricentrici dati dalle seguenti relazioni:

$$I_X = \sum_{i=1}^N I_{X_i} \quad I_Y = \sum_{i=1}^N I_{Y_i} \quad I_{XY} = \sum_{i=1}^N I_{XY_i} \quad (21.24a-c)$$

Nelle (24a-c), a loro volta, $I_{X_i}, I_{Y_i}, I_{XY_i}$ sono i momenti d'inerzia assiali e centrifugo dell' i -esimo cordone rispetto ad assi cartesiani baricentrici ottenibili dalle (7.18-20) come

$$\begin{aligned}
I_{X_i} &= \frac{I_{L_i} + I_{T_i}}{2} + \frac{I_{L_i} - I_{T_i}}{2} \cos 2\alpha_i + A_i Y_{g_i}^2 & I_{Y_i} &= \frac{I_{L_i} + I_{T_i}}{2} - \frac{I_{L_i} - I_{T_i}}{2} \cos 2\alpha_i + A_i X_{g_i}^2 \\
I_{XY_i} &= -\frac{I_{L_i} - I_{T_i}}{2} \sin 2\alpha_i + A_i X_{g_i} Y_{g_i} & &
\end{aligned} \tag{21.25a-c}$$

essendo X_{g_i} , Y_{g_i} , I_{T_i} e I_{L_i} già definiti nelle (20) e (21) e gli angoli α_i definiti in (10c) e mostrati in fig.8.

Utilizzando una terna levogira con due assi coincidenti con gli assi centrali d'inerzia 1 e 2 e il terzo asse coincidente con l'asse z della terna cartesiana (fig.7c), i momenti flettenti M_1 e M_2 sono ottenibili mediante le seguenti espressioni (fig.7c):

$$M_1 = F_z D_2 - F_2 z_F \qquad M_2 = -F_z D_1 + F_1 z_F \tag{21.26a,b}$$

nelle quali F_1 , F_2 sono le componenti della forza F lungo le direzioni degli assi centrali d'inerzia 1 e 2 e D_1 , D_2 le distanze della rette d'azione della componente F_z dagli assi centrali d'inerzia 2 e 1, misurate lungo gli stessi assi centrali (fig.7c):

$$F_1 = F_x \cos \phi + F_y \sin \phi \qquad F_2 = -F_x \sin \phi + F_y \cos \phi \tag{21.27a,b}$$

$$D_1 = D_x \cos \phi + D_y \sin \phi \qquad D_2 = -D_x \sin \phi + D_y \cos \phi \tag{21.28a,b}$$

Nelle (27-28) ϕ è l'angolo formato tra l'asse centrale d'inerzia 1 e l'asse x (fig.7c), positivo se antiorario, ottenibile mediante la (7.17) qui riscritta:

$$\phi = -\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{I_{XY}}{(I_X - I_Y)/2} \tag{21.29}$$

essendo i momenti I_X , I_Y , I_{XY} già definiti nelle (24a-c). È importante notare che per valutare correttamente l'angolo ϕ mediante la (29) è necessario tenere in considerazione i segni del numeratore (proporzionale a $\sin \phi$) e del denominatore (proporzionale a $\cos \phi$) dell'argomento dell'arcotangente (ad esempio utilizzando la funzione atan2 per il calcolo dell'arcotangente disponibile in alcuni linguaggi di programmazione).

Infine le distanze r_1 ed r_2 (fig.10a) sono ottenibili come:

$$r_1 = r_x \cos \phi + r_y \sin \phi \qquad r_2 = -r_x \sin \phi + r_y \cos \phi \tag{21.30a,b}$$

Osservando le relazioni (27), (28) e (30) è facile notare come le grandezze F_1 ed F_2 , D_1 e D_2 , r_1 ed r_2 (fig.7c) sono ottenibili dalle analoghe grandezze F_x ed F_y , D_x e D_y , r_x ed r_y (fig.10b) effettuando una rotazione degli assi dal riferimento cartesiano al riferimento costituito dagli assi centrali d'inerzia. Esprimendo le suddette grandezze in forma vettoriale

$$\mathbf{F}_{xy} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{D}_{xy} = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{xy} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_{12} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D}_{12} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_{12} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} \tag{21.31a-f}$$

e introducendo la matrice di rotazione \mathbf{R}

$$\mathbf{R}_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \tag{21.32}$$

le (27), (28) e (30) possono essere espresse semplicemente come:

