

# CONFRONTO TRA DUE MODELLI PER LA PREVISIONE DELLA ROTTURA PER FATICA DI SALDATURE A PUNTI

E. Calabrò<sup>1</sup>, P.Casalini<sup>2</sup>, F.Cosci<sup>1</sup>, E. Manfredi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione,  
Università degli Studi di Pisa, Via Diotisalvi, 2, 56126 Pisa*

<sup>2</sup>*Piaggio V.E. S.p.A., Viale R. Piaggio, 56025 Pontedera (PI)  
casalini@piaggio.com, manfredi@ing.unipi.it*

## Sommario

La progettazione di strutture saldate a punti per veicoli impone alcune semplificazioni nella descrizione dello stato di sollecitazione delle unioni, di cui deve essere verificata, ciò nonostante, la resistenza a fatica. In questo lavoro sono confrontati i risultati sperimentali ottenuti su campioni in acciaio con uno o più punti, con le previsioni di due noti approcci recentemente riportati sulla letteratura.

## Abstract

*The use of spot welds is widespread in the automotive Industry. The design of such structures imposes some shortcuts in the stress analysis of the single spot weldments, which is a preliminary step in the assessment of their fatigue strength. In this paper a comparison between the fatigue life predictions of two recently published approaches and experimental results on steel specimens with one or more spot welds is presented.*

## 1. Introduzione

Nella realizzazione di carrozzerie e di parti strutturali per autoveicoli e motoveicoli si fa tuttora un largo impiego della saldatura elettrica a resistenza, ovvero di saldature “a punti”. La sollecitazione a fatica di collegamenti saldati in questo modo può produrre cedimenti per effetto della forte concentrazione della sollecitazione locale. Inoltre, la difettosità di queste giunzioni, dovuta a vari fattori tecnologici, può provocare effetti nocivi per quanto riguarda la resistenza.

Nella pratica della progettazione di queste strutture saldate si incontrano due problemi: il primo è quello della definizione del parametro o dei parametri più adatti a stimare la resistenza a fatica delle giunzioni, sulla base di dati sperimentali ottenuti tramite prove su provini o su simulacri di strutture; il secondo è quello dell'analisi delle sollecitazioni locali, da ottenere con il metodo FEM per mezzo di schematizzazioni significative ma non troppo spinte, in quanto queste devono essere compatibili con i correnti strumenti e tempi di analisi.

La rottura per fatica di una struttura saldata con numerosi punti è un fenomeno complesso. Di regola, in prossimità del bordo di un punto si forma una fessura perché il punto è più sollecitato (il cosiddetto *pivot*) oppure perché è difettoso. Ciò causa una perdita locale di rigidità e quindi una redistribuzione dei carichi. Di conseguenza, punti che in precedenza erano meno sollecitati diventano, a loro volta, *pivots*. La vita a fatica di strutture con più punti di saldatura è quindi caratterizzata dal fenomeno della redistribuzione dei carichi e dal formarsi e progredire di fessure nell'attorno di singoli punti, che causano una progressiva riduzione della rigidità globale della struttura ed, infine, il cedimento totale.

Per la previsione della vita a fatica di strutture multi punto è perciò concettualmente possibile seguire uno dei seguenti approcci.

- Determinare il punto più sollecitato e considerare rotta la struttura quando in corrispondenza di questo punto si manifesta una fessura superiore ad una certa lunghezza; questo criterio è, ovviamente, molto conservativo, in particolare quando in una struttura un punto è molto più sollecitato degli altri.
- Considerare rotta la struttura quando si siano rotti alcuni punti (al limite: tutti i punti), oppure si siano formate fessure superiori ad un limite ammissibile; ciò richiede di modellare, con adatti criteri, sia la riduzione di rigidità che si produce in corrispondenza dei punti via via che questi si fessurano, sia la propagazione delle fessure stesse.
- Considerare rotta la struttura quando si abbia, per effetto cumulativo di singole rotture, una perdita di rigidità globale superiore ad un determinato valore.

