

LANZA Dott. Ing. Michele
LANZONE Dott. Ing. Corrado
SERVETTO Dott. Ing. Chiara
Istituto Italiano della Saldatura - Genova

I CRITERI DI VERIFICA A FATICA DEI GIUNTI SALDATI IN ACCORDO ALLA NORMA ENV1993-1-1. PROBLEMATICHE DI VERIFICA ED INTERPRETAZIONE DELLA NORMA

Sommario

L'introduzione delle Norme Europee per la progettazione, costruzione ed ispezione delle strutture metalliche offre nuove opportunità al Progettista di impiegare al meglio l'acciaio garantendo nel contempo un adeguato grado di sicurezza. La parte relativa alla verifica di resistenza a fatica della Norma UNI-ENV1993-1-1 risulta di particolare interesse, per gli elementi di novità introdotti e per la migliore definizione di problematiche tradizionali. Le note che seguono, partendo da considerazioni di carattere generale sul fenomeno della fatica ad alto numero di cicli delle strutture metalliche saldate, illustra le problematiche di verifica e commenta alcuni aspetti di particolare interpretabilità della Norma.

1 Generalità

Un elemento strutturale che subisce, durante il servizio che è chiamato a svolgere, variazioni di carico significative o per l'entità di tali variazioni o per il loro numero, ovvero per entrambe tali circostanze, viene sottoposto a "fatica".

In altri termini se la sollecitazione in una determinata sezione di un certo elemento strutturale non mantiene il proprio valore costante nel tempo, essa si può definire "sollecitazione di fatica". Raramente le sollecitazioni mantengono inalterato nel tempo il proprio valore; tuttavia si parla di "fatica" senza aggiungervi aggettivi che ne descrivano aspetti particolari, solo quando si verificano variazioni significative di tensione a causa di significative variazioni di carico (es. $\Delta\sigma > 26 \text{ N/mm}^2$ secondo i criteri della Norma UNI-ENV 1993) e quando tali variazioni si ripetono un numero elevato di volte ($>10^4$) nella vita del componente.

Nel seguito verranno trattate le moderne modalità di verifica dei dettagli strutturali, generalmente saldati, che possono incorrere in un fenomeno particolarmente diffuso e temuto nelle costruzioni metalliche: quello della frattura per fatica, dove le modalità di carico sono caratterizzate da un elevato o elevatissimo ($>10^8$) numero di cicli, tensioni al di sotto del limite elastico e deformazioni macroscopiche reversibili.

In questo caso la nascita e la crescita di una rottura per fatica è da attribuire ad un cumulo di danno all'interno del materiale, concentrato in particolare nella zona di maggiore livello tensionale.

I meccanismi fisici sono molto complessi; quello probabilmente più accreditato prevede la nascita di atomi interstiziali, cioè disposti fuori dalle posizioni canoniche del reticolo, capaci di determinare stati di tensione tali da rompere i legami interatomici, specie in zone già particolarmente tensionate come il bordo dei grani.

Altri possibili siti per la nascita delle cricche di fatica sono le inclusioni di seconde fasi come allumina, carburi, ecc. Si può affermare che il danno è distribuito a caso nel materiale, ma il procedere del danno è legato alle zone di maggiore tensione, tanto che il piano di giacitura di una frattura per fatica è pressappoco perpendicolare alle maggiori tensioni di trazione, e la frattura si innesca sempre dalla superficie ove le tensioni sono maggiori (salvo il caso che siano presenti importanti difetti interni preesistenti al procedere della fatica).

Si possono definire tre fasi nel processo di evoluzione di una rottura per fatica:

- una prima fase durante la quale la frattura cresce dalle dimensioni infinitesime dei difetti del reticolo cristallino, a dimensioni apprezzabili visivamente o con l'ausilio di

strumenti di controllo non distruttivo: cioè una cricca dell'ordine del millimetro di lunghezza. Questa fase è chiamata di "nucleazione".

- una seconda fase di crescita della piccola cricca che riguarda una porzione via via più consistente della sezione resistente interessata dal fenomeno. Durante questa fase di "propagazione", la sezione integra si riduce e di conseguenza aumentano le tensioni agenti, anche mantenendo costanti i carichi applicati.
- una terza fase di "rottura" della sezione integra residua, a causa di tensioni eccessivamente elevate.

La fase di nucleazione può arrivare a contenere circa l'80% dei cicli di carico che conducono a frattura. Questa circostanza è estremamente importante e va considerata attentamente.

Se infatti su un elemento strutturale è presente un severo difetto di fabbricazione (come tipicamente le cricche a caldo o a freddo di saldatura o le incisioni marginali) oppure difetti dovuti a condizioni di servizio che determinino corrosione localizzata o tensocorrosione, quel difetto è già di dimensioni sufficienti a propagarsi e non è più necessaria una preliminare fase di nucleazione; in altri termini la presenza di difetti acuti può drasticamente ridurre la vita a fatica di un elemento strutturale anche di una quantità che raggiunge l'80%.