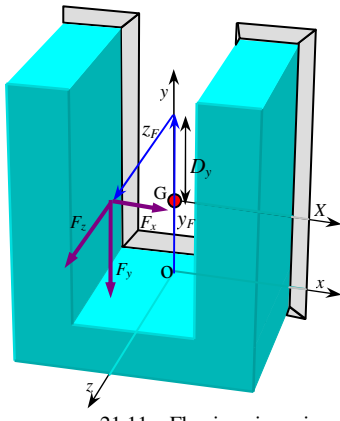
$$\mathbf{F}_{12} = \mathbf{R}_\phi \mathbf{F}_{xy} \qquad \mathbf{D}_{12} = \mathbf{R}_\phi \mathbf{D}_{xy} \qquad \mathbf{r}_{12} = \mathbf{R}_\phi \mathbf{r}_{xy} \tag{21.33a-c}$$

Se gli assi di riferimento xy coincidono con *assi principali d'inerzia*, come nel caso di fig.11, nel quale, in particolare, l'asse y coincide con l'asse di simmetria della saldatura, la (22) può essere riscritta come:

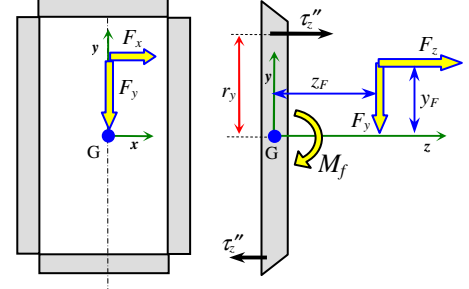
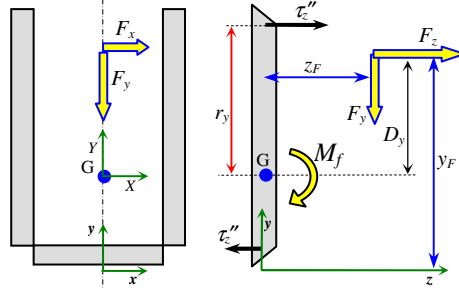
$$\tau_z'' = \frac{M_x}{I_X} r_y - \frac{M_y}{I_Y} r_x \tag{21.34}$$

nella quale I_X e I_Y sono i momenti d'inerzia assiali della saldatura rispetto agli assi cartesiani baricentrici; in questo caso gli assi X e Y coincidono con gli assi *centrali* della sezione, per cui il momento centrifugo I_{XY} risulta nullo, mentre i momenti d'inerzia assiali possono essere determinati con le (25a,b), qui riscritte:

$$I_X = \sum_{i=1}^N I_{X_i} \qquad I_Y = \sum_{i=1}^N I_{Y_i} \tag{21.25a,b}$$



21.11 – Flessione in assi cartesiani coincidenti con assi principali.



21.12 – Flessione in assi cartesiani coincidenti con gli assi centrali.

le distanze dei punti del cordone dal baricentro della saldatura r_x, r_y possono essere calcolate tramite le (17) qui riscritte:

$$r_x = xc_i - x_G \quad r_y = yc_i - y_G \quad (21.17a,b)$$

le espressioni dei momenti flettenti (26) possono essere riscritte come

$$M_x = F_z D_y - F_y z_F \quad M_y = -F_z D_x + F_x z_F \quad (21.35a,b)$$

in quanto le distanze delle componenti delle forze dagli assi centrali d'inerzia coincidono con le distanze dagli assi X e Y, cioè $D_1=D_x, D_2=D_y$ (fig.11); a loro volta le distanze D_x, D_y possono essere calcolate tramite le (16) qui riscritte:

$$D_x = x_F - x_G \quad D_y = y_F - y_G \quad (21.36a,b)$$

Da notare che nell'esempio di fig.11, per semplicità, è mostrato un caso in cui $x_F=0$; in questo caso, essendo l'asse y asse di simmetria, per cui $y_G=0$, la componente F_z non contribuisce al momento M_y (35b), risultando $D_y=0$.

