

Comportamento a fatica di lamierini di acciaio inossidabile austenitico per applicazioni in carrozze ferroviarie

S. Budano - Centro Sviluppo Materiali - Roma
S. Campanari - Istituto Sperimentale F.S. - Roma
G. Florio - Istituto Sperimentale F.S. - Roma

La progettazione di componenti di veicoli ferroviari viene eseguita utilizzando programmi di calcolo strutturale che richiedono come dato di input la conoscenza della resistenza a fatica dei materiali e delle giunzioni saldate per punti. Dato l'utilizzo sempre crescente di lamierini di acciaio inossidabile è stata definita ed applicata la metodologia per la qualificazione a fatica di giunzioni a sovrapposizione di lamierini saldati per punti di acciaio inossidabile austenitico tipo AISI 301 LN e AISI 304. Il presente lavoro è stato eseguito in collaborazione tra il Centro Sviluppo Materiali S.p.A ed Istituto Sperimentale F.S. S.p.A.

INTRODUZIONE

Il campo di applicazione dei lamierini di acciaio inossidabile si sta espandendo verso applicazioni che tradizionalmente sono legate ai lamierini di acciaio al carbonio. Nuove tecnologie di produzione sia dei materiali che dei componenti e la riduzione significativa dei costi delle materie prime, in aggiunta ai noti vantaggi inerenti la resistenza alla corrosione e conseguente economicità e risparmio nella verniciatura e manutenzione, hanno acceso nuovi interessi e dato un impulso industriale all'impiego dei lamierini di acciaio inossidabile.

Attualmente i maggiori costi iniziali dei lamierini inossidabili, rispetto agli analoghi in acciaio al carbonio, vengono minimizzati se comparati con i costi a vita intera dei manufatti, costi di verniciatura e manutenzione, in particolare per quanto riguarda applicazioni in carrozze ferroviarie. In questo caso l'impiego dell'acciaio inossidabile risulta interessante sia per la realizzazione di carrozze ferroviarie per utilizzo tradizionale sia per quelle destinate all'alta velocità, dove l'aerodinamicità ed il peso giocano un ruolo molto importante. L'impiego dei lamierini di acciaio inossidabile, inoltre costituisce una scelta vincente se confrontato con le leghe leggere per il vantaggio di avere una migliore lavorabilità e per la possibilità di utilizzare le giunzioni saldate per punti e quindi sistemi robotizzati di assemblaggio.

Per questi nuovi campi di applicazione, tuttavia, la letteratura non fornisce le informazioni necessarie riguardo le caratteristiche di resistenza meccanica e, specialmente, di comportamento a fatica. A tal fine è stata eseguita un'estesa campagna sperimentale utilizzando oltre 500 provini di fatica ottenuti da lamierini di acciaio inossidabile austenitico del tipo AISI 301LN e AISI 304, con spessori compresi tra 1.5 e 2.5 mm. Attualmente questi prodotti sono utilizzati per la realizzazione di pannelli e di parti strutturali di carrozze ferroviarie (es. Eurotunnel). La qualificazione eseguita è stata soprattutto focalizzata al comportamento a fatica di giunzioni di lamierini sovrapposti saldati per punti, che rappresentano forti concentratori di sforzi con conseguente possibilità di originarsi di inneschi di cricche di fatica.

Il presente lavoro illustra la metodologia utilizzata per verificare la saldabilità dei lamierini e valutarne il comportamento a fatica, attività orientate alla progettazione di componenti strutturali di carrozze ferroviarie. Lo studio e l'applicazione della metodologia suggerita, in campi diversi da quello automobilistico, si sono rese necessarie per i risultati poco

