

La scelta corretta del giunto saldato

Quali scelte progettuali condizionano fin dall'inizio l'affidabilità e la sicurezza di un'opera metallica

Ing. Michele Lanza - Direttore tecnico di IIS SERVICE srl, soc. del Gruppo IIS

In un primo articolo, pubblicato ad ottobre su Ingenio e dal titolo *“La vita di un'infrastruttura in acciaio: le fasi della vita utile come le puntate di un unico racconto”*, furono introdotte alcune considerazioni generali riguardanti le peculiarità del materiale acciaio e le relative implicazioni nell'ottica della manutenzione di un'infrastruttura.

In particolare, si era introdotto già allora il tema dell'influenza che le scelte progettuali iniziali hanno sul successivo manifestarsi (in termini di tempistiche e modalità) di alcuni tipici fenomeni di degrado durante la vita di un ponte.

Nella prima uscita, in particolare, sono stati introdotti alcuni concetti fondamentali riguardanti le peculiarità dei giunti saldati, puntualizzando da subito come esse siano figlie e diretta implicazione del processo tecnologico utilizzato.

Questo nuovo articolo, il primo di una serie di approfondimenti verticali sul tema, verterà in particolare sui criteri di scelta del giunto saldato atti a garantire integrità ed affidabilità nel tempo dell'opera metallica.

Preliminarmente alla trattazione che seguirà, si ritiene utile dedicare una riflessione in merito alla sicurezza delle strutture metalliche realizzate facendo ricorso alla saldatura per le giunzioni tra i loro elementi.

La sicurezza delle strutture saldate in acciaio

L'impiego dell'acciaio come materiale da costruzione può dirsi oggi una tecnica ben consolidata, che vanta oramai una pluridecennale tradizione tanto nel settore civile che in quello industriale; per tale ragione vi è una altrettanto diffusa conoscenza anche dei **vantaggi connessi alla tecnologia della saldatura** e, con essi, delle **precauzioni e cautele** che occorre tuttavia avere nel gestire i relativi processi produttivi. L'applicazione su vastissima scala di tale tecnologia nonché l'imponente letteratura a riguardo non sono bastate però ad estinguere alcuni persistenti scetticismi sulla sicurezza delle saldature che, non di rado, sono viste ancora come fonti di rischio e di innesco di situazioni di pericolo inficianti la sicurezza delle opere.

Nella realtà, tuttavia, tali perplessità sono largamente infondate, come sta a dimostrare il largo utilizzo della saldatura proprio nel settore impiantistico ed industriale, dove gli effetti di eventuali cedimenti possono portare a conseguenze ed eventi davvero importanti.

Come vedremo vi sono ampie argomentazioni per considerare una struttura saldata come estremamente sicura, purché **correttamente progettata, eseguita a regola d'arte e debitamente controllata e monitorata** durante il suo ciclo di vita.

Ai fini di quest'articolo, che come detto in premessa si prefigge di trattare gli aspetti riguardanti più direttamente la progettazione del giunto, è bene richiamare anzitutto le tre principali **caratteristiche di una struttura saldata**, ovvero:

- la monoliticità
- la presenza di un elevato stato di tensione interno, indipendente dalla presenza di carichi esterni (stato di tensione “residuo” del processo di saldatura)

- la possibile presenza di discontinuità metallurgiche e difetti interni

Trattiamo dapprima il carattere di **monoliticità** della struttura.

Una struttura saldata può considerarsi come un insieme di elementi connessi che, indipendentemente dal loro numero, costituiscono, una volta collegati tra loro, un corpo continuo; per chiarire il concetto si pensi banalmente ad un confronto tra un giunto saldato ed uno bullonato: in quest'ultimo appaiono evidenti quelle soluzioni di continuità tra un elemento e l'altro che chiaramente non sussistono invece nel primo caso.