Dalle considerazioni sopra esposte si può trarre la conclusione che l'importanza dei difetti acuti sulle strutture, già non trascurabile quando queste vengono sollecitate staticamente, diventa critica in presenza di cicli di carico affaticante e discriminante della stessa affidabilità della struttura.

2 Parametri caratteristici del fenomeno

Il fenomeno della fatica è spesso di complessa descrizione, dal momento che in generale i componenti di macchine e gli elementi di strutture sono sottoposti a variazioni di carico caratterizzate da un certo grado di irregolarità.

Tuttavia è sempre possibile ridurre il fenomeno, applicando approssimazioni anche rilevanti, a una serie di cicli di tensione, cioè di regolari variazioni di tensione nel tempo, ognuna delle quali descritta da parametri caratteristici.

2.1 Definizioni

Per un completo prospetto delle definizioni dei parametri caratteristici dei cicli di carico e in generale di tutto quanto attiene al fenomeno della fatica, rimandiamo alla norma UNI-ENV 1993-1-1. Tuttavia, per chiarezza di esposizione, vogliamo richiamare alcuni concetti:

- a) La fatica è una condizione di carico durante la quale un elemento strutturale subisce una sensibile variazione di tensione, ripetuta nel tempo.
- b) Il danno per fatica è costituito dalla graduale propagazione di una rottura a seguito di ripetute fluttuazioni delle sollecitazioni.
- c) Il ciclo di fatica si determina quando la tensione varia nel tempo assumendo a intervalli regolari la stessa sequenza di valori. Un certo ciclo di fatica perdura tra i due istanti nei quali la tensione assume il valore algebrico minimo nell'ambito del ciclo stesso.
- d) Il campo di variazione delle tensioni, o più semplicemente l'ampiezza del ciclo $\Delta\sigma$, è la differenza algebrica (sempre positiva) tra la tensione massima (σ_{\max}) e la tensione minima (σ_{\min}) di un ciclo.
- e) Il numero di cicli di servizio o di progetto è il numero di cicli che si sono verificati o si ritiene che si possano verificare nella vita di un componente.
- f) La vita a fatica di un componente è il numero di cicli di determinata ampiezza che possono essere sopportati dal componente prima che si verifichi una frattura (più precisamente, in accordo alle indicazioni della UNI-ENV 1993-1-1, è il numero di cicli che può essere sopportato senza che la probabilità che si verifichi una frattura superi il 98%).
- g) Il rapporto di fatica R è il rapporto tra i valori algebrici della tensione minima e della tensione massima del ciclo.
- h) La tensione nominale è la componente di tensione che può far propagare una frattura. Essa è calcolata nel metallo base dell'elemento strutturale in prossimità

della potenziale cricca, in accordo alla semplice teoria della resistenza elastica dei materiali, escludendo tutti gli effetti della concentrazione delle tensioni.

- i) La tensione nominale modificata è la tensione nominale incrementata di un coefficiente appropriato di concentrazione delle tensioni, per tenere conto della eventuale discontinuità geometrica attribuibile alla forma del componente, che non sia già stata considerata nella classificazione del particolare dettaglio costruttivo.
- l) La tensione geometrica è la tensione massima principale nel metallo base adiacente al piede del cordone di saldatura, che tiene in considerazione gli effetti della concentrazione delle tensioni dovute alla geometria globale di un particolare dettaglio costruttivo, ma esclude gli effetti di concentrazione locale degli sforzi dovuti alla geometria della saldatura ed alle discontinuità nella saldatura e nel metallo base adiacente. La sollecitazione geometrica è pure denominata "di picco" ("hot spot stress").

3 Fattori che influenzano la vita a fatica

Nel seguito si vuole sottolineare l'importanza di alcuni aspetti che influenzano in modo più o meno rilevante la vita a fatica dei dettagli strutturali e che vengono presi in considerazione dalla Normativa per le verifiche di sicurezza.

3.1 La forma e l'intaglio strutturale

Innanzitutto la forma del dettaglio strutturale è determinante rispetto alla resistenza alla propagazione di una frattura per fatica. Di ciò ci si può rendere conto ricordando che la frattura per fatica si determina in zone con tensione particolarmente elevata, come in corrispondenza di brusche variazioni di forma di un elemento strutturale.

In realtà ogni variazione di forma costituisce un "intaglio strutturale" cioè una zona di materiale in cui la tensione è maggiore del valore deducibile dai rapporti tra le caratteristiche di sollecitazione (forze e momenti delle forze) con le caratteristiche geometriche della sezione resistente (area e momenti di inerzia).