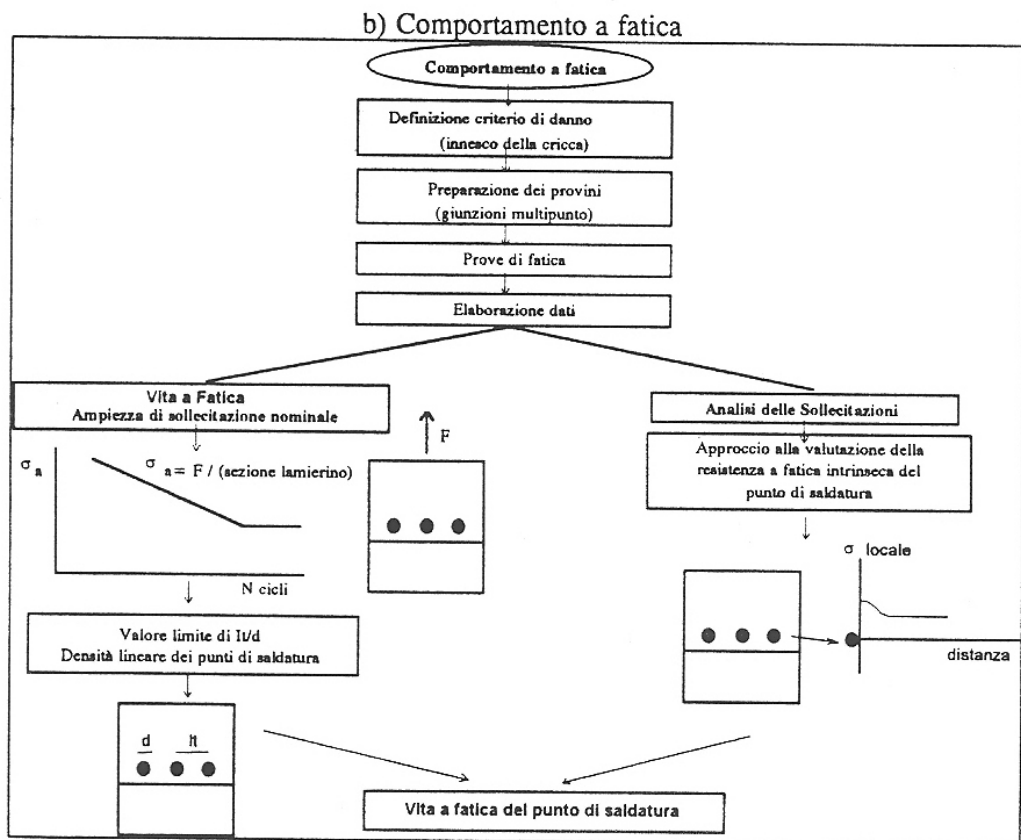
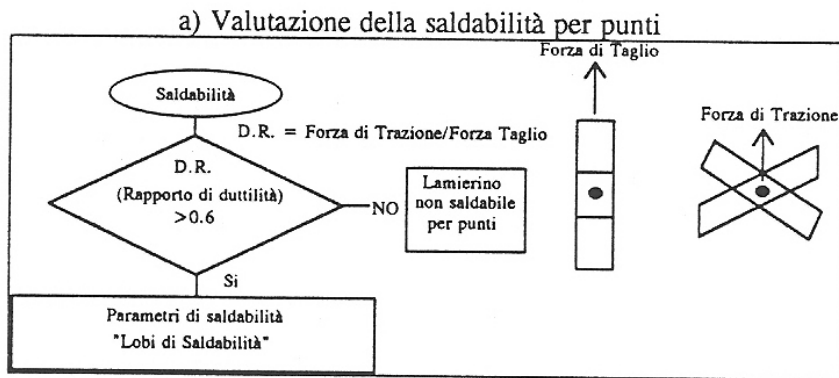
soddisfacenti, conseguenti alla presenza di scollamenti di punti di saldatura, di giunzioni di lamierini di acciai inossidabile del tipo AISI 301/304, progettati a fatica utilizzando approcci tradizionali.

STRATEGIA SPERIMENTALE

La strategia sperimentale adottata per i lamierini di acciaio inossidabile AISI 301 LN e AISI 304 è stata basata su due linee di flusso :

- a) Valutazione della saldabilità per punti e definizione dei parametri di processo.
- b) Comportamento a fatica di giunzioni saldate per punti con caratteristiche geometriche diverse, quali spessore e densità lineare dei punti di saldatura.

I flussi operativi sono così schematizzabili :



SPERIMENTAZIONE

Rapporto di Duttilità (Ductility Ratio)

Sono state preparate delle giunzioni monopunto a croce e sovrapposte utilizzando diversi valori di corrente di saldatura. Il diametro degli elettrodi è stato ricavato dalla relazione :

$$d = 5\sqrt{\text{Spessore}}$$

Le giunzioni sono state separate misurando, per ciascun provino, la forza a rottura : "Forza di Taglio" per le giunzioni sovrapposte e "Forza di Trazione" per le giunzioni a croce.