Se gli assi di riferimento xy coincidono con gli *assi centrali d'inerzia*, come nel caso di fig.12, l'origine degli assi xyz coincide con il baricentro della saldatura essendo

$$x_G = 0 \quad y_G = 0 \quad (21.37a,b)$$

In questo caso, le distanze delle componenti delle forze dagli assi centrali coincidono con le coordinate dei punti di applicazione delle forze e le distanze degli estremi dei cordoni dall'origine degli assi coincidono con le rispettive coordinate (fig.12) per cui le (16,17) si semplificano rispettivamente in

$$D_x = x_F \quad D_y = y_F \quad r_x = xc_i \quad r_y = yc_i \quad (21.38a,b)$$

e le espressioni dei momenti flettenti possono essere riscritte come:

$$M_y = -F_z x_F + F_x z_F \quad M_x = F_z y_F - F_y z_F \quad (21.39a,b)$$

Composizione delle sollecitazioni e dimensionamento dello spessore dei cordoni

La sollecitazione complessiva in ciascun punto della saldatura può essere riassunta nel seguente vettore colonna τ

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau'_x \\ \tau'_y \\ \tau'_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau''_x \\ \tau''_y \\ \tau''_z \end{bmatrix} \quad (21.40)$$

il cui modulo può essere ottenuto con la seguente espressione:

$$\tau = \sqrt{\sum_{k=x,y,z} \tau_k^2} \quad (21.41)$$

Il modulo di τ scritto per esteso diventa:

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{F_x}{A} - \frac{M_t}{J} r_y\right)^2 + \left(\frac{F_y}{A} + \frac{M_t}{J} r_x\right)^2 + \left(\frac{F_z}{A} + \frac{M_1}{I_1} r_2 - \frac{M_2}{I_2} r_1\right)^2} \quad (21.42)$$

Ovviamente i punti nei quali le sollecitazioni dovute alla sola torsione e alla sola flessione sono più elevate sono quelli posti a maggiore distanza, rispettivamente, dal baricentro e dall'asse neutro; tuttavia non è detto che siano i punti complessivamente più sollecitati in quanto, in generale, in questi punti i tagli secondari ottenuti potrebbero avere direzioni opposte rispetto a quelli primari.

Poiché i cordoni di saldatura hanno uno sviluppo prevalente longitudinale ($l_i \gg b_i$), il momento di ciascun cordone rispetto al proprio asse longitudinale I_L (20b) può essere trascurato rispetto al momento I_T relativo all'asse trasversale (20a) nel quale le lunghezze dei cordoni compaiono elevate al cubo. In questo caso è facile dimostrare che, nel caso di cordoni di uguale spessore, la (42) può essere riscritta come

$$\tau = \frac{1}{b} \sqrt{\left(\frac{F_x}{L} - \frac{M_t}{J_U} r_y\right)^2 + \left(\frac{F_y}{L} + \frac{M_t}{J_U} r_x\right)^2 + \left(\frac{F_z}{L} + \frac{M_1}{I_{1U}} r_2 - \frac{M_2}{I_{2U}} r_1\right)^2} \quad (21.43)$$

nella quale L è la lunghezza complessiva dei cordoni, J_U , I_{1U} e I_{2U} sono i momenti d'inerzia per cordoni di *spessore unitario*, ottenibili ponendo $b_i=1$ nella (20a) e ponendo a 0 il termine I_L nelle (19) e (25a-c). Nella Tab.2 mostrata nel paragrafo successivo sono riportate le espressioni di tali momenti per diverse configurazioni geometriche di cordoni.

Ricordando la (31), la (43) può essere riscritta come

$$\tau = \frac{1}{b} \sqrt{\sum_{k=x,y,z} \tau_{U_k}^2} \quad (21.44)$$

essendo τ_{U_k} le componenti del vettore sollecitazione (34) calcolate considerando unitario lo spessore dei cordoni e trascurando i termini I_{L_i} (20a) nel calcolo dei momenti di inerzia (19) e (25a-c).