Ciò avviene naturalmente anche quando l'elemento strutturale è sottoposto a carico statico, ma l'intaglio strutturale acquisisce una importanza determinante rispetto alla vita a fatica perché determina una amplificazione del ciclo affaticante, ed è l'ampiezza del ciclo di carico che governa la resistenza a fatica.

Le strutture saldate sono caratterizzate dalla presenza di brusche variazioni di forma; del resto uno dei pregi maggiori della tecnologia di giunzione per saldatura è appunto poter realizzare forme complesse adatte agli impieghi più disparati; alla presenza dell'intaglio strutturale può accompagnarsi la presenza di difetti di saldatura o di profilo come sovrametallo, eccesso di penetrazione, overlap o incisioni marginali, che esaltano l'effetto negativo dell'intaglio strutturale.

Non è un caso perciò che nelle strutture saldate le rotture si verifichino prevalentemente in corrispondenza dei giunti e che le normative per la stima della resistenza a fatica prendano in esame quasi esclusivamente dettagli saldati.

Più è severo l'intaglio strutturale cioè più la variazione di rigidità tra sezioni contigue è elevata e localizzata in un piccolo spazio, minore è la vita a fatica del dettaglio strutturale.

3.2 La direzione di applicazione dei carichi

Dettagli saldati affetti da intagli strutturali di diversa severità (ad esempio giunti saldati testa a testa con sovrametallo contenuto e giunti a T con cordoni d'angolo) mostrano una vita a fatica equivalente quando vengono caricati lungo l'asse del giunto.

Viceversa gli stessi dettagli strutturali possono comportarsi in maniera differente quando la direzione di applicazione dei carichi non è parallela all'asse.

Infatti quando il fluire regolare delle tensioni non viene alterato dalla presenza di un intaglio strutturale, cioè quando le tensioni attraversano sezioni di rigidità pressoché costante, l'intaglio non svolge alcuna azione di locale incremento di tensione e ciò equivale al caso che l'intaglio stesso non ci sia.

Viceversa, quando lo stato tensionale è alterato e localmente incrementato dalla presenza di un intaglio strutturale, cioè quando le tensioni interessano sezioni di rigidità diversa, allora tanto più è severo l'intaglio, cioè tanto più la variazione di rigidità è repentina, e tanto minore è la vita a fatica.

3.3 Lo spessore

Al crescere dello spessore di un elemento strutturale diminuisce la vita a fatica, come peraltro diminuisce la resistenza rispetto a qualunque altro meccanismo di frattura.

Infatti all'aumentare dello spessore si riduce la capacità di deformazione all'apice della cricca di fatica e di conseguenza si riduce la quantità di energia dissipata in deformazione plastica. Ciò consente di rendere disponibile una quantità maggiore di lavoro delle forze esterne per l'avanzamento della frattura.

3.4 La frequenza dei cicli di carico

La frequenza di applicazione dei carichi non ha influenza sulla vita a fatica, in ambiente non aggressivo come l'aria. Si ricordi che con "vita a fatica" è stato definito il numero di cicli che produce la frattura di un dettaglio e non il tempo che occorre per lo sviluppo del fenomeno.

3.5 Il tipo di acciaio

Si può affermare che esiste una certa differenza di vita a fatica tra i diversi acciai da costruzione legata alla loro struttura metallurgica: la vita a fatica è sfavorevolmente influenzata dalla quantità dei siti di nucleazione (si pensi ad esempio alle seconde fasi) e soprattutto dall'incremento del diametro medio dei grani.

Tuttavia gli altri fattori citati, la forma, la direzione di applicazione dei carichi e lo spessore, hanno un ruolo sensibilmente più importante nella determinazione della vita a fatica; pertanto, in genere, gli acciai da costruzione quando costituiscono dei dettagli saldati, vengono assimilati l'uno all'altro, a meno che non si disponga di dati specifici per un particolare dettaglio, costruito con saldatura con un determinato acciaio.

3.6 Le tensioni residue di saldatura

In generale i dettagli strutturali allo stato come saldato sopportano un livello di tensione residuo di saldatura dell'ordine della tensione di snervamento del materiale base. Quando viene applicato dall'esterno un ciclo di carico affaticante si ritiene, con buona approssimazione, che la reale variazione di tensione avvertita dalle zone più critiche del giunto abbia come limite superiore la tensione di snervamento e come limite inferiore la tensione di snervamento meno l'ampiezza del ciclo di carico, indipendentemente dal rapporto di fatica, cioè dal valore algebrico di σ_{\max} e σ_{\min} .

Il ciclo di carico locale risulta perciò positivo e di ampiezza pari a quella del ciclo di carico applicato, prescindendo da eventuali effetti di intaglio strutturale.