Quindi è stato calcolato il parametro D.R. (Rapporto di Duttilità) come :

$$D.R. = \frac{F_{Trazione}}{F_{Taglio}}$$

In fig. 1 è riportato, a titolo esemplificativo, l'andamento del parametro D.R. vs Corrente applicata (I [kA]) relativamente all'AISI 301 LN spessore 1.5 mm. Si nota che, per bassi valori di corrente applicata il valore di Forza di Trazione Load risulta molto inferiore al valore della Forza di Taglio dovuto alla scarsa resistenza a trazione del punto stesso, indice di uno scollamento. Per elevati valori di corrente applicata, la resistenza meccanica della giunzione risulta migliorata.

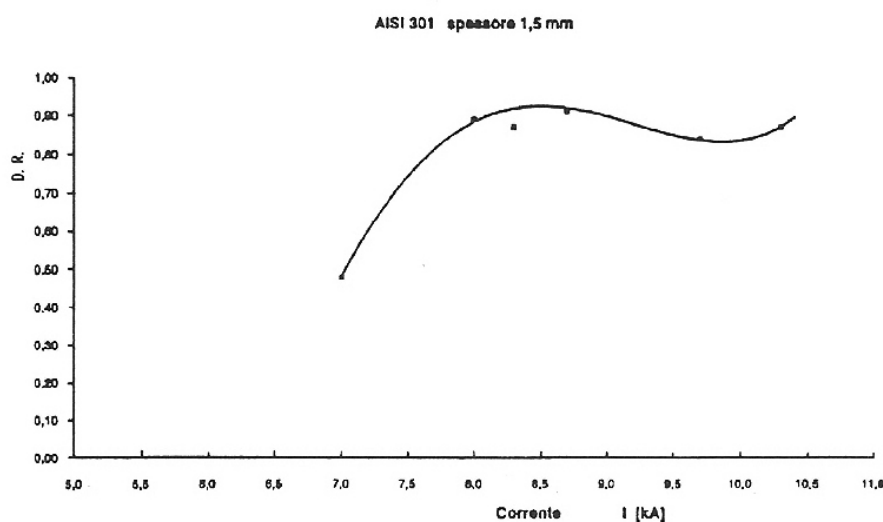


Fig. 1 - Andamento del Rapporto di Duttilità (D.R.) vs Corrente Applicata I/.

In campo automobilistico le procedure indicano con $D.R. = 0.6$ il limite inferiore di accettazione del lamierino in esame per essere saldato per punti. Relativamente ai laminati di acciaio inossidabile e nell'intervallo degli spessori considerati, il valore di D.R. è risultato sempre accettabile per valori di corrente superiore ai 10 kA.

Lobi di Saldabilità (Weldability Lobe)

I valori ottimali dei parametri di saldatura per punti sono ricavati utilizzando una serie di giunzioni eseguite con diversi valori di corrente applicata, di forza tra gli elettrodi, di tempo di saldatura e di mantenimento dopo il passaggio di corrente (Hold Time). Successivamente le giunzioni vengono separate per determinare la morfologia del punto, che viene

classificata come: "Eccessiva Fusione (Splash)", "Saldato (Welded)" e "Incollato (Pasted)".

Il tipo "Eccessiva Fusione" è caratterizzato da fusione eccessiva di materiale tra gli elettrodi a causa della notevole corrente applicata.

Il tipo "Saldato" è caratterizzato da ottima giunzione ed un nocciolo di saldatura con diametro di dimensioni simile a quello dell'elettrodo.

Il tipo "Incollato" è caratterizzato da una scarsa assenza di fusione di acciaio con diametro del nocciolo trascurabile.

Dalla fig. 2, esemplificativa delle giunzioni di lamierini di AISI 301 LN spessore 1.5 mm, è possibile ricavare i parametri di saldatura per punti, nei termini indicati.