Introducendo la tensione ammissibile τ_{am} e valutando τ_{U_k} nel punto più sollecitato della saldatura, cioè introducendo valori opportuni di r_x , r_y , r_1 ed r_2 nelle (14) e (22), è possibile dimensionare lo spessore da attribuire ai cordoni esplicitando la (44) rispetto a b :

$$b = \frac{1}{\tau_{am}} \sqrt{\sum_{k=x,y,z} \tau_{U_k}^2} \quad (21.45)$$

Poiché il prodotto dei momenti d'inerzia di spessore unitario per lo spessore effettivo fornisce una valutazione per difetto dei momenti d'inerzia effettivi, la (39) fornisce valori dello spessore leggermente *conservativi*. Una verifica dell'entità del sovradimensionamento può essere effettuata calcolando il modulo della tensione τ agente nel punto più sollecitato mediante la (41) o la (42), avendo introdotto il valore di b determinato, e verificandone la differenza con la τ_{am} precedentemente imposta.

Da notare che è possibile valutare le tensioni τ_{U_k} senza modificare le equazioni per il calcolo dei momenti d'inerzia (19) e (25a-c), cioè includendo i termini I_{L_i} e ponendo semplicemente $b_i=1$ tra i dati d'ingresso del problema, ottenendo, in genere, una migliore approssimazione.

In appendice sono riportati i dati essenziali per la definizione del problema di verifica o progetto della saldatura e tutte le equazioni necessarie nell'ordine in cui devono essere utilizzate, utile sia per l'impiego *manuale*, che per la realizzazione di un programma informatico di calcolo.

La resistenza delle giunzioni saldate

I fattori più importanti nella riuscita di una saldatura sono la velocità, l'abilità dell'operatore e la conformazione del giunto completo piuttosto che l'accoppiamento delle proprietà dell'elettrodo con quelle del metallo delle pareti.

La tab.2 mostra il fattore di riduzione della resistenza a fatica per effetto delle concentrazioni di tensione; i valori sono validi sia per il metallo d'apporto che per quello da saldare.

Tipo di saldatura	$K_T=1/k_f$
di testa	1.2
a sovrapposizione (trasversale)	1.5
a sovrapposizione (parallela)	2.7
a T	2.0

Tab.21.2 - Fattori di concentrazione delle tensioni a fatica K_T per diversi tipi di saldatura.

APPENDICE

A1. Tabelle dati di ingresso ed equazioni di calcolo in ordine di utilizzazione

Dati geometria cordoni	
• xc_{1i}, xc_{2i}	ascisse degli estremi dell' i -esimo cordone;
• yc_{1i}, yc_{2i}	ordinate degli estremi dell' i -esimo cordone;
• b_i	spessore dell' i -esimo cordone;
Dati forza	
• F_x, F_y, F_z	componenti cartesiane della forza;
• x_F, y_F, z_F	coordinate del punto di applicazione della forza;