Per lo più questo tipo di strutture, e, di conseguenza, le lamiere costituenti le zone di giunzione, sono modellate utilizzando Elementi Finiti del tipo *shell* a 4 nodi. Per la schematizzazione del singolo punto di saldatura è possibile scegliere tra varie soluzioni diverse, tra cui:

- un elemento trasformatore di carico tra le lamiere di tipo *beam*, con asse coincidente con l'asse di simmetria del punto vero e proprio, o *nugget*; quest'ultimo viene fatto coincidere con il nodo comune di quattro elementi *shell* adiacenti; questa soluzione è molto utilizzata nella pratica, per la sua semplicità, ma fornisce una stima errata per difetto della rigidità iniziale della giunzione, qualunque sia la rigidità dell'elemento *beam*;
- un elemento *beam* collegato ad elementi *shell* opportunamente irrigiditi, per correggere l'errore di cui sopra, tramite una fittizia variazione del loro spessore, in prossimità del punto di saldatura;
- un "Super-Elemento Finito - punto" ottenuto con numerosi EF *beam*, *shell* oppure *solid*; è così possibile modellare in modo ottimale la rigidità locale ed, in alcuni casi, tenere conto di situazioni quali la distanza relativa, o *gap*, tra le lamiere; tramite la valutazione preventiva della matrice di rigidità della sottostruttura costituita da questo Super Elemento, è possibile assemblare il modello globale senza un eccessivo consumo di risorse e di tempi di calcolo.

E' infine possibile modificare la rigidità locale di una giunzione fessurata, introducendo, ad esempio, un'opportuna variazione del modulo di rigidità degli EF che costituiscono il "Super Elemento - punto", tramite una procedura iterativa che tenga conto del danno accumulato nel punto.

Affinchè questi approcci possano essere usati per la progettazione di strutture saldate a punti quali un telaio od una carrozzeria, devono essere soddisfatte alcune esigenze. In questi casi, infatti, l'analisi con il metodo FEM richiede schematizzazioni semplificate, che conducano a risultati accettabili senza un eccessivo consumo di risorse. Ciò costituisce un ostacolo alla modellazione dettagliata di ogni punto di saldatura.

Riveste perciò un certo interesse un confronto tra quei metodi di previsione della rottura per fatica che, per la loro semplicità, appaiono compatibili con gli schemi utilizzati in pratica per l'analisi della sollecitazione di strutture saldate a punti.

## 2. I modelli di previsione considerati

Il modello inizialmente proposto da Sheppard e Strange [1], [2], [3], per la previsione di una limitata fessurazione iniziale delle lamiere, tende a ricondurre le condizioni di sollecitazione di un singolo punto, stabilite tramite analisi agli EF relativamente semplici, alla sollecitazione massima locale, considerando la zona posta al margine della zona fusa come una zona di fondo intaglio, della quale sia noto il coefficiente teorico di concentrazione delle tensioni elastiche  $K_t$ .

Originariamente questo modello considerava solo sollecitazioni membranali e flessionali agenti sulle lamiere in corrispondenza della zona posta ai margini della zona fusa del punto. In seguito è stato introdotto un perfezionamento per i casi in cui esiste anche una componente del carico diretta lungo l'asse del punto.

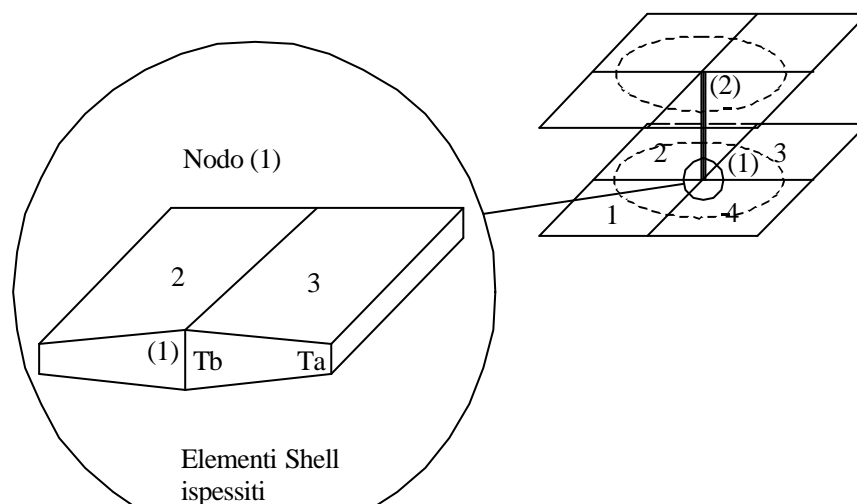
In figura 2 è illustrata la schematizzazione adottata da Sheppard *et al.* per modellare un singolo punto. Si noti che per meglio modellare la rigidità locale è previsto un artificiale ispessimento degli EF *shell*. Le sollecitazioni utilizzate per la previsione della rottura a fatica sono determinate tramite il calcolo agli EF delle azioni che interessano gli elementi *shell*, da cui sono dedotte le tensioni nominali, da maggiorare tramite un adatto coefficiente di effetto d'intaglio  $K_f$ .