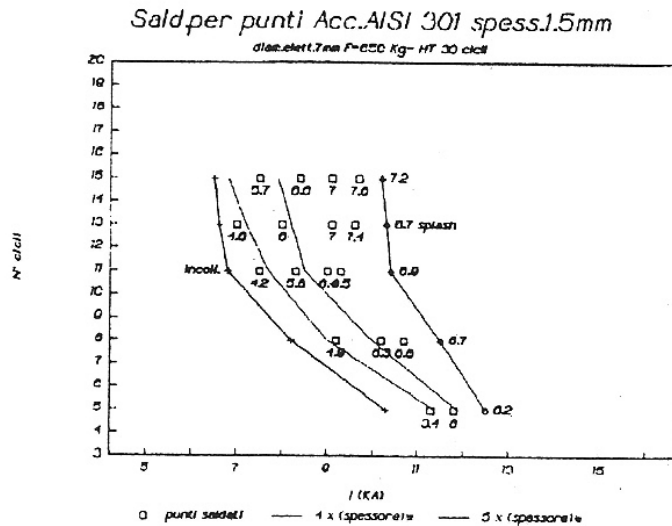


Fig. 2. Lobo di saldabilità
(Tempo di Saldatura [N. cicli di corrente] Vs Intensità di Corrente) /1/.

Comportamento a Fatica

Le prove di fatica sono state eseguite utilizzando giunzioni sovrapposte di lamierini di larghezza $W = 150$ mm lunghezza $L = 400$ mm.

In particolare sono state realizzate giunzioni con 15 mm di zona sovrapposta con 3, 4, 5 e 6 punti di saldatura, in modo da ottenere variazioni del parametro It/d nell'intervallo 2.4 - 7.14, ove It = interdistanza tra punti e d = diametro dei punti.

Quale criterio di danno si è scelto quello in cui si è ritenuta terminata la prova in presenza di una cricca dell'ordine di 10mm, rilevabile mediante la variazione di corsa dell'attuatore della macchina di prova. La sperimentazione è stata condotta utilizzando macchine servoidrauliche Schenck e MTS, applicando cicli di carico sinusoidali di frequenza 10 Hz, con rapporto $R = P_{min}/P_{max} = 0.1$. Il limite di fatica imposto è stato $N_f = 2 \cdot 10^6$ cicli.

Analisi delle Sollecitazioni

Riguardo la valutazione dell'entità della sollecitazione locale intorno ai punti di saldatura, è stato eseguito un approccio sperimentale, utilizzando degli estensimetri, per la misura delle tensioni agenti intorno ai punti durante la prova di trazione. In particolare le rosette estensimetriche sono state posizionate sulla superficie esterna della giunzione, a una distanza

di circa 0.5 mm dalla tangente alla frontiera della zona di saldatura. Le misure eseguite hanno dato utili indicazioni qualitative riguardo il livello di intensificazione prodotto dalla presenza del punto di saldatura, ma non hanno fornito risultati quantitativi poiché le rilevazioni non sono state effettuate al centro ed internamente alla giunzione. In particolare è stato evidenziato che il punto di saldatura agisce quale concentratore di sollecitazioni, con valore minimo pari a 2,5 volte la sollecitazione nominale applicata alla giunzione (bassi carichi nominali applicati pari all'ampiezza di sollecitazione al limite di fatica) fino a 25 volte in prossimità della rottura statica della giunzione, come evidenziato nella fig.3.

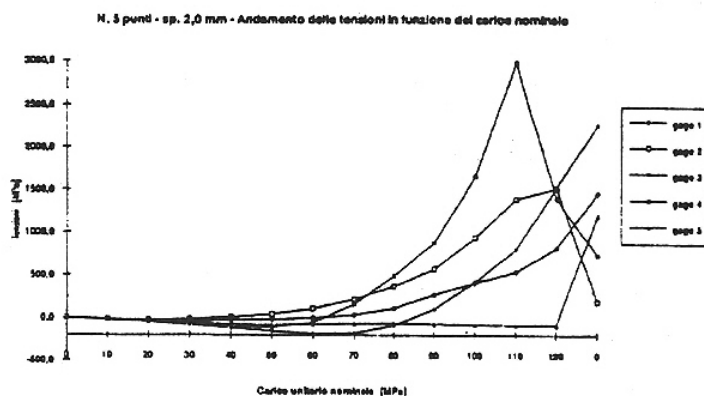


Fig. 3. Andamento delle tensioni locali agenti intorno ai singoli punti di saldatura di una giunzione costituita da 5 punti /1/.