Geometria cordoni	
• l_i	lunghezza dell' i -esimo cordone;
• A_i	area dell' i -esimo cordone;
• α_i	angolo formato dall'asse longitudinale dell' i -esimo cordone con l'asse x ;
• x_{gi}, y_{gi}	coordinate del baricentro dell' i -esimo cordone rispetto agli assi x e y ;
$l_i = \sqrt{(xc_{2i} - xc_{1i})^2 + (yc_{2i} - yc_{1i})^2}$	$x_{g_i} = \frac{xc_{2i} + xc_{1i}}{2} \quad y_{g_i} = \frac{yc_{2i} + yc_{1i}}{2}$
$A_i = l_i b_i$	$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{yc_{2i} - yc_{1i}}{xc_{2i} - xc_{1i}} \right)$
Geometria saldatura	
• A	superficie complessiva della saldatura;
• x_G, y_G	coordinate del baricentro della saldatura;
$A = \sum_{i=1}^N A_i$	$x_G = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N A_i x_{g_i} \quad y_G = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N A_i y_{g_i}$
Momenti d'inerzia dei singoli cordoni	
• X_{gi}, Y_{gi}	distanze del baricentro dell' i -esimo cordone dal baricentro G ;
• I_{Ti}, I_{Li}	momenti d'inerzia dell' i -esimo cordone rispetto ai propri assi centrali trasversale e longitudinale;
• J_i	momento d'inerzia polare dell' i -esimo cordone rispetto al baricentro G ;
• I_{Xi}, I_{Yi}, I_{XYi}	momenti d'inerzia assiali e centrifugo dell' i -esimo cordone rispetto ad assi cartesiani baricentrici;
$X_{g_i} = x_{g_i} - x_G$	$Y_{g_i} = y_{g_i} - y_G$
$I_{T_i} = \frac{b_i l_i^3}{12}$	$I_{L_i} = \frac{b_i^3 l_i}{12}$
$J_i = I_{L_i} + I_{T_i} + A_i (X_{g_i}^2 + Y_{g_i}^2)$	
$I_{X_i} = \frac{I_{T_i} + I_{L_i}}{2} + \frac{I_{T_i} - I_{L_i}}{2} \cos 2\alpha_i + A_i Y_{g_i}^2$	$I_{Y_i} = \frac{I_{T_i} + I_{L_i}}{2} - \frac{I_{T_i} - I_{L_i}}{2} \cos 2\alpha_i + A_i X_{g_i}^2$
$I_{XY_i} = \frac{I_{T_i} - I_{L_i}}{2} \sin 2\alpha_i + A_i X_{g_i} Y_{g_i}$	

Assi xyz generici

Momenti d'inerzia saldatura

- J momento d'inerzia polare della saldatura;
- I_X, I_Y, I_{XY} momenti d'inerzia assiali e centrifugo della saldatura rispetto agli assi cartesiani baricentrici;
- I_1, I_2 momenti centrali d'inerzia della saldatura;
- ϕ angolo formato tra l'asse principale d'inerzia 1 e l'asse x ;

$$J = \sum_{i=1}^N J_i$$

$$I_X = \sum_{i=1}^N I_{X_i}$$

$$I_Y = \sum_{i=1}^N I_{Y_i}$$

$$I_{XY} = \sum_{i=1}^N I_{XY_i}$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \left[I_X + I_Y + \sqrt{(I_X + I_Y)^2 + 4I_{XY}^2} \right]$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \left[I_X + I_Y - \sqrt{(I_X + I_Y)^2 + 4I_{XY}^2} \right]$$

$$\phi = -\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{I_{XY}}{(I_X - I_Y)/2}$$

Momento torcente

- D_x, D_y componenti cartesiane della distanza tra il punto di applicazione della forza e il baricentro;
- M_t momento torcente;

$$D_x = x_F - x_G$$

$$D_y = y_F - y_G$$

$$M_t = -F_x D_y + F_y D_x$$

Momento flettente

- F_1, F_2 componenti della forza F lungo le direzioni degli assi centrali d'inerzia 1 e 2;
- D_1, D_2 distanze della componente F_z della forza dagli assi centrali d'inerzia 2 e 1;
- M_1, M_2 momenti flettenti rispetto agli assi centrali d'inerzia 1 e 2;

$$F_1 = F_x \cos \phi + F_y \sin \phi$$

$$F_2 = -F_x \sin \phi + F_y \cos \phi$$

$$D_1 = D_x \cos \phi + D_y \sin \phi$$

$$D_2 = -D_x \sin \phi + D_y \cos \phi$$

$$M_1 = F_z D_2 - F_2 z_F$$

$$M_2 = -F_z D_1 + F_1 z_F$$

Sollecitazioni

- r_x, r_y distanze degli estremi dei cordoni dal baricentro G ;
- r_1, r_2 distanze degli estremi dei cordoni dagli assi centrali d'inerzia 2 e 1;
- $\tau'_x, \tau'_y, \tau'_z$ componenti cartesiane del taglio primario;
- $\tau''_x, \tau''_y, \tau''_z$ componenti cartesiane del taglio secondario;