Da queste considerazioni consegue che se il ciclo di carico esterno applicato è tutto positivo ($R \geq 0$), il ciclo di carico locale è del tutto equivalente a quello applicato, di modo che lo stato tensionale residuo appare ininfluenza rispetto alla resistenza a fatica.

Se invece il ciclo di carico esterno è in parte in compressione, considerando che le sollecitazioni di compressione giocano un ruolo assai meno importante rispetto alla trazione sull'avanzamento per fatica di una cricca, la presenza dello stato tensionale

residuo cambia il ciclo di carico locale rispetto a quello applicato e rende il primo più severo del secondo.

Ne consegue una considerazione importante: il trattamento termico di distensione dei giunti saldati, riducendo il valore delle tensioni residue rende il ciclo di carico locale in corrispondenza dei giunti saldati piuttosto simile al ciclo di carico applicato. Pertanto quando quest'ultimo ha una parte in compressione, il trattamento termico è efficace nell'aumentare la resistenza a fatica del dettaglio strutturale rispetto al caso come saldato, al quale corrisponde comunque un ciclo di carico locale tutto positivo.

3.7 La criticità e la ispezionabilità dei dettagli strutturali

Una importante innovazione introdotta dalla nuova Norma europea è costituita dalla considerazione prevista per la ispezionabilità della struttura. Infatti come verrà illustrato nel seguito, il coefficiente di sicurezza dipende in maniera esplicita, e abbastanza definita numericamente, da due fattori: la criticità dell'elemento strutturale (cioè le conseguenze che il suo cedimento avrebbe sulla funzionalità e sulla sicurezza della struttura) e la sua ispezionabilità (cioè la possibilità pratica di individuare prematuramente delle rotture in fase di evoluzione per fatica).

4 Rappresentazioni classiche dei risultati delle prove di fatica

4.1 Le curve di Wohler

Per circa un secolo fino agli anni '70 la rappresentazione dei risultati sperimentali ottenuti su provette di acciaio e su giunti saldati ha fatto riferimento più o meno diretto alla rappresentazione di Wohler, il primo autorevole studioso di fatica.

Le curve di Wohler vengono tracciate su un diagramma che tiene in ascissa la vita a fatica (numero di cicli N) e in ordinata la tensione massima del ciclo. Tali curve rappresentano in genere i risultati di prove su campioni in materiale base mantenendo a parametro il rapporto di fatica R .

4.2 I diagrammi di Smith

Un'altra rappresentazione classica dei risultati di prove sperimentali è quella di Smith che propone le tensioni massime e minime in funzione della tensione media, fissato un certo valore della resistenza a fatica N .

4.3 I diagrammi di Moore-Kommer-Jasper

Questi diagrammi sono stati utilizzati come sussidio di progettazione dei dettagli saldati negli anni '70-'80. In particolare la versione della norma italiana UNI 10011 rimasta in vigore fino al 1988, riportava tali curve per una serie abbastanza ampia di dettagli saldati.

I diagrammi di Moore riportano il rapporto di fatica R in funzione della tensione massima ammissibile per il ciclo di fatica. Ogni diagramma è tracciato a resistenza a fatica costante e in particolare per 10^5 , 6×10^5 e 2×10^6 cicli; sul diagramma compare un fascio di curve, ognuna delle quali si riferisce ad un certo dettaglio strutturale, o a più dettagli di comportamento simile raggruppati nella medesima categoria di resistenza.

4.4 Note di commento alle rappresentazioni classiche

L'uso dei diagrammi di Moore, di Smith o di Wohler suggerisce l'idea che i cicli con rapporto di fatica basso, in particolare $R = -1$, ciclo di fatica alternata, siano più pericolosi rispetto ai cicli di fatica a $R = 0$, ciclo di fatica pulsata, o a R positivo.

In effetti dall'esame di quelle curve si evince che la tensione massima ammissibile o di rottura di un ciclo diminuisce al diminuire del rapporto R .

Si ritiene che le considerazioni di cui sopra descrivano un problema mal posto; se infatti si considera l'approccio fisico al fenomeno si deve convenire che ciò che governa il fenomeno stesso è l'entità della deformazione che ogni ciclo di carico produce all'apice di un difetto; tale deformazione deve essere correlata più strettamente a tutto il ciclo di carico, cioè alla sua ampiezza più che al valore della tensione che viene imposta dai carichi esterni, valore che comunque può avere poco da spartire con lo stato di tensione e deformazione locale all'apice del difetto.

E in effetti anche solo facendo banali considerazioni matematiche su una qualunque curva di Moore si constata che l'ampiezza della tensione ammissibile rimane pressoché costante al variare di R , e semmai aumenta quando diventa significativa la componente di compressione: R prossimo a -1 .