Ciò comporta, dal punto di vista strutturale, una significativa differenza di comportamento tra i due tipi di giunto al verificarsi di una frattura e, soprattutto, differenti conseguenze. Infatti, mentre in un giunto bullonato l'evento potrà interessare tutt'al più l'intero elemento strutturale in cui esso si è verificato, ma senza interessare quelli contigui, nel caso del giunto saldato la frattura può potenzialmente propagarsi a tutti gli elementi connessi, proprio in virtù della continuità materica che li caratterizza. Nel caso di una struttura effettivamente monolitica, il meccanismo di cui si è detto può potenzialmente arrivare ad interessare ogni elemento della stessa. Tale caratteristica delle strutture saldate va dunque debitamente tenuta in considerazione, ed in special modo quando vengono saldati elementi "secondari" - dal punto di vista funzionale - ad elementi funzionalmente o strutturalmente importanti per la costruzione. Infatti una rottura in un giunto saldato di un elemento secondario può propagarsi in quello principale contiguo, con conseguenze anche disastrose. Ciò in particolare quando gli elementi secondari sono interessati da stati tensionali elevati prodotti negli elementi principali contigui.

Un secondo ordine di considerazioni va svolto in merito alla presenza di **tensioni residue** nel giunto saldato.

Il ciclo termico di saldatura induce infatti nel giunto uno stato di tensione e deformazione permanente, che dipendono, oltre che dal ciclo termico stesso, dalla configurazione geometrica del giunto. Quanto più è elevato il grado di vincolo del giunto (ovvero quanto maggiore è l'impossibilità imposta allo stesso di deformarsi durante la saldatura, in funzione della posizione, dello spessore, della presenza di elementi di irrigidimento), tanto maggiori risulteranno le tensioni indotte.

Va comunque tenuto presente che questo stato di tensione residua non determina, almeno in linea generale, conseguenze sulla capacità di un giunto saldato di sopportare i carichi esterni e di resistere alle rotture per collasso plastico, tipiche dei sovraccarichi.

Fanno eccezione tuttavia alcuni casi specifici, i più rilevanti dei quali sono associati al rischio di frattura fragile, ovvero al meccanismo secondo cui il cedimento avviene in modo improvviso a causa di una concomitanza di fattori (detti appunto fragilizzanti); tra questi fattori vi è ad esempio la **presenza di difetti e discontinuità dei giunti saldati**, che dipende fortemente dai materiali impiegati e dalle modalità di saldatura seguite. Per queste stesse ragioni, dunque, il rischio associato a tali meccanismi di rottura fragile può essere agevolmente rimosso ed eliminato "ab origine", grazie ad un'accurata progettazione del giunto, ad una corretta fabbricazione e ad uno scrupoloso controllo sulla produzione.

La possibile presenza di questa tipologia di difetti così come il rischio di rotture fragili dovute a stati tensionali residui va perciò ricondotta ad un problema più generale che riguarda il **controllo della qualità dei giunti**, che va articolato in una serie di considerazioni anche economiche; il problema della qualità dei giunti può dirsi, anzi, un problema essenzialmente di carattere economico o, meglio, di correlazione tra funzionalità, sicurezza e costo di una struttura.

Per tornare allo scopo principale di queste note, **la scelta del tipo di giunto da impiegare**, occorre altresì un quadro chiaro sulla **terminologia specifica** da adottare.

La classificazione dei tipi di giunto

I giunti saldati possono essere classificati in base a diversi criteri, in base alla necessità specifica o al contesto nel quale tale classificazione si rende necessaria. Le suddivisioni più comunemente adottate in ambito progettuale sono tre, per funzione o per tipologia geometrica.

Un **primo criterio** di suddivisione identifica i **giunti di forza e i giunti di collegamento**.

Per **giunti di forza** si intendono quelli destinati a sopportare le medesime componenti di sollecitazione delle parti che i giunti stessi collegano; ad esempio i giunti trasversali di conci che costituiscono una travata metallica, sopportano le medesime azioni e sono soggette allo stesso stato tensionale delle sezioni metalliche immediatamente contigue (Figura 1).



Figura 1

Giunti di Forza tra le piattabande dei conci e tra le anime dei conci



Figura 2

Giunto di Collegamento tra anima e piattabande di ogni conio

Per **giunti di collegamento** si intendono, invece, quei giunti saldati che, per la loro collocazione, non sono impegnati come le parti strutturali che collegano, benché assolvano la funzione fondamentale di mantenere la forma geometrica dell'elemento strutturale inalterata sotto carico. Il più classico esempio di giunto di collegamento è quello di composizione mediante giunti con cordoni d'angolo, di una trave saldata, ad esempio a "doppio T": quando tale elemento strutturale è inflesso, la tensione normale longitudinale dovuta al momento flettente viene sopportata dalle piattabande e dall'anima. Per tale ragione non occorre preoccuparsi di valutarne l'entità in corrispondenza della zona di contiguità tra le parti principali, dove agiscono solo le saldature, spesso con sezione resistente molto inferiore rispetto alle parti principali.