$$r_x = x c_i - x_G$$

$$r_y = y c_i - y_G$$

$$r_1 = r_x \cos \phi + r_y \sin \phi$$

$$r_2 = -r_x \sin \phi + r_y \cos \phi$$

$$\tau'_x = \frac{F_x}{A}$$

$$\tau'_y = \frac{F_y}{A}$$

$$\tau'_z = \frac{F_z}{A}$$

$$\tau''_x = -\frac{M_t}{J} r_y$$

$$\tau''_y = \frac{M_t}{J} r_x$$

$$\tau''_z = \frac{M_1}{I_1} r_2 - \frac{M_2}{I_2} r_1$$

Assi xyz principali d'inerzia

Momenti d'inerzia saldatura

- J momento d'inerzia polare della saldatura;
- I_X, I_Y momenti d'inerzia assiali e centrifugo della saldatura rispetto agli assi cartesiani baricentrici;

$$J = \sum_{i=1}^N J_i$$

$$I_X = \sum_{i=1}^N I_{X_i} \quad I_Y = \sum_{i=1}^N I_{Y_i}$$

Momento torcente

- D_x, D_y componenti cartesiane della distanza tra il punto di applicazione della forza e il baricentro;
- M_t momento torcente;

$$D_x = x_F - x_G$$

$$D_y = y_F - y_G$$

$$M_t = -F_x D_y + F_y D_x$$

Momento flettente

- F_x, F_y componenti della forza F lungo le direzioni degli assi principali d'inerzia x e y ;
- M_x, M_y momenti flettenti rispetto agli assi principali d'inerzia x e y ;

$$M_x = F_z D_y - F_y z_F$$

$$M_y = -F_z D_x + F_x z_F$$

Sollecitazioni

- r_x, r_y distanze degli estremi dei cordoni dal baricentro G ;
- $\tau'_x, \tau'_y, \tau'_z$ componenti cartesiane del taglio primario;
- $\tau''_x, \tau''_y, \tau''_z$ componenti cartesiane del taglio secondario;

$$r_x = x_{C_i} - x_G$$

$$r_y = y_{C_i} - y_G$$

$$\tau'_x = \frac{F_x}{A}$$

$$\tau'_y = \frac{F_y}{A}$$

$$\tau'_z = \frac{F_z}{A}$$

$$\tau''_x = -\frac{M_t}{J} r_y$$

$$\tau''_y = -\frac{M_t}{J} r_x$$

$$\tau''_z = \frac{M_x}{I_X} r_y - \frac{M_y}{I_Y} r_x$$

Assi xyz centrali d'inerzia

Sollecitazioni		
<ul style="list-style-type: none"> • r_x, r_y distanze degli estremi dei cordoni dal baricentro G; • $\tau'_x, \tau'_y, \tau'_z$ componenti cartesiane del taglio primario; • $\tau''_x, \tau''_y, \tau''_z$ componenti cartesiane del taglio secondario; 		
$r_x = xc_i - x_G$	$r_y = yc_i - y_G$	
$\tau'_x = \frac{F_x}{A}$	$\tau'_y = \frac{F_y}{A}$	$\tau'_z = \frac{F_z}{A}$
$\tau''_x = -\frac{M_t}{J} r_y$	$\tau''_y = -\frac{M_t}{J} r_x$	$\tau''_z = \frac{M_x}{I_x} r_y - \frac{M_y}{I_y} r_x$

Momenti d'inerzia saldatura
<ul style="list-style-type: none"> • J momento d'inerzia polare della saldatura; • I_x, I_y momenti d'inerzia assiali e centrifugo della saldatura rispetto agli assi cartesiani baricentrici;
$J = \sum_{i=1}^N J_i$
$I_x = \sum_{i=1}^N I_{x_i} \quad I_y = \sum_{i=1}^N I_{y_i}$

Momento torcente
<ul style="list-style-type: none"> • M_t momento torcente;
$M_t = -F_x y_F + F_y x_F$

Momento flettente	
<ul style="list-style-type: none"> • F_x, F_y componenti della forza F lungo le direzioni degli assi principali d'inerzia x e y; • M_x, M_y momenti flettenti rispetto agli assi principali d'inerzia x e y; 	
$M_x = F_z y_F - F_y z_F$	$M_y = -F_z x_F + F_x z_F$