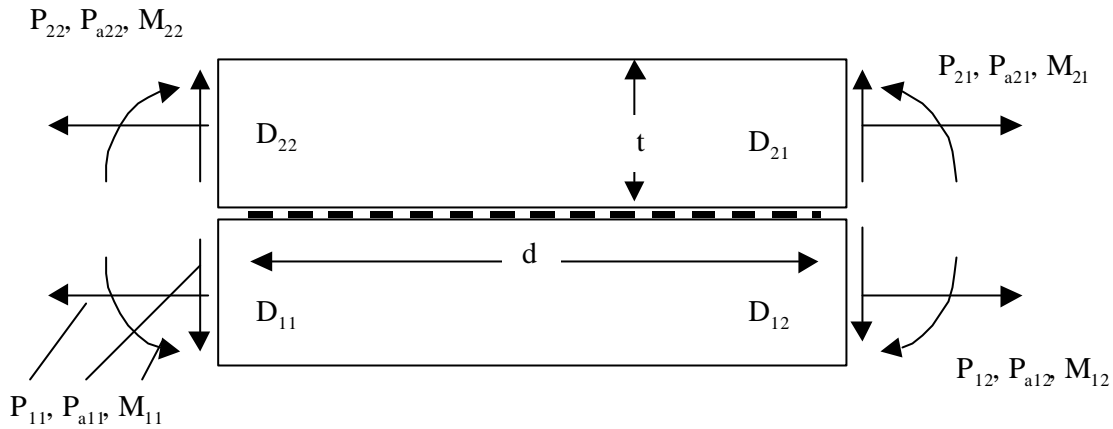
La previsione della prima fase della rottura si basa sull'ipotesi di una fessurazione iniziale molto piccola, pari al 20% dello spessore. Per il calcolo del coefficiente di effetto d'intaglio  $K_f$  nella zona in cui le lamiere sono unite dal *nugget* con un piccolo raggio di raccordo, viene assunto un coefficiente teorico di concentrazione elastica della tensione  $K_t$  pari a 2,5. Si presume, inoltre, la locale plasticizzazione di questa zona di fondo intaglio, che è analizzata secondo il classico approccio di Neuber allo scopo di determinare la tensione alternata e quella media.

Il punto più critico della procedura consiste perciò nella stima delle proprietà meccaniche della ristrettissima zona termicamente alterata (ZTA) adiacente al *nugget*, che viene assunta, come visto prima, come zona di fondo intaglio. Infatti occorre stabilire sia la risposta tensione-deformazione elasto-plastica ciclica e monotona, sia la resistenza a fatica propria del materiale, peraltro non omogeneo, della ZTA.

Sheppard *et al.* riferiscono [4] circa non facili prove, finalizzate ad ottenere questi dati tramite alcune misure sperimentali; alcune proprietà, anche in tale caso, devono essere dedotte indirettamente.

L'effetto delle tensioni residue viene valutato sommando alla componente media dello stato di tensione la tensione di snervamento del materiale.





**Figura 1**  
 Schematizzazione del punto di saldatura, secondo Sheppard *et al.*, con otto EF shell ed un elemento beam e descrizione della sollecitazione del punto tramite i risultati del calcolo agli Elementi Finiti.

Il modello di Rupp *et al.* per la previsione della vita a fatica di strutture saldate a punti [5], risulta, rispetto al modello di Sheppard *et al.* e di altri descritti dalla letteratura, di più semplice applicazione.

