

COMPORAMENTO A FATICA DELL'ACCIAIO 30NiCrMoV12 PER DIVERSE
FINITURE SUPERFICIALI DEI CAMPIONI

A. De Iorio & G. Florio
(Università di Napoli - F.S. di Roma)

Sommario

Vengono illustrati i risultati di una prima indagine sperimentale condotta sull'acciaio 30NiCrMoV12 per studiarne il comportamento a fatica in funzione del tipo di finitura superficiale degli articoli di prova. Tale indagine si inquadra in quella più vasta programmata per studiare il fenomeno del danno cumulativo a fatica e formulare un criterio di valutazione del danno per detto materiale in condizioni di carico comunque variabili.

Introduzione

La sensibilità dei materiali metallici agli intagli, in senso lato, è, come si sa, fonte di preoccupazione per tecnici preposti alla progettazione di manufatti destinati a sopportare carichi variabili nel tempo. Una volta scelto il materiale, infatti, il progettista non può limitarsi ad assegnare le dimensioni ai singoli componenti della struttura da realizzare esclusivamente in funzione del carico applicato agli stessi, dovendo, nel caso di carichi variabili, riporre molta attenzione anche nel prevedere o stabilire le dimensioni e l'orientamento dei difetti

geometrici e strutturali introdotti in ogni componente dai processi di produzione.

Ma per questo è necessario disporre di dati di base sul comportamento a fatica dei materiali in funzione del tipo di carico, della finitura superficiale e degli eventuali trattamenti meccanici, termici o chimici cui possono essere sottoposti.

Lo scopo del presente lavoro è appunto quello di fornire un contributo alla individuazione, per un particolare acciaio, del legame esistente tra il grado di finitura superficiale e la resistenza a fatica di campioni ottenuti con processi di fabbricazione e di lavorazione ben definiti.

L'indagine è stata svolta nell'ambito di un programma di ricerca¹ su acciai di interesse ferroviario articolato nelle seguenti fasi:

- 1) Scelta e preparazione di un acciaio con caratteristiche meccaniche, tensili e tecnologiche rigorosamente individuate e variabili in intervalli di valori più ristretti di quelli previsti dalle norme UNI;
- 2) progettazione dell'articolo di prova nel rispetto della normativa ASTM;
- 3) definizione delle fasi di lavorazione e di finitura superficiale delle provette;
- 4) realizzazione delle provette presso le Officine F.S. di Verona e, per la lappatura, presso la Galileo di Firenze;
- 5) esecuzione delle prove per il tracciamento delle curve P-S-N (probabilità di sopravvivenza-resistenza a fatica-durata);
- 6) valutazione dell'effetto della finitura superficiale sulla resistenza a fatica;
- 7) valutazione del danno cumulativo e formulazione di un criterio di danno;
- 8) correlazione tra velocità di propagazione del danno e parametri della meccanica della frattura.

Riferiamo qui di seguito delle attività svolte e dei risultati relativi ai punti 5 e 6, essendo stati già pubblicati quelli relativi ai primi quattro punti [1] e all'indagine preliminare su acciaio C40 [2] svolta per verificare la fattibilità del programma.

Materiale impiegato e programma di prove

Il conseguimento dei principali obiettivi dell'anzidetto programma non

¹) Convenzione di ricerca stipulata il 30.07.79 dall'Università degli Studi di Napoli con le Ferrovie dello Stato.