Nell'ipotesi di considerare anche le sezioni trasversali dei cordoni di saldatura nella reazione al momento flettente, si giungerebbe anzi a conclusioni errate; infatti, in virtù della sezione resistente assai limitata che presentano i cordoni, l'ipotesi di calcolo suddetta (errata) comporterebbe dei valori di tensione normale superiori (e di molto) a quelli ammissibili. In tale ipotesi non si terrebbe tuttavia in considerazione il vincolo alla deformazione rappresentato dall'anima e dalle piattabande, che agiscono "in parallelo" con i cordoni di saldatura e attraverso questa collaborazione pongono un tetto al valore della tensione normale agente; è per tale ragione che, dunque, come sopra detto, nei giunti di collegamento i cordoni di saldatura non vengono considerati nel calcolo della sezione resistente alle tensioni normali.

Considerazioni diverse vanno fatte invece per ciò che riguarda la tensione di taglio che i cordoni devono sostenere in corrispondenza della discontinuità, pena lo slittamento reciproco di anima e piattabande con conseguente riduzione del momento di inerzia della trave, della sua deformabilità e capacità portante.

Dalle considerazioni precedenti appare lecito supporre un diverso livello di attenzione da parte del progettista alle differenti funzioni che i giunti saldati devono assolvere: ciò generalmente si riflette sull'accuratezza del dimensionamento e sulla estensione e tipologia dei controlli non distruttivi da eseguire sui giunti.

Un **secondo criterio** di suddivisione dei giunti saldati prende in considerazione la forma geometrica e le direzioni secondo le quali gli elementi da saldare arrivano alla zona del giunto: quando le parti da saldare arrivano da direzioni complanari si parla di **giunti testa a testa**; quando le parti arrivano da direzioni perpendicolari fra loro o comunque inclinate, si parla di **giunti a T**.

Un **terzo criterio** di suddivisione dei giunti saldati, ma di non minore importanza rispetto al precedente, prende in considerazione la profondità di penetrazione della saldatura.

Da questo punto di vista i giunti saldati vengono distinti tra **giunti a completa penetrazione** e **giunti a parziale penetrazione**. Per giunti a completa penetrazione (generalmente indicati con la sigla CJP – complete joint penetration) si intendono quelli nei quali l'altezza della zona fusa interessa l'intero spessore di almeno una delle parti collegate. Per zona fusa si intende la porzione di materiale che durante la saldatura ha raggiunto la fusione, che comprende, in generale, una parte di materiale base ed il materiale di apporto utilizzato.



Figura 3 Giunto testa a testa a completa penetrazione (CJP)

Le figure aiutano più delle parole a comprendere meglio il significato delle definizioni:
Nelle figure n. 3 e n. 4 sono rappresentati due giunti a completa penetrazione, denominati CJP:
la fig.n. 3 si riferisce ad un giunto testa a testa in cui la fusione si è prodotta lungo l'intero spessore di entrambe le parti (o della più sottile qualora vi sia una differenza tra gli spessori);
la fig.n.4 si riferisce ad un giunto a T con l'anima interamente interessata dalla zona fusa.



Figura 4 Giunto a T a completa penetrazione (CJP)

Quando questa circostanza non si verifica (ovvero quando l'altezza della zona fusa non interessa l'intero spessore di almeno una delle parti collegate) si parla di **giunti saldati a parziale penetrazione** (PJP – partial joint penetration). Un ben noto sottoinsieme dei giunti a parziale penetrazione è quello dei classici giunti con cordoni d'angolo (Figura 5), dove la zona fusa si colloca quasi completamente all'esterno delle parti collegate con saldatura.