Anche questo modello richiede un preliminare calcolo agli EF della struttura, schematizzando le lamiere attorno al punto di saldatura con otto EF shell, senza tuttavia modificarne lo spessore, e ponendo in corrispondenza del punto stesso un EF beam. A differenza del modello di Sheppard *et al.* la sollecitazione del punto è ricondotta ad opportune tensioni nominali, calcolate in base alle forze e dei momenti determinabili con un calcolo FEM relativamente semplice.

Secondo Rupp *et al.* è definibile, sulla base del diametro del punto e dello spessore della lamiera, un confine tra la zona in cui si manifestano fessurazioni nella lamiera e quella in cui si manifesta la fessurazione del nugget. A seconda dei casi si utilizzano, perciò, l'uno o l'altro gruppo di relazioni, il cui campo di applicazione e significato sono illustrati nella figura 2.

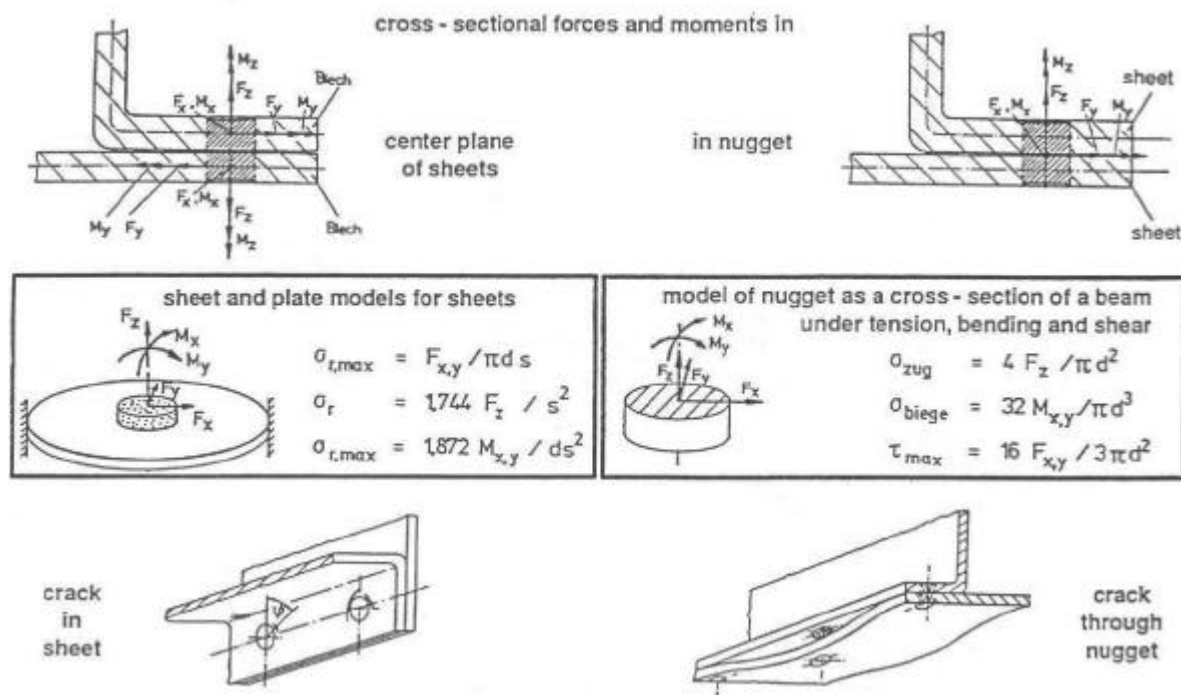


Figura 2

Sollecitazioni previste dal modello di Rupp *et al.* e formule per il calcolo delle sollecitazioni nominali (riprodotta grazie alla cortesia della Society Automotive Engineers).

La previsione della rottura si effettua dopo avere tarato questo modello mediante la curva S-N fornita da campioni saldati con la medesima tecnologia.

## 2. Confronto tra le previsioni ed i risultati sperimentali

Nel presente lavoro sono stati applicati i modelli di cui al punto precedente, confrontando le previsioni da questi fornite con i risultati di prove a fatica su campioni saldati sia con un solo punto, nelle due configurazioni dette *lap-joint* e *peel-joint*, sia con tre punti di saldatura, variamente disposti, in configurazione *lap-joint* (vedi figura 3).