è legato tanto alla qualità del materiale, quanto alla possibilità di conoscere esattamente quali sono i fattori che influenzano tale qualità e in che misura contribuiscono a definirla. Ma il controllo di questi fattori diventa tanto più possibile e agevole, quanto più alta è la qualità del processo di fabbricazione del materiale, la quale si riflette positivamente sulla qualità del materiale stesso. Per questo motivo sono stati previsti, e già effettuati, una serie di controlli molto rigorosi del materiale scelto per le prove, l'acciaio tipizzato 30NiCrMoV12 utilizzato nell'azienda ferroviaria per la costruzione di assili, durante l'intero processo di fabbricazione descritto altrove [1]. In particolare, sono stati effettuati per ogni colata una prova Jominy (con controllo della metodologia di prova), una prova di microdurezza e un "check" di analisi, mentre per ogni lotto costituito da ca. 30 barrotti, di diametro $\varnothing = 52 \text{ mm}$ e di lunghezza $L = 600 \text{ mm}$, sono state effettuate una prova di trazione, una di resilienza longitudinale, una di resilienza trasversale, un'analisi di microstruttura e un controllo della dimensione del grano. Inoltre, tutti i barrotti sono stati controllati, con esito positivo, mediante ultrasuoni.

Esami micrografici hanno portato alla evidenziazione di strutture tra la bainitica e la martensitica con qualche aciculante.

Le differenze riscontrate non sono rivelanti. Più marcate sono risultate le differenze nei valori delle caratteristiche meccaniche ottenuti dalle prove: solo 21 lotti su un totale di 35 hanno soddisfatto le caratteristiche richieste: $R = (927 \div 988) \text{ N/mm}^2$, $R_s = 333 \text{ N/mm}^2$, per cui s'è resa necessaria la rifusione dell'acciaio dei rimanenti quattordici lotti, dopo alcuni tentativi infruttuosi di correggere detti valori con trattamenti termici di rinvenimento effettuati con diverse modalità operative.

Oltre alla preparazione molto accurata del materiale e delle provette, è stata prevista l'esecuzione delle prove con una sola macchina in condizioni ambientali e operative ben controllate per limitare la dispersione dei risultati attribuibile a questi fattori.

L'apparecchiatura principale di prova utilizzata è un pulsatore a risonanza da 250 kN dinamico, servocontrollato elettronicamente, facente parte del sistema Hydropuls.

Le prove, effettuate in regolazione di forza con un carico variabile sinusoidalmente, sono state programmate e controllate tramite computer. L'errore complessivo riferito alla forza nominale di 250 kN, risultante da: errore da linearità, isteresi, ripetibilità come pure diversità fra coefficienti di trasmissione con carico in trazione e compressione, è minore o uguale allo 0,02%, cioè un errore massimo di applicazione della forza di $\pm 50 \text{ N}$.

Preliminarmente su ognuna delle provette si è effettuata una prova di durezza per poter raggruppare, in base all'istogramma delle frequenze delle durezza, provette aventi caratteristiche meccaniche molto simili tra esse e trattare tali gruppi separatamente come se ciascuno fosse di un materiale diverso da quello degli altri:

ogni tipo di prova eseguita con provette di un gruppo viene ripetuta sullo stesso numero di provette prese da ognuno degli altri gruppi. La tipologia delle prove è molto semplice, trattandosi inizialmente di prove con carico alterno-simmetrico ($R = -1$) di ampiezza costante fino a rottura e da effettuare a cinque livelli diversi per il tracciamento delle curve S-N, una per ogni gruppo di provette.

Dimensionamento e preparazione delle provette

Tutti i barrotti sono stati marcati in modo da potersi ricondurre in qualsiasi fase dell'indagine alla esatta posizione sequenziale di produzione del singolo barrotto.

Da ogni barrotto sono state ricavate due provette aventi la geometria riportata nella fig. 1 e n. 2 dischi di spessore $s = 15 \text{ mm}$ e diametro

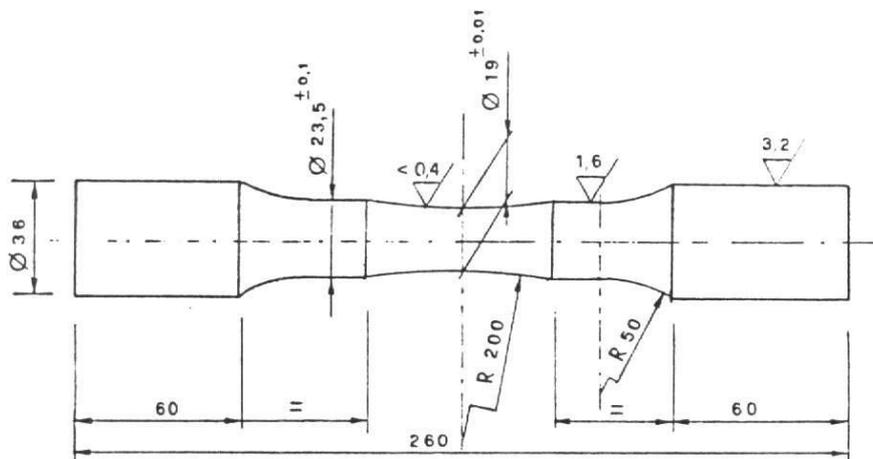


Fig.1 - Geometria delle provette.

$\varnothing = 52 \text{ mm}$, di cui uno prelevato da una estremità del barrotto e uno in mezzzeria dello stesso, per le prove di durezza e le analisi di struttura previste.

Avendo la possibilità di effettuare le prove di fatica su una macchina idraulica da 250 kN, si è scelto il diametro minimo della provetta, pa

ri a 19 mm, in modo che non risultasse troppo grande per le prestazioni della macchina né troppo piccolo rispetto a quelli degli assili ferroviani.

Anche il raggio di curvatura del profilo della "zona di lavoro", legato a sua volta al diametro dell'utensile, di solito una mola, col quale viene realizzato, ha condizionato, in una certa misura, la scelta del diametro minimo, in quanto le norme ASTM suggeriscono di adottare per detto raggio un valore almeno otto volte più grande di quello del diametro della sezione resistente minima.

In realtà s'è adottato un rapporto tra le due dimensioni più grande di otto per ridurre al minimo l'effetto d'intaglio nella sezione di rottura.

La lunghezza della zona di lavoro è stata presa di poco superiore a tre volte il diametro minimo, come prevedono le norme ASTM. Al diametro dei codoli per l'afferraggio è stato dato il valore più alto compatibile con le dimensioni delle ganasce della macchina di prova per evitare, con un piccolo rapporto tra questo diametro e quello minimo della provetta, rotture del pezzo in corrispondenza dell'afferraggio. Le zone di raccordo tra i codoli e il tratto centrale hanno una geometria semplice e priva di singolarità nocive all'integrità della provetta. In particolare, il tratto cilindrico è stato introdotto per semplificare le lavorazioni meccaniche e per una eventuale applicazione alla provetta di sonde per il controllo, durante le prove, della propagazione delle cricche di fatica con apparecchio ad ultrasuoni o con analizzatore di emissioni acustiche. Infine, per ridurre al minimo le possibilità di innesco delle cricche di fatica in corrispondenza di difetti superficiali, è stata programmata una particolare sequenza di lavorazioni terminante, per un gruppo consistente di provette (circa 1700 su un totale di 1930), con una lappatura della zona a clessidra tale da eliminare ogni traccia delle precedenti lavorazioni visibile al microscopio con venti ingrandimenti [1].

Quest'ultima fase, che riveste una notevole importanza nei riguardi dell'innesco delle cricche di fatica, è stata sviluppata presso le Officine Galileo di Firenze [1] superando non poche difficoltà connesse con la particolare geometria dei campioni e le severe norme da rispettare.

Le specifiche da rispettare erano le seguenti: - Rugosità della parte centrale della provetta inferiore a 0,4 Ra; - Si riteneva accettabile la provetta con rugosità come sopra anche se la quota del diametro centrale fosse risultata diversa da quella a disegno (diametro $19 \pm 0,01$ mm), purché questa discordanza fosse segnalata e ne fosse indicato il valore su certificato a parte, da allegare alla provetta stessa; - Il raggio di curvatura della parte centrale doveva essere compreso fra $R = 200 \pm 2$ mm;

- La rotondità della provetta, misurata nella sua parte centrale, non doveva discostarsi dal profilo ideale più di $4 \mu\text{m}$.

Le provette, in lotti di circa 250 pezzi hanno superato un primo collaudo di accettazione consistente in: - Esame a vista su tutti i pezzi; - Trascrizione dei dati di identificazione di ciascuna provetta; - Controllo dimensionale di 20 provette per lotto, verificandone il diametro centrale, la concentricità e la rettilineità del pezzo, nonché il raggio meridiano della zona di lavoro con due dime "passa-non-passa".

Quindi, le provette hanno subito una rettifica a tuffo con una mola di diametro medio $\varnothing = 400 \text{ mm}$, che lavorava a una velocità di 1200 giri/min mentre il pezzo ruotava con una velocità di 315 giri/min. Man mano che i pezzi venivano rettificati, si effettuava il controllo del diametro minimo, della rugosità, della circolarità e del raggio del profilo.

Per la lavorazione ottica del gruppo di provette lappate nel tratto centrale a superficie torica è stata approntata un'apposita attrezzatura [1] su cui possono essere lavorate contemporaneamente fino a cinque provette. Il ciclo di lavoro si è svolto in due tempi: dapprima è stata effettuata una smerigliatura e, successivamente, una lucidatura.

Durante queste fasi, le provette sono state "spennellate" in maniera che, prima lo smeriglio, poi la diamantina (per la lucidatura) non seccassero mai sulla superficie lavorata. L'operatore, inoltre, con uno stereomicroscopio a venti ingrandimenti e via via che le provette venivano lavate, effettuava un esame a vista delle stesse per seguire e controllare il buon andamento della lavorazione.

Una volta terminato il ciclo di lavorazione, le provette sono state rivestite di una pellicola plastica per protezione dagli agenti ossidanti.

Prove e risultati

Il programma di prove finora realizzato riguarda una parziale caratterizzazione a fatica del materiale a vari livelli di sollecitazione e per diverse finiture superficiali dei campioni.

La necessità di tenere la frequenza di prova a valori molto bassi, intorno a 1 Hz per evitare eccessivi riscaldamenti della provetta, rende i tempi di attuazione dell'intero programma piuttosto lunghi.

Dell'intero lotto di provette disponibili, suddiviso in tre classi di durezza individuate dagli intervalli: $277 \div 285 \text{ HB}$; $293 \div 302 \text{ HB}$; $302 \div 321 \text{ HB}$, sono state utilizzate n.60 provette, venti di ciascuna classe, lavorate senza lappatura finale, n.20 della I classe lappate e n.4 della seconda classe, di cui due lappate, rifinite manualmente con tela smeriglio per eliminare le tracce di lavorazione circonferenziali e/o introdurre quelle assiali della smerigliatura.

Le prime sessanta provette sono state provate, cinque di ogni classe a ciascuno dei seguenti livelli di carico: 610 MPa; 575 MPa; 540 MPa; 505 MPa collocati tra il limite di resistenza a fatica e il campo della fatica oligociclica, per avere le curve S-N di fig.2. Lo stesso s'è fatto con le venti provette lappate, ma ottenendo una sola curva S-N (fig. 3), trattandosi di campioni appartenenti solo alla prima classe di durezza.

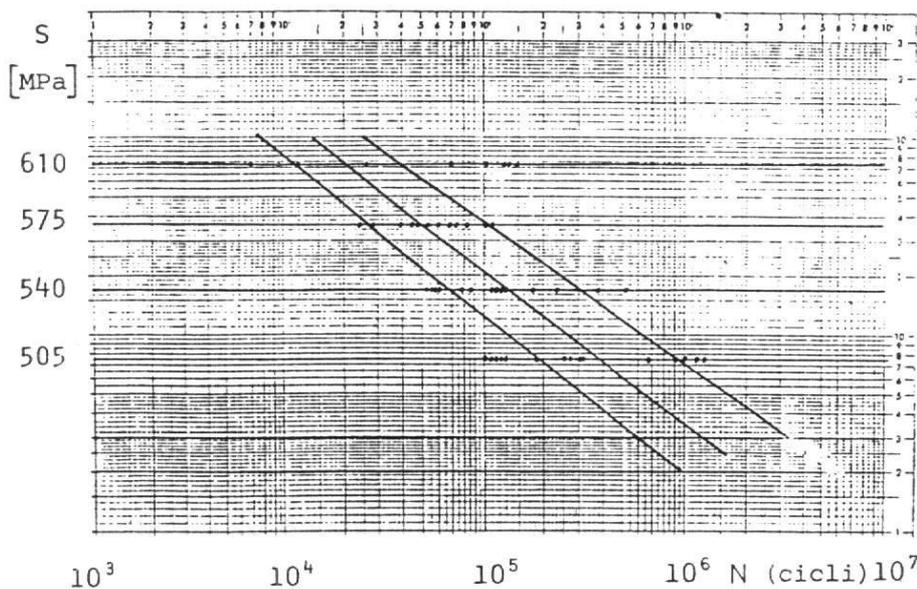


Fig.2 - Curve di Wöhler ottenute con n.60 campioni rettificati, venti di ciascuna classe di durezza.

Con le quattro provette smerigliate, sollecitate al più grande degli anzidetti livelli di carico, si sono avuti i risultati raccolti nella tab.1.

Alla fine dell'attuale programma di prove, sarà possibile definire il quadro completo dei diagrammi P-S-N per l'acciaio considerato e per i tre tipi di finitura superficiale prescelti, ossia: finitura al tornio, lappatura e smerigliatura in direzione assiale del tratto centrale a superficie torica dei campioni.

Quest'ultima finitura è stata scelta per verificare se l'eliminazione delle tracce di lavorazione circonferenziali, perpendicolari alla direzione del carico, e l'introduzione di quelle assiali rende il comportamento a fatica del materiale simile a quello riscontrabile con le provette lappate. Se questo dovesse essere il risultato, si comprende quanto sarebbe utile, pratico ed economicamente vantaggioso ricorrere,

per aumentare la durata a fatica di un componente meccanico, a una semplice finitura superficiale che lasci i segni di lavorazione orientati esclusivamente secondo la direzione di applicazione del carico, anziché alla lappatura.

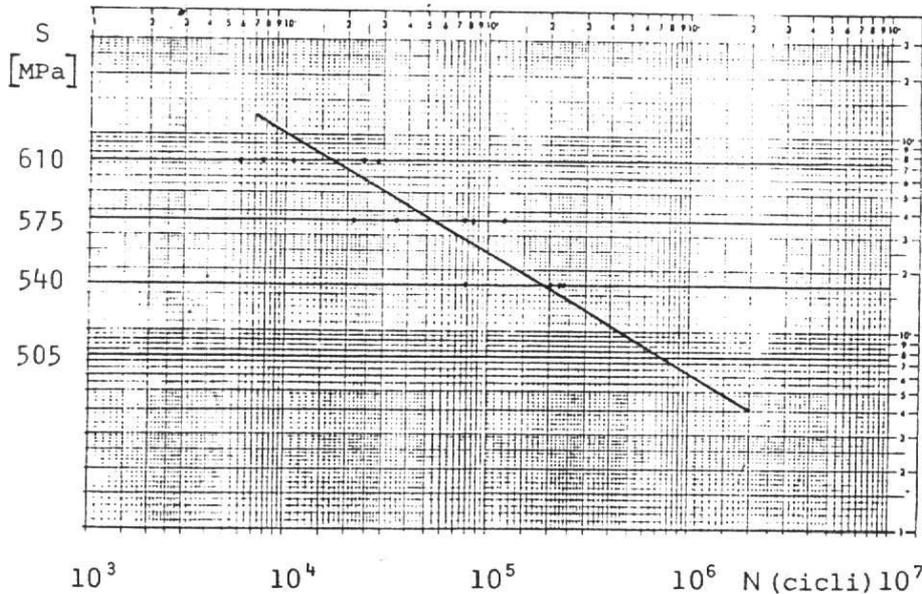


Fig.3 - Curva di Wöhler ottenuta con venti campioni lappati appartenenti alla prima classe di durezza.

Tab.1 - Risultati delle prove effettuate con le provette smerigliate nella direzione di applicazione del carico.

Provetta	Durezza HB	Carico MPa	Frequenza Hz	Cicli a rottura	Finitura preesistente
1A5A-2	293	±610	1	30190	Rettifica
1D5G-2	293	±505	1	254330	Rettifica
1D2F-2	293	±610	1	39520	Lappatura
1C1F-2	293	±505	1	148460	Lappatura

Se così non fosse, sarebbe da concludere che per il fenomeno di fatica il fattore geometrico più importante è la qualità della finitura superficiale, a prescindere dall'orientazione delle tracce di lavorazione.

I risultati finora ottenuti con le provette non smerigliate consentono di affermare che la lappatura è inefficace per livelli di cari

co molto elevati, superiori ai 2/3 del carico di rottura, mentre a livelli bassi comporta un considerevole incremento di durata: a metà del carico di rottura raggiunge il 200%.

I risultati delle prove effettuate con i campioni smerigliati sembrano avvalorare la seconda delle precedenti ipotesi, ma la loro esiguità numerica non ci autorizza a trarre da essi quelle conclusioni di carattere generale che si potranno formulare solo alla fine di tutte le prove in corso di svolgimento.

Conclusioni

Per lo studio del comportamento a fatica, sotto carichi comunque variabili, dell'acciaio 30NiCrMoV12 impiegato, tra l'altro, per la costruzione degli assili ferroviari, è stato messo a punto un vasto programma di prove che ha richiesto la progettazione di campioni di una particolare geometria e la fabbricazione degli stessi con processi, lavorazioni e controlli di inconsueta elevata affidabilità.

Di tale programma, è stata realizzata la fase di preparazione di tutte le provette e, in parte, quella relativa alla caratterizzazione a fatica del materiale in funzione del grado di finitura superficiale dei campioni.

Dai primi risultati ottenuti è possibile dedurre che il grado di finitura superficiale gioca un ruolo tanto più importante quanto più basso è il livello di carico. In particolare, una lappatura che non lasci tracce di lavorazione visibili con venti ingrandimenti comporta, a un livello di carico pari al 50% del carico di rottura, un incremento di durata del 200% rispetto a quella ottenibile con una rettifica a tuffo e rugosità $\leq 0,4Ra$; mentre risulta pressoché ininfluyente quando il carico massimo raggiunge i 2/3 del carico di rottura.

Una smerigliatura effettuata nella direzione del carico per cancellare le tracce di lavorazione perpendicolari al carico stesso sembra non alteri la risposta del materiale, il che avvalorerebbe l'ipotesi che il fenomeno di fatica sia sensibile alla qualità della finitura superficiale e non all'orientazione delle tracce di lavorazione. Ma le prove effettuate con le provette smerigliate sono ancora troppo poche per fornire quelle indicazioni di validità generale cui tende l'indagine completa.

Bibliografia

1. De Iorio, A. e Florio, G., "Sulla scelta e preparazione di campioni per particolari prove di fatica", XII Conv.Naz. AIAS, Sorrento, 1984.
2. De Iorio, A. and Florio, G., "Evaluation of Cumulative Fatigue Damage", 2nd Meeting on Fatigue in Aerospace Structures, Naples, 1980.