Se infine si passa a considerare i risultati sperimentali ottenuti su dettagli strutturali al vero affetti da tensioni residue rilevanti, si constata la indipendenza della resistenza a fatica dal rapporto R , mentre acquista un ruolo determinante il campo di variazione delle tensioni $\Delta\sigma$ (si veda il paragrafo 3.6).

4.5 Rappresentazione moderna dei risultati delle prove di fatica: le curve S-N

Le moderne normative come la UNI-ENV1993-1-1 e la UNI 10011/88 utilizzano una rappresentazione dei risultati sperimentali delle prove di fatica che pone in relazione il campo di variazione delle tensioni $\Delta\sigma$, con la resistenza a fatica N su un diagramma bilogarithmico: curve di progetto S-N.

I parametri caratteristici delle curve S-N sono i seguenti:

- ogni curva è una spezzata; essa rappresenta la resistenza a fatica di una serie di dettagli strutturali, in massima parte saldati, di comportamento simile nell'ambito della dispersione dei risultati tipica del fenomeno di fatica.
- il numero identificativo di ogni curva " $\Delta\sigma_c$ " rappresenta l'ampiezza del ciclo ammissibile per una fissata vita a fatica, pari a 2×10^6 cicli. Tale numero corrisponde anche a una specificata categoria di dettaglio strutturale. In figura 1 è riportata, a titolo di esempio, la curva S-N relativa alla categoria 71; a tale categoria la norma fa corrispondere ad esempio il giunto testa a testa su piatto di sostegno caricato trasversalmente.
- le curve vanno interpretate nel modo seguente: se esiste un solo tipo di ciclo di carico, cioè una sollecitazione di fatica ad ampiezza costante, la curva si riduce a una spezzata a due tratti, uno inclinato e uno orizzontale.
Il tratto orizzontale non è tracciato sul diagramma fornito dalla Norma; esso comunque parte da un punto angoloso (detto anche ginocchio) in corrispondenza di 5×10^6 cicli.
L'ampiezza corrispondente al ginocchio viene considerata il limite di fatica per i dettagli rappresentati da quella curva: cioè l'ampiezza di tensione che assicura una resistenza indefinita purché non si verifichino nella vita del componente altri tipi di cicli di carico, perfino di ampiezza inferiore.
Se invece il componente è sollecitato da diversi tipi di ciclo di carico di diversa ampiezza, oppure da una sequenza non regolare di sollecitazioni, la curva da considerare è una spezzata a tre tratti, come rappresentata sui diagrammi normativi, con un tratto orizzontale (limite di fatica) posto a 10^8 cicli.
- le curve sono riferite a dettagli allo stato come saldato, non distesi, di spessore non superiore a 25 mm.

6 Uso delle curve S-N per il progetto degli elementi strutturali

Le curve messe a disposizione dalle norme costituiscono uno strumento di calcolo semplice ed efficace; tuttavia la precisione dei risultati che se ne possono trarre dipende in modo sensibile dai dati a disposizione del progettista e poiché i problemi di fatica sono spesso carenti quanto a conoscenza e precisione dei dati, sbagliare di un ordine di grandezza la stima della resistenza a fatica è una possibilità assai meno remota di quanto si ritenga.

Le operazioni che il progettista è chiamato a compiere per la verifica a fatica di un componente sono molteplici e complesse.

6.1 Scelta della categoria di dettaglio strutturale

Innanzitutto è necessario assimilare il dettaglio che interessa a uno di quelli classificati dalla norma di progetto: il numero di questi dettagli, anche se incrementato rispetto alle normative tradizionali, è pur sempre limitato e di conseguenza l'approssimazione da fare può essere pesante.

In generale non sono molti i casi in cui il progettista può completamente assimilare il particolare costruttivo a un dettaglio strutturale previsto dalla norma.

In tutti gli altri casi si dovrebbe fare riferimento nei calcoli alle sole curve 90, 71 o 36 a seconda che si abbia a che fare con giunti testa a testa o con cordoni d'angolo. Nei calcoli andrebbero introdotte le tensioni geometriche al posto di quelle nominali. Tali tensioni possono essere determinate o attraverso misure estensimetriche, oppure attraverso analisi più sofisticate, in genere con l'utilizzo di programmi di calcolo agli elementi finiti.

Si ritiene che questa impostazione sia correttamente cautelativa quando i particolari costruttivi sono sensibilmente diversi dal dettaglio costruttivo ovvero quando il comportamento strutturale (deformazioni e tensioni) non sia affatto assimilabile a quello di un dettaglio strutturale normativo.

In moltissimi casi non ci si trova in tali condizioni: il dettaglio è simile almeno dal punto di vista del comportamento strutturale ad uno di quelli previsti normativamente ed è logica e fondata la stima delle tensioni agenti in prossimità del giunto a partire dalle tensioni nominali.