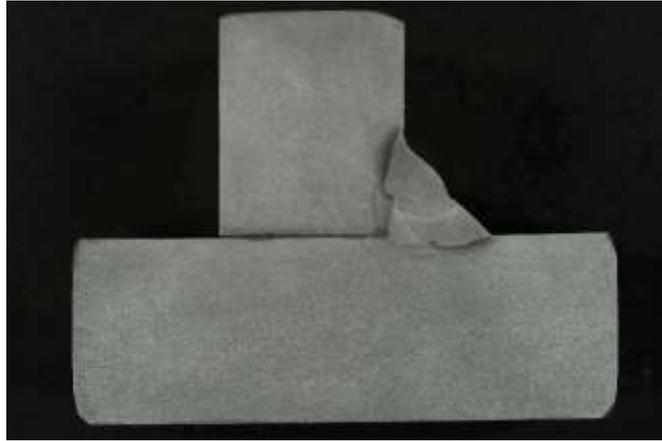


Figura 5 Giunto a T con cordone d'angolo (PJP)

Naturalmente un criterio di suddivisione dei giunti non esclude l'altro, sicché possono prodursi giunti a completa penetrazione di forza o di collegamento, così come a penetrazione parziale; nel seguito tuttavia proporremo alcune considerazioni che circoscriveranno le combinazioni tecnicamente più adeguate. Proprio per giustificare tali considerazioni è opportuno chiarire le sostanziali differenze che distinguono le due tipologie geometriche dei giunti a completa o parziale penetrazione.

Intaglio strutturale

In una struttura vengono identificate come zone di "intaglio strutturale" quelle in corrispondenza delle quali si determina un livello di tensione superiore rispetto a quello delle zone immediatamente contigue, per effetto di una repentina variazione di rigidità; la rigidità governa l'entità della deformazione elastica: imposta una certa deformazione, a rigidità maggiore corrisponde inevitabilmente tensione più alta. La variazione di rigidità può determinarsi per cambiamento della sezione geometrica di un corpo o per una variazione del materiale e del suo modulo elastico. Più repentina è la variazione di rigidità e maggiore è l'incremento di tensione rispetto alle zone contigue non perturbate o, in altri termini, l'intaglio è definito più "severo". In pratica in corrispondenza di un intaglio strutturale si verifica un incremento locale di sollecitazione che il progettista non tiene in considerazione in quanto molto spesso "occulto". Un esempio di intaglio strutturale, generalmente di significativa severità, è rappresentato da un difetto (discontinuità) bidimensionale.

Ma in ogni caso anche un giunto saldato può rappresentare un intaglio strutturale più o meno severo: nei giunti saldati vi è la compresenza di almeno due fattori. Sono rilevabili infatti:

- variazioni di geometria o di profilo (intaglio strutturale propriamente detto)
- variazioni nelle proprietà metallurgiche nel materiale base; in pochi millimetri si interfacciano infatti strutture metallurgiche anche molto diverse, ovvero quelle nella zona termicamente alterata dal ciclo termico di saldatura e quella nella zona fusa (intaglio metallurgico).

La severità dell'intaglio cambia da caso a caso e, di regola, è maggiore per i giunti a parziale penetrazione rispetto a quelli a penetrazione completa, sia nel caso dei giunti testa a testa che nel caso dei giunti a T (Figura 6); a parità di funzione e direzione di carico, paragonando i giunti a T a completa penetrazione o con cordoni d'angolo, sottoposti a un carico perpendicolare al piano della

piattabanda, l'intaglio strutturale dovuto alla variazione di profilo è più accentuato nel giunto con cordoni d'angolo rispetto al caso di giunto a completa penetrazione.

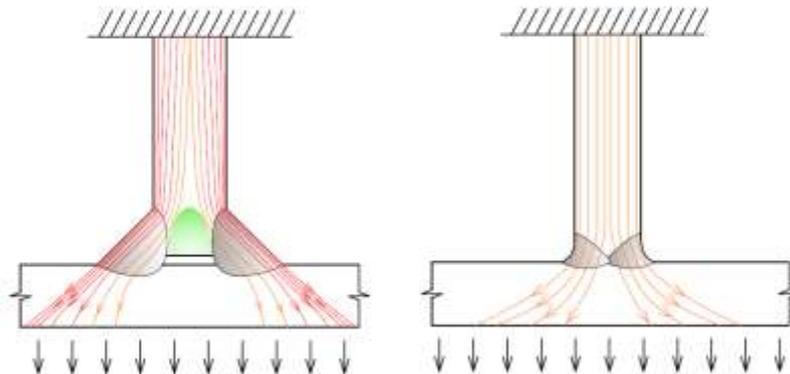


Figura 6 Schema del flusso delle linee di forza in giunti a T caricati perpendicolarmente all'asse della saldatura: confronto tra completa e parziale penetrazione