Sollecitazioni		
<ul style="list-style-type: none"> • r_x, r_y distanze degli estremi dei cordoni dal baricentro G; • $\tau'_x, \tau'_y, \tau'_z$ componenti cartesiane del taglio primario; • $\tau''_x, \tau''_y, \tau''_z$ componenti cartesiane del taglio secondario; 		
$r_x = xc_i$	$r_y = yc_i$	
$\tau'_x = \frac{F_x}{A}$	$\tau'_y = \frac{F_y}{A}$	$\tau'_z = \frac{F_z}{A}$
$\tau''_x = -\frac{M_t}{J} r_y$	$\tau''_y = -\frac{M_t}{J} r_x$	$\tau''_z = \frac{M_x}{I_x} r_y - \frac{M_y}{I_y} r_x$

A.2 Configurazioni elementari dei cordoni

In quest'appendice sono riportate le equazioni per la determinazione dei parametri utili al dimensionamento di alcune configurazioni elementari dei cordoni di saldatura, caratterizzate dalla presenza di assi di simmetria, mostrate in tabella A2.1, con un esempio mostrato nelle fig.1,2. Per quanto concerne il momento flettente, viene trattato il caso in cui la forza giace nel piano yz ($x_F=0$) per cui si ha $M_x=0$ (fig.2).

In particolare sono fornite le espressioni dei momenti d'inerzia J_U e I_{xU} (considerando gli spessori dei cordoni $b=1$) e delle distanze dal baricentro dei punti più sollecitati della saldatura, r_x ed r_y , utili per il calcolo delle tensioni secondarie dovute alla torsione e alla flessione.

Ovviamente per determinare i valori dei momenti J e I_x per cordoni con spessore b assegnato è sufficiente moltiplicare J_U e I_{xU} per b .

Nelle formule

- l_x, l_y sono le lunghezze dei cordoni con orientamento parallelo rispettivamente agli assi x, y ;
- d_x, d_y sono le distanze tra i cordoni misurate lungo gli assi x, y .

Geometrie e assi di riferimento

Le configurazioni 1-4 sono caratterizzate dal fatto che gli assi verticale e orizzontale sono assi di simmetria, quindi assi centrali d'inerzia; la configurazione 5 è assialsimmetrica per cui tutti gli assi passanti per il baricentro sono assi di simmetria. Ovviamente viene scelto come sistema d'assi xy il sistema di assi centrali.

Nel caso delle configurazioni 6 e 7, solo l'asse orizzontale e quello verticale, rispettivamente, sono assi di simmetria. In questi casi gli assi di simmetria e gli assi ortogonali ad essi sono gli assi principali d'inerzia della saldatura; il baricentro G giace sull'asse di simmetria. Nella configurazione 6 viene utilizzato un sistema d'assi con l'asse y coincidente con l'asse di simmetria verticale, nella 7 l'asse x è coincidente con l'asse di simmetria orizzontale; nei due casi è indicata la coordinata del baricentro diversa da 0.

I punti più sollecitati e le distanze dal baricentro r_x, r_y sono mostrati in rosso.

Formule per il taglio secondario

Nel caso della torsione, fig.1, le formule per il calcolo del taglio secondario coincidono con le 14a,b.

Nel caso della flessione, fig.2, si suppone che le forze giacciono nel piano yz , per cui l'asse neutro coincide con l'asse x e il momento d'inerzia di interesse sia solo quello rispetto a tale asse; la formula per il calcolo del taglio secondario si ottiene dalla (34) ponendo $M_y=0$. In questo caso la distanza tra l'asse neutro e il punto coincide con la distanza del punto con l'asse y , da cui $r_1=r_y$.

Le formule per il calcolo delle sollecitazioni di taglio secondario sono riassunte in tab. A2.2.

Momenti flettenti e torcenti

Per il calcolo del momento torcente M_t e del momento flettente M_y , tramite le (15) e (35b), nei primi 5 casi le distanze dei punti di applicazione delle forze dal baricentro coincidono con le semplici coordinate dei punti di applicazione delle forze, essendo $D_x=x_F, D_y=y_F$; negli altri due casi si ha, rispettivamente, $D_x=x_F-x_G, D_y=y_F$ e $D_x=x_F, D_y=y_F-y_G$.