In tali casi si ritiene applicabile la seguente procedura: utilizzare il Δ di tensione nominale (eventualmente modificato) e riferirsi alla curva di progetto di un dettaglio pressoché equivalente a quello oggetto di studio.

Ad esempio il giunto a sovrapposizione "singolo" (cioè due sole lamiere sovrapposte) saldato con i soli cordoni trasversali non è compreso tra quelli riportati dalla norma; tuttavia in questo caso si ritiene lecito riferirsi al dettaglio 36 (giunto a T con cordoni sollecitati trasversalmente al proprio asse), tenendo conto dell'effetto di disallineamento con adeguati coefficienti.

6.2 Scelta della ampiezza del ciclo di carico

In generale si assumono come valori di tensione per i calcoli, quelli misurati o calcolati negli elementi strutturali concorrenti nel giunto saldato, in prossimità del giunto stesso: le tensioni nominali.

In molti casi tuttavia il giunto saldato viene direttamente sottoposto ad azioni ed è necessario anche valutare le tensioni in corrispondenza della sezione di saldatura (tenendo conto di eventuali effetti di disallineamento); tipicamente ciò avviene quando si considerano giunti a sovrapposizione dove la sezione di gola dei cordoni è direttamente sottoposta a tensioni normali e di taglio. In questi casi sussiste anche la necessità di definire le dimensioni della sezione di gola, problema ovviamente direttamente correlato con la definizione del livello di tensione.

In particolare, in fase di progetto, l'altezza di gola dei cordoni è assunta con riferimento ai disegni ed alle tolleranze di accoppiamento previste dalla specifica di costruzione: ove, ad esempio, sia ammesso un valore di distacco tra gli elementi da accoppiare, si deve considerare il lato dei cordoni ridotto di tale distacco e di conseguenza ridurre l'altezza di gola.

In fase di verifica sul manufatto, si potrà viceversa fare riferimento a misure dirette di lato e altezza di gola, tenendo conto dei limiti imposti dalle metodologie di misura e dall'accessibilità ai giunti.

In ogni caso dovrà essere definito uno o più valori caratteristici delle ampiezze di tensione applicate, $\Delta\sigma$, che costituiscono ovviamente uno dei termini di riferimento per la progettazione o la verifica di un dettaglio.

In generale il valore della ampiezza di tensione applicata va moltiplicato per un appropriato coefficiente parziale di sicurezza sui carichi γ_{Ff} ; la norma tuttavia consente di assumere per tale coefficiente il valore 1 in mancanza di dati specifici del problema.

La ampiezza di tensione applicata risulterà quindi in generale:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma.$$

6.3 Definizione del numero di cicli di carico

Il numero di i cicli di carico affaticanti di progetto "n" deve essere definito con la maggiore precisione possibile, costituendo una delle variabili che maggiormente influiscono sulla resistenza a fatica. Spesso questo dato è di difficile determinazione, e viene dedotto da verifiche su prototipi o su strutture di geometria simile in servizio, ovvero assunto convenzionalmente (come per i ponti metallici stradali in Italia) o sulla base di valutazioni statistiche (come per i ponti metallici stradali progettati sulla base dei dati di traffico sulla rete europea) o da stime di funzionamento e calcoli sofisticati atti a descrivere lo stato tensionale locale, come per elementi di macchina operatrice.

6.4 Determinazione della ampiezza di tensione ammissibile

Una volta definito il numero di cicli affaticanti "n" e la categoria del dettaglio strutturale " $\Delta\sigma_c$ " è possibile, intercettando la curva con una retta verticale posta alla ascissa n, determinare la corrispondente ampiezza della resistenza a fatica " $\Delta\sigma_R$ ".

Il valore della ampiezza " $\Delta\sigma_R$ " va diviso per un appropriato coefficiente parziale di sicurezza γ_{Mf} , della resistenza a fatica; la Norma ENV indirizza il progettista nella scelta del valore da assumere per tale coefficiente introducendo un significativo elemento di novità rispetto alle Norme tradizionali: il valore del coefficiente parziale di sicurezza per la resistenza a fatica γ_{Mf} , dipende infatti dalla criticità del componente e dalla sua ispezionabilità (si veda a tale proposito il punto 3.7), potendo variare da 1 a 1.35 con conseguenze rilevanti sulla verifica a fatica (tabella 1). La ampiezza di tensione ammissibile risulterà in generale:

$$\Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}$$

6.5 Verifica di resistenza a fatica

Nel caso che la struttura sia sottoposta a un solo tipo di ciclo di carico caratterizzato da una ampiezza $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma$, da un numero di cicli di progetto "n", e di conseguenza da una tensione ammissibile di ampiezza $\Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}$, la verifica di resistenza consiste nel confronto tra i due valori sopra determinati. La verifica a fatica è soddisfatta se si verifica:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma \leq \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}$$

6.6 Il danno cumulativo

Quando un dettaglio strutturale è sottoposto a una variazione di carico non regolare, occorre ricondurre il caso ad una serie di diversi tipi di cicli adottando approssimazioni lasciate alla discrezione del progettista o suggerite dalla Norma UNI-ENV 1993, come la regola del serbatoio.

In questo modo, a partire da una variazione continua di carico, si ottiene un istogramma rappresentativo di una serie di tipi di ciclo di carico con diversa ampiezza ($\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3, \dots$) e diversi numeri di cicli di progetto (n_1, n_2, n_3, \dots): tale istogramma è chiamato spettro di carico.

La verifica di resistenza del dettaglio deve tenere conto degli effetti che producono tutti questi diversi tipi di cicli di carico, cioè del "danno cumulativo" prodotto dall'insieme di quei cicli.

A tale scopo si adotta una delle metodologie previste dalla Norma, ad esempio la "regola di Miner". Dalla curva di progetto si ricavano i numeri di cicli ammissibili (N_1, N_2, N_3, \dots) corrispondenti alle ampiezze dei cicli di carico applicate ($\gamma_{Ff}\gamma_{Mf}\Delta\sigma_1, \gamma_{Ff}\gamma_{Mf}\Delta\sigma_2, \gamma_{Ff}\gamma_{Mf}\Delta\sigma_3, \dots$).

Infine si calcola la somma dei rapporti tra i cicli di progetto n_i e quelli ammissibili N_i . Se si verifica che:

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

la verifica di resistenza al danno cumulativo è soddisfatta.

6.7 Sollecitazioni composte

Una delle maggiori difficoltà che devono essere affrontate per la verifica di calcolo a fatica è stabilire come tenere conto di diversi tipi di sollecitazioni agenti sul giunto. Infatti oltre alla possibile presenza di diversi tipi di cicli di carico, possono verificarsi, nell'ambito dello stesso ciclo di carico, diversi tipi di sollecitazioni agenti, di taglio o normali, oppure con direzioni di applicazione differenti o variabili.

Per quanto riguarda questo aspetto la norma ENV 1993-1-1 risulta effettivamente innovativa perchè prevede una specifica metodologia di cumolazione.

In particolare vengono considerati diversi casi:

- a) quando le componenti di taglio non superano il 15% delle componenti normali la norma consente di trascurarle;
- b) nel caso in cui le tensioni normali e tangenziali varino simultaneamente e la direzione della massima tensione principale non cambi significativamente, la norma consente di fare riferimento alla massima variazione della tensione principale; tale modo di procedere può essere eccessivamente conservativo quando la direzione principale si discosta sensibilmente dalle direzioni di sollecitazione previste per un determinato dettaglio strutturale, e quando di conseguenza si è costretti a riferirsi per le verifiche al dettaglio "peggiore";
- c) nel caso in cui le tensioni normali e tangenziali varino indipendentemente la norma suggerisce una modalità di verifica sostanzialmente innovativa e ben definita: consente infatti di valutare sul medesimo giunto il numero di cicli ammissibile, utilizzando diverse curve in corrispondenza dei diversi tipi di ciclo di carico; infatti benché tutti i cicli nella realtà sollecitino il medesimo giunto, questo si comporta in maniera diversa a seconda della direzione di applicazione dei carichi e quindi è assimilabile di volta in volta a un diverso tipo di dettaglio normativo. Eseguiti infine i rapporti tra numero di cicli di carico e numero di cicli ammissibile, si adotta il solito principio di sovrapposizione degli effetti, utilizzando ad esempio la regola di Miner.

Quest'ultimo modo di procedere è da considerarsi del tutto generale e vantaggiosamente applicabile anche al caso b).

6.8 Effetto dello spessore

Tra le varie cautele che occorre considerare sulle verifiche a fatica, si ricorda di tenere conto dello spessore degli elementi strutturali. Infatti le curve di progetto sono dedotte da prove sperimentali eseguite in massima parte su dettagli di spessore inferiore a 25mm e pertanto sono a stretto rigore utilizzabili solo per elementi sottili.

Per elementi di spessore "t" maggiore di 25 mm la normativa prevede che le curve di resistenza vengono ridotte, se l'effetto dello spessore non è già tenuto in conto dalla categoria del dettaglio strutturale. In particolare dovrà essere utilizzata una curva di resistenza traslata verso il basso secondo il rapporto $\Delta\sigma_r' = \Delta\sigma_r \cdot (25/t)^{1/3}$

6.9 Strutture saldate distese

Per le strutture sottoposte a trattamento termico di distensione (vedere punto 3.6), la Norma UNI-ENV1993-1-1 consente di fare riferimento a un ciclo di carico fittizio di ampiezza efficace ridotta rispetto a quella applicata dai carichi esterni:

$$\Delta\sigma_{\text{efficace}} = \Delta\sigma_{\text{trazione}} + 0,6 \Delta\sigma_{\text{compressione}}$$

dove $\Delta\sigma_{\text{trazione}}$ e $\Delta\sigma_{\text{compressione}}$ sono rispettivamente le parti positiva e negativa del ciclo di carico applicato.

TABELLA 1

Coefficienti parziali di sicurezza per la resistenza a fatica γ_{M1}

Ispezioni ed accessibilità	Componenti non critici ("fail-safe")	Componenti critici ("non fail-safe")
Ispezioni periodiche e manutenzione *). Buona accessibilità	1,00	1,25
Ispezioni periodiche e manutenzione *). Scarsa accessibilità	1,15	1,35

*) Vedere 9.3.1(2) riguardante l'ispezione.

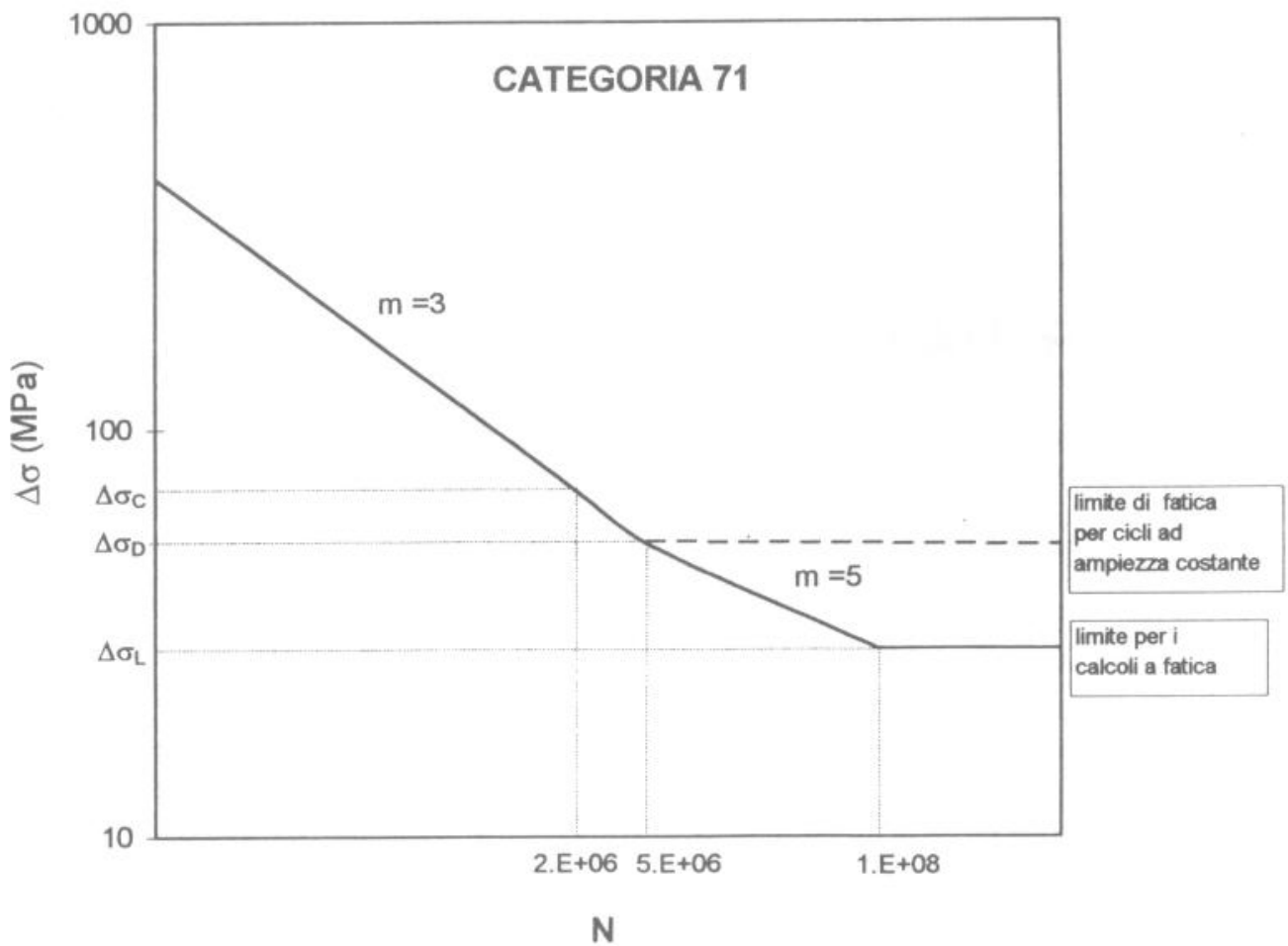


FIGURA 1