Ispezionabilità dei giunti ed efficacia dei controlli non distruttivi

Naturalmente costituisce intaglio strutturale anche un difetto di saldatura (discontinuità meccanica). A questo proposito occorre fare una breve premessa in merito ai controlli non distruttivi dei giunti saldati: le strutture metalliche hanno l'importante caratteristica di essere efficacemente ispezionabili ed ispezionate con l'ausilio di strumenti affidabili e facilmente impiegabili da personale adeguatamente istruito (con un percorso formativo che va da qualche settimana a qualche anno). Tale caratteristica non risulta di pari efficacia con altre tecniche di giunzione e soprattutto con l'uso di materiali non metallici, almeno allo stato attuale della tecnica.

In ciò va ricercata la ragione, a parere di chi scrive, per cui le opere metalliche saldate sono molto più controllate di altre: perché i giunti saldati e le strutture metalliche si sanno e si possono controllare in modo molto efficace e quindi farlo, e farlo bene, aumenta e garantisce l'affidabilità delle strutture. E tuttavia sul grado di efficacia dei controlli non distruttivi - sia in relazione al metodo adottato, al personale impiegato e al tipo di giunto - sussistono differenze importanti che saranno trattate in un successivo articolo (rimandiamo allo studio di testi specifici ed in particolare alle pubblicazioni dell'Istituto Italiano della Saldatura per una esauriente trattazione dell'argomento).



Figura 7 Cricca di fatica all'incrocio tra elementi di irrigidimento, rilevata con metodo di controllo magnetoscopico, tecnica con giogo magnetico e lacca bianca di contrasto

Scelta progettuale del tipo di giunto

La trattazione fin qui svolta, sebbene in forma di estrema sintesi, ci consente di riprendere il tema focale e rispondere alla domanda iniziale: quali considerazioni è opportuno fare già in fase progettuale e quali criteri seguire nella scelta dei tipi di giunzione da utilizzare nella struttura che si sta concependo?

Si tratta di scelte che, è bene sottolineare, devono rientrare tra le prerogative del progettista, e non sono delegabili né al fabbricante/costruttore né ad altre figure diverse dal progettista stesso; solo la formazione ingegneristica di quest'ultimo può, o dovrebbe, compendiare tutte le competenze utili e necessarie ad eseguire la scelta più opportuna in termini di sicurezza e di economicità della costruzione.

Non si intende con ciò evocare la figura del progettista onnisciente né idealizzare la summa di tutte le competenze specifiche in un solo individuo: per "progettista" si vuole qui intendere infatti quella figura (rappresentata da un team di progettazione o da un ingegnere supportato da esperti e specialisti nelle diverse discipline) su cui deve restare incardinato tutto il processo di progettazione e le relative scelte fondamentali.

Rifocalizzandoci dunque sul problema della scelta del tipo di giunto saldato occorre, in sintesi, tenere presente quantomeno:

- **l'effetto di "intaglio strutturale" o "concentrazione delle tensioni"**, che **penalizza maggiormente le saldature a parziale penetrazione e a cordoni d'angolo** nelle quali la particolare forma geometrica della giunzione induce significative concentrazioni di tensione, che devono essere considerate con attenzione nel verificare la corretta ed omogenea trasmissione degli sforzi statici ovvero la resistenza della giunzione stessa alla rottura per fatica o alla rottura fragile;

- **l'effettiva possibilità di effettuare i controlli non distruttivi** previsti dai codici di progettazione o dal progettista stesso; la controllabilità delle giunzioni è fortemente condizionata dalla loro configurazione geometrica: **i giunti a parziale penetrazione o con cordoni d'angolo sono efficacemente ispezionabili solo in superficie** e non nel volume della saldatura.