Le formule per il calcolo di M_t ed M_y per i 7 casi sono riportate in tab. A2.3.

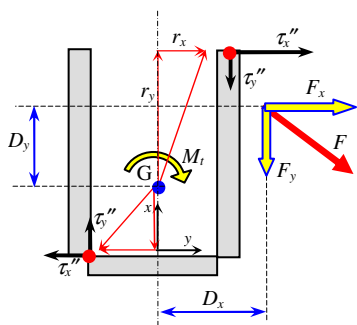


Fig.A2.1 – Le componenti del taglio secondario di torsione.

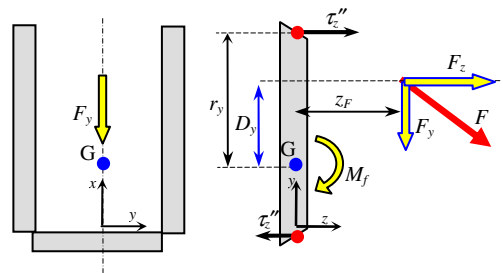


Fig.A2.2 – Le componenti del taglio secondario di flessione.

N.	Cordoni	J_U, I_{xU}	r_x, r_y	x_G, y_G
1		$J_U = l_y^3/12$	$r_x = 0$	$x_G = 0$
		$I_{xU} = l_y^3/12$	$r_y = l_y/2$	$y_G = 0$
2		$J_U = l_y(l_y^2 + 3d_x^2)/6$	$r_x = d_x/2$	$x_G = 0$
		$I_{xU} = l_y^3/6$	$r_y = l_y/2$	$y_G = 0$
3		$J_U = d_y(d_y^2 + 3l_x^2)/6$	$r_x = l_x/2$	$x_G = 0$
		$I_{xU} = d_y^2 l_x/2$	$r_y = d_y/2$	$y_G = 0$
4		$J_U = (l_x + l_y)^3/6$	$r_x = l_x/2$	$x_G = 0$
		$I_{xU} = l_y^2(l_y + 3l_x)/6$	$r_y = l_y/2$	$y_G = 0$
5		$J_U = 2\pi r^3$	$r_x = r$	$x_G = 0$
		$I_{xU} = \pi r^3$	$r_y = r$	$y_G = 0$
6		$J_U = \frac{(2l_x + l_y)^3}{12} - \frac{l_x^2(l_x + l_y)^2}{2l_x + l_y}$	$r_x = l_x - x_G$ $r_x = x_G$	$x_G = \frac{l_x^2}{2l_x + l_y}$
		$I_{xU} = \frac{l_y^2(l_y + 6l_x)}{12}$	$r_y = l_y/2$	$y_G = 0$
7		$J_U = \frac{(l_x + 2l_y)^3}{12} - \frac{l_y^2(l_x + l_y)^2}{l_x + 2l_y}$	$r_x = l_x/2$	$x_G = 0$
		$I_{xU} = \frac{2l_y^3}{3} - \frac{l_y^4}{l_x + 2l_y}$	$r_y = l_y - y_G$ $r_y = y_G$	$y_G = \frac{l_y^2}{l_x + 2l_y}$

Tab. A2.1 – Configurazioni elementari dei cordoni di saldatura.

Torsione		Flessione
$\tau_x'' = -\frac{M_t}{J} r_y$	$\tau_y'' = \frac{M_t}{J} r_x$	$\tau_z'' = \frac{M_y}{I_x} r_y$

Tab. A2.2 – Formule per il calcolo del taglio secondario.

N.	M_t	M_y
1-5	$M_t = -F_x y_F + F_y x_F$	$M_y = F_z y_F - F_y z_F$
6	$M_t = -F_x y_F + F_y (x_F - x_G)$	$M_y = F_z y_F - F_y z_F$
7	$M_t = -F_x (y_F - y_G) + F_y x_F$	$M_y = F_z (y_F - y_G) - F_y z_F$

Tab. A2.3 – Momento torcente e flettente.