Il materiale utilizzato è acciaio da imbutitura al Carbonio a media resistenza tipo Fe P13 UNI 5867 sotto forma di lamiera di 2 mm e 1,5 mm di spessore. La composizione chimica riscontrata tramite apposite analisi è la seguente: C=0,069%, Mn=0,282%, Al=0,029%, Si=0,008%, P= 0,008% S=0,015%.

Sono state eseguite varie prove preliminari per accertare le caratteristiche meccaniche del materiale base. Il carico unitario di rottura è risultato pari a 368 N/mm<sup>2</sup>, quello di snervamento 268 N/mm<sup>2</sup>. Tramite apposite prove sono state determinate la curva S-N di resistenza a fatica ed il comportamento  $\sigma$ - $\epsilon$  sia ciclico sia monotono, che per brevità qui non si riportano.

I punti di saldatura, di diametro pari a circa 6,8 mm, sono stati eseguiti, su lamiera da 2 mm di spessore, con elettrodi da 7 mm, serrati con una forza di 4,8 kN ed applicando una corrente di 13,5 kA con 18 cicli a 50 Hz.

Nelle prove di fatica sui campioni con un solo punto di saldatura, si è arrestata la prova al manifestarsi di una riduzione di rigidità pari al 20% del valore stabilizzato. In tale caso sui provini *lap joint* si manifestava una fessura passante. Nel caso di campioni con più punti si è arrestata la prova quando è apparsa una fessura di analoga dimensione a quelle di cui sopra.

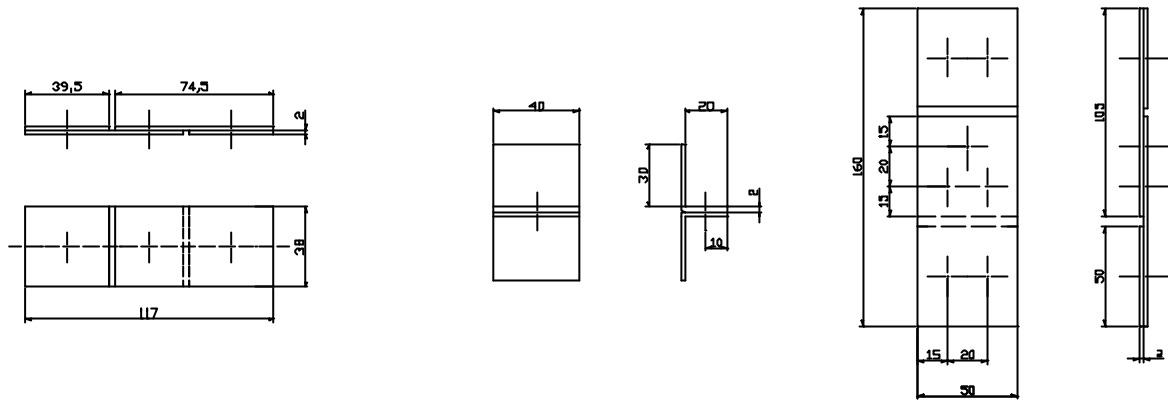
Sono state inoltre eseguite alcune prove su campioni speciali, dove la deformazione era prevalentemente localizzata nella ZTA di punti di saldatura, per stimare approssimativamente il comportamento  $\sigma$ - $\epsilon$  del materiale di tale zona, come richiesto per l'applicazione del modello di Sheppard *et al.*

I risultati delle prove di fatica su provini ad un solo punto *lap joint* sono confrontate con quelle previste dal modello di Sheppard *et al.* nella figura 4. Per ottenere un buon accordo è stato necessario ipotizzare una resistenza a fatica della ZTA leggermente diversa da quella indicata dalla procedura di Sheppard *et al.*, ove la resistenza si stima in proporzione con la microdurezza misurata sulla ZTA e quella misurata sul materiale base, di cui sono note tutte le proprietà. Un'altra pesante assunzione, riguarda la definizione di nucleazione, che secondo Sheppard *et al.* termina quando esiste una fessura relativamente piccola rispetto allo spessore della lamiera. Secondo le indicazioni di Sheppard *et al.* qui si è assunto che, mediamente, la fase di nucleazione corrisponda al 30% del numero di cicli occorrenti perché le fessure, diventando visibili, riducano del 20% la rigidità locale dell'unione, come osservato sperimentalmente.