Tutto ciò può sintetizzarsi nelle seguenti conclusive considerazioni, limitandoci al caso delle azioni statiche:

- **quando le condizioni di carico sono particolarmente gravose**, in particolare in presenza di tensione normale di significativa entità oppure **quando le conseguenze di un cedimento locale possono pregiudicare la stabilità** della struttura o costituire pericolo per gli utenti, è opportuno prevedere un controllo non distruttivo esteso ed efficace; in altre parole, in tali circostanze **il giunto a completa penetrazione si lascia preferire** quale soluzione, ma per esso va contemplata altresì l'accessibilità al controllo sia durante le fasi di fabbricazione che durante la vita di servizio della costruzione;

- quando non sussistono le condizioni di cui sopra, in particolare in presenza di tensione di taglio anche di significativa entità ma con un modesto contributo della componente normale, si può ricorrere ai **giunti a parziale penetrazione**, purché ben controllati in superficie, che possono ottimamente assolvere le loro funzioni strutturali ma, rispetto ai "colleghi" a completa penetrazione, riducendo sensibilmente i costi (anche fino a cinque volte).

Senza pretese di esaustività, si propongono di seguito alcuni esempi:

- Giunto anima - piattabanda di trave a doppio T di solaio: di regola sono da considerarsi giunti di collegamento sollecitati con tensione di taglio molto al di sotto del limite elastico. La soluzione classica prevede un giunto con cordoni d'angolo.
- Giunto tra spezzoni di travi a doppio T di solaio: sono giunti di forza, il cedimento dei quali pregiudica la stabilità della struttura. La soluzione corretta prevede un giunto a completa penetrazione per piattabande e anima. Nelle costruzioni di minor pregio non è raro imbattersi nella soluzione di porre piatti sovrapposti ai giunti delle piattabande e dell'anima saldati "per maggiore sicurezza". Questa soluzione è senz'altro sbagliata e sconsigliabile perché non consente di discernere lo stato tensionale dei giunti e soprattutto rende incontrollabili i giunti testa a testa; la maggior sicurezza è da ricercarsi nella corretta esecuzione da parte di personale idoneo e nel buon controllo finale, più che nella duplicazione di saldature di scarsa qualità.



Figura 9 Giunzione testa a testa con doppiature di rinforzo: soluzione sconsigliata perché il giunto testa a testa non è più ispezionabile dopo la sovrapposizione delle piastre.

- Giunto anima-piattabanda di trave a doppio T per via di corsa di carro ponte: in questo caso il problema aumenta di complessità in quanto intervengono più fattori. Innanzitutto, le sollecitazioni dimensionanti in questo caso sono di fatica, nella grande maggioranza delle sezioni; va quindi fatto riferimento a criteri di progettazione idonei come indicato nella parte 9 della UNI EN 1993. Come ulteriore complicazione vi è però da aggiungere il fatto che, quando la rotaia della via di corsa è vincolata alla trave di sostegno, il carico delle ruote del carro ponte trasferisce un ulteriore, elevato carico di compressione locale alla porzione di giunto anima-piattabanda che giace al di sotto della ruota, mentre il giunto anima-piattabanda inferiore, ha sostanzialmente solo la funzione di giunto di collegamento. La soluzione classica prevede una piena penetrazione (CJP) per il giunto anima-piattabanda superiore, ciò al fine di garantire l'efficace trasmissione dei carichi ruota e una vita a fatica elevata e comunque ben definibile ai sensi di norma; la circostanza che il carico ruota produca tensione di compressione non è determinante. Infatti tale condizione non è garantita se la rotaia non è perfettamente centrata sul piano dell'anima per tutto il periodo di servizio; inoltre nei giunti saldati la presenza di tensione residua del processo di saldatura, fa sì che una parte del giunto sia teso indipendentemente dalla entità e dal "segno" delle tensioni esterne. Viceversa il giunto anima-piattabanda inferiore può essere previsto PJP per le ragioni già precedentemente discusse.