Criteri di Elaborazione dei Dati Sperimentali di Fatica

Le curve sollecitazione-vita a fatica, sono state elaborate facendo riferimento all'ampiezza di sollecitazione nominale applicata e a quella locale intorno al punto di saldatura. Nel primo caso l'ampiezza di sollecitazione risulta dalla relazione :

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{F_{max}(1-R)}{2 t W} \quad [1] \quad \text{dove :}$$

t = spessore dei lamierini (1.5-2.5 mm) ; W = larghezza del la giunzione (150 mm)

Fmax = forza massima applicata nel ciclo di fatica.

In fig. 4 è riportato, a titolo esemplificativo, l'andamento della vita a fatica delle giunzioni in 3 punti di saldatura di lamierini di AISI 301 LN di spessore 1.5 mm.

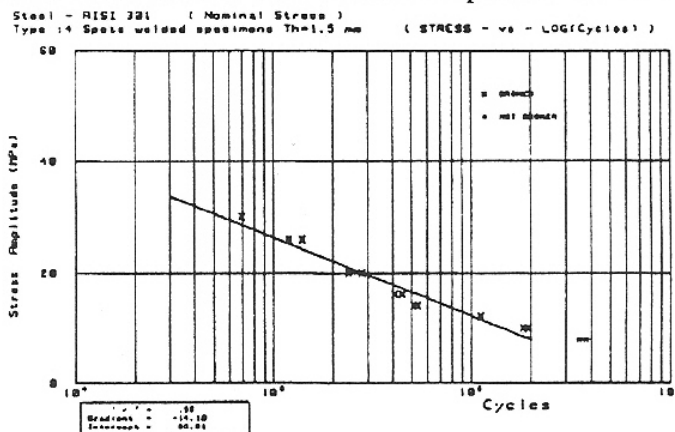


Fig. 4. Curva σ_a vs Vita a Fatica relativa a giunzioni di lamierini di AISI 301 LN sp. 1.5 mm eseguite con 4 punti. /1/

Nel secondo caso l'ampiezza di sollecitazione è stata calcolata facendo riferimento alla sezione resistente del punto, senza tuttavia tenere conto del campo dell'intensificazione ivi

presente. La relazione utilizzata è stata : $\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{F_{max}(1-R)}{2 t n d}$ [2] dove :

n = Numero dei punti di saldatura della giunzione

d = Diametro del punto

RISULTATI e DISCUSSIONE

La resistenza a fatica delle giunzioni saldate per punti viene effettuata, per la pannelleria auto, determinando, dapprima, la densità lineare dei punti di saldatura lungo la giunzione.

Questa risulta avere un valore limite /2,3/ al di sopra del quale non si ha miglioramento della vita a fatica della giunzione. In tal modo, un sovrannumero di punti aggraverebbe soltanto i tempi di produzione. La densità lineare dei punti viene espressa come rapporto It/d tra la loro spaziatura (It) ed il diametro (d).

In fig 5 è riportato l'andamento dell'ampiezza di sollecitazione S_{f1} estrapolata a $N = 10^6$ cicli, in funzione di It/d , che, come evidenziato, per valori superiori a circa 3.5, risulta avere un significativo decadimento.

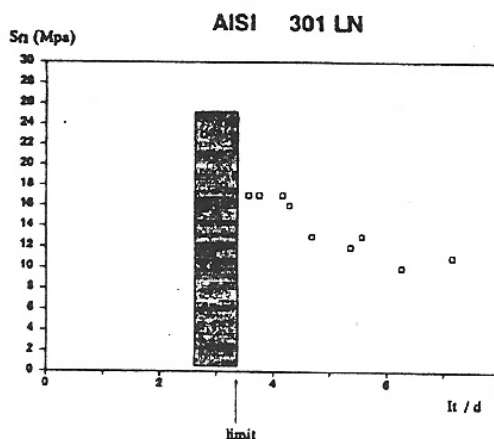


Fig. 5. Andamento di S_{f1} vs It/d . In evidenza il valore massimo di densità lineare di punti di saldatura /1/

Relativamente alla determinazione della vita a fatica delle giunzioni saldate per punti, la valutazione dell'ampiezza della sollecitazione a fatica σ_a nominale, calcolata secondo la relazione [1], risulta fortemente dipendente dal numero dei punti di saldatura presenti nella giunzione e quindi poco utilizzabile per la progettazione di parti con geometria che si allontana dalla configurazione esaminata (pannelleria). Un possibile approccio, per ottenere valori di σ_a indipendenti dalle caratteristiche geometriche della giunzione, è stato eseguito valutando σ_a secondo la relazione [2], che fa riferimento alla sezione nominale dei punti presenti nella giunzione stessa. I risultati ottenuti presentano valori raggruppati e, presumibilmente, rappresentativi della vita a fatica del punto di saldatura, indipendentemente dal numero dei punti presenti nella giunzione stessa. Nelle Figg. 6 e 7 sono riportati i dati ottenuti dall'elaborazione di tutte le prove sperimentali eseguite, circa 300. I valori dei coefficienti di correlazione R, ($R=1$ e $R=.78$), evidenziano la validità della correlazione eseguita.

Si nota, inoltre, che la resistenza a fatica delle giunzioni è pressochè uguale nel campo della vita breve ($N < 10^5$ cicli), mentre una lieve differenza, a favore dei lamierini di AISI 304, è rilevabile nel campo della lunga durata.

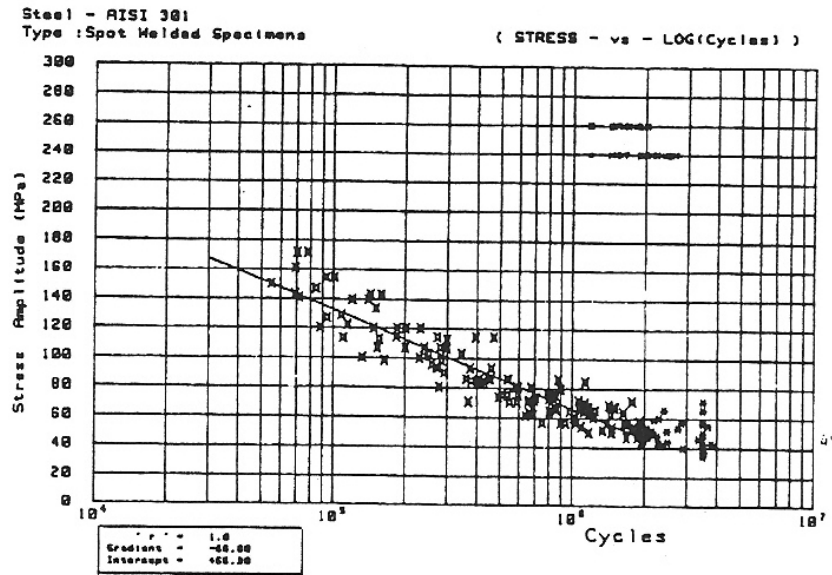


Fig. 6. Vita a fatica dei punti di saldatura di giunzioni di lamierini di AISI 301 LN/1/.

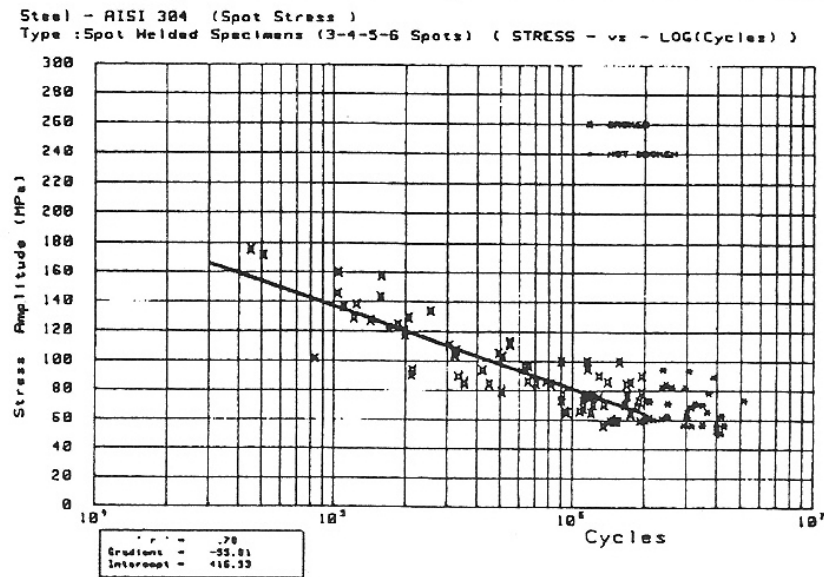


Fig. 7. Vita a fatica dei punti di saldatura di giunzioni di lamierini di AISI 304 /1/.

Le attività sperimentali, relative alla vita a fatica delle giunzioni saldate per punti di lamierini di acciaio al carbonio per impiego automobilistico /2,3/, hanno portato alla definizione di una banda di dispersione unificata costruita normalizzando l'ampiezza di sollecitazione σ_a con quella valutata al limite di fatica N_f (σ_a/σ_f) vs Vita a fatica N , utilizzata dai progettisti auto. Al fine di verificare l'utilizzo di tale approccio, anche nel campo delle giunzioni sovrapposte saldate per punti di lamierini di acciaio inossidabile, sono stati riportati i punti ottenuti su detta banda. Nei casi esaminati la banda di dispersione unificata risulta significativamente rappresentativa e con un buon margine conservativo della vita a fatica delle giunzioni di lamierini di acciaio inossidabile esaminato, fig. 8.

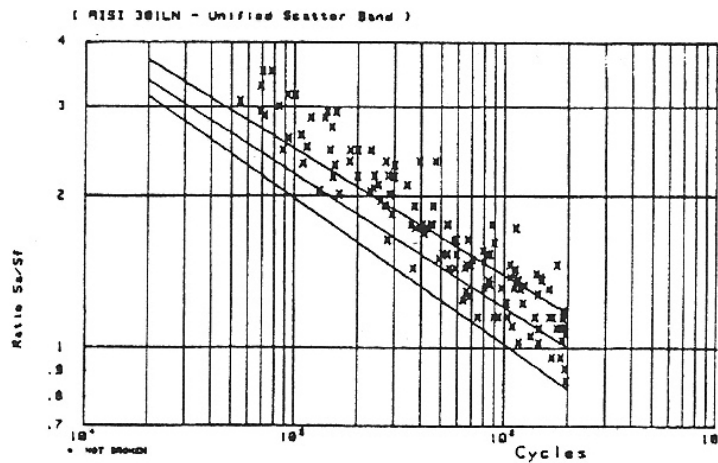


Fig. 8 Dati di vita a fatica dei punti di saldatura relativi all'AISI 301 LN con sovrapposta la Banda di Dispersione Unificata ottenuta per i lamierini di acciaio al carbonio /1/.

CONCLUSIONI

L'attività condotta ha permesso di verificare la validità dell'approccio basato sulla verifica della saldabilità dei lamierini, sulla individuazione dei relativi parametri di saldatura e sulla determinazione del valore limite della densità lineare dei punti di saldatura (l/d) per la valutazione della vita a fatica delle giunzioni saldate per punti.

Le prove di fatica hanno inoltre evidenziato che la resistenza a fatica intrinseca del punto di saldatura risulta indipendente dal numero di punti presenti. Nella giunzione tuttavia, l'elevato ed irregolare andamento delle sollecitazioni presenti intorno al punto non permette una immediata valutazione quantitativa dell'ampiezza di sollecitazione σ_a che porta alla rottura per fatica il punto saldato. È stata, inoltre, verificata la possibilità di applicare la banda di dispersione unificata, determinata per le giunzioni saldate per punti di lamierini di acciaio al carbonio, anche per quelle di lamierini di acciaio inossidabile AISI 301 LN e AISI 304, ottenendo valori di vita a fatica conservativi.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato svolto con il contributo della CECA ed il finanziamento dell'ILVA Divisione Acciai Inossidabili Terni.

BIBLIOGRAFIA

- 1) S. BUDANO Ottimizzazione del comportamento a fatica di lamierini di acciaio inossidabile saldati per punti per carrozza ferroviarie. Conv. CECA Conv. 7210-KC/409, dicembre 92.
- 2) B. ATZORI Bounding criteria and fatigue behaviour of steel sheets and welded structures- ATA EVENTS 1988 - Torino 1988 pp. 29-48.
- 3) R. ARISTOTILE Comportamento a fatica di particolari per autoveicoli in laminati saldati per punti. Conv. CECA 7210-KA/406, giugno 1984