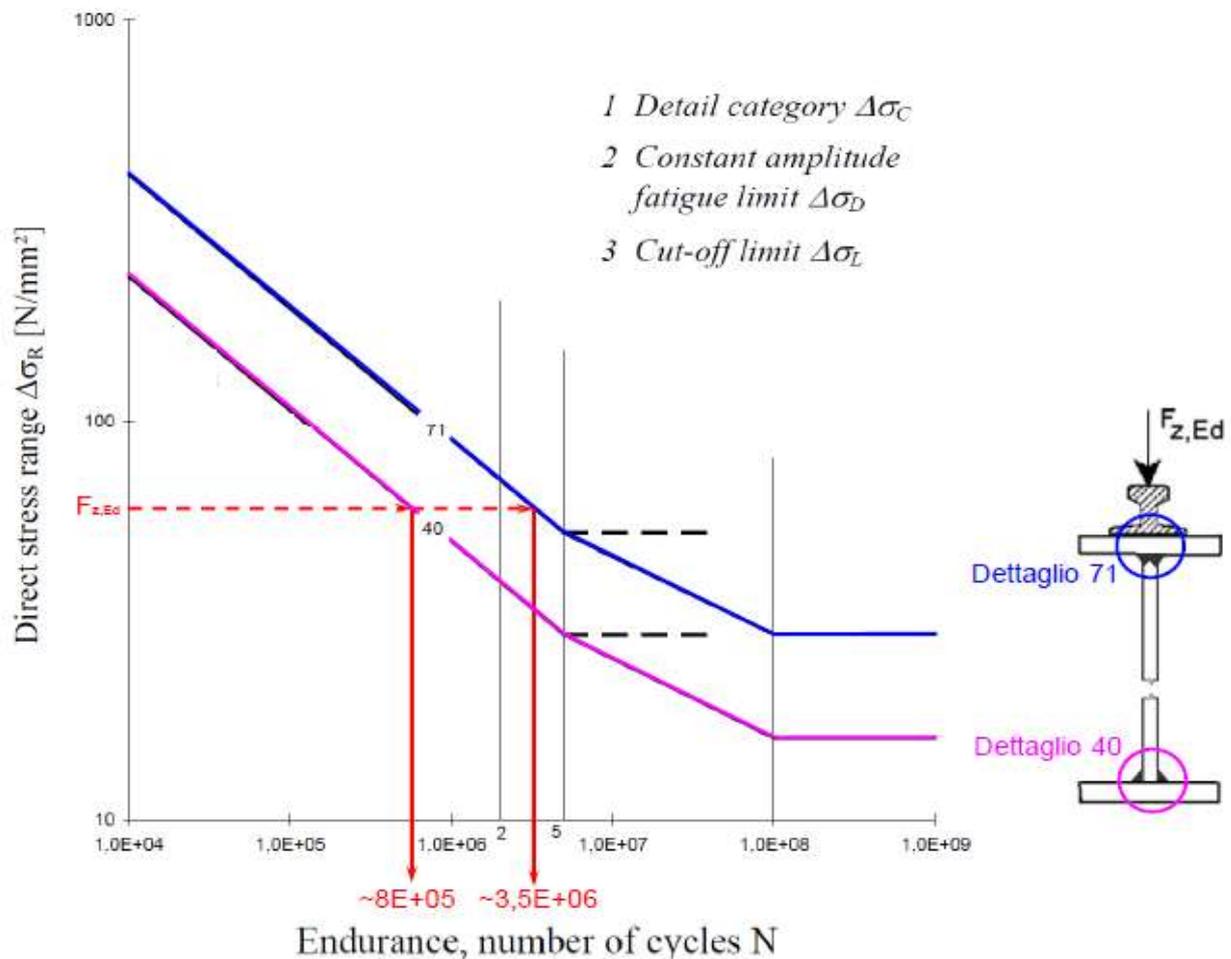


Figura 10 Confronto tra le curve S-N previste dalla norma UNI EN 1993-1-9 per giunti a T a completa o a parziale penetrazione.

Considerazioni finali

L'articolo si propone di indicare solo qualche criterio per la scelta del tipo di giunto saldato più idoneo nelle diverse applicazioni alle strutture metalliche, per gli aspetti legati all'impegno strutturale, all'effetto di intaglio, alla resistenza a fatica, alla ispezionabilità in costruzione ed in servizio, ecc..

Tra le non delegabili funzioni del progettista riteniamo che ci sia anche quella di armonizzare le esigenze di sicurezza dei collegamenti saldati con l'economicità del prodotto; per quanto ricca sia la letteratura tecnica, nulla può comunque sostituirsi alla sensibilità e alla perizia del progettista che deve declinare ed applicare le sue competenze di volta in volta al caso specifico in esame.

Il Gruppo Istituto Italiano della Saldatura vanta da questo punto di vista un'esperienza pluridecennale sulla concezione dei giunti saldati negli ambiti più diversi e può costituire un supporto specialistico ove il progettista o il fabbricante ne ravvisi la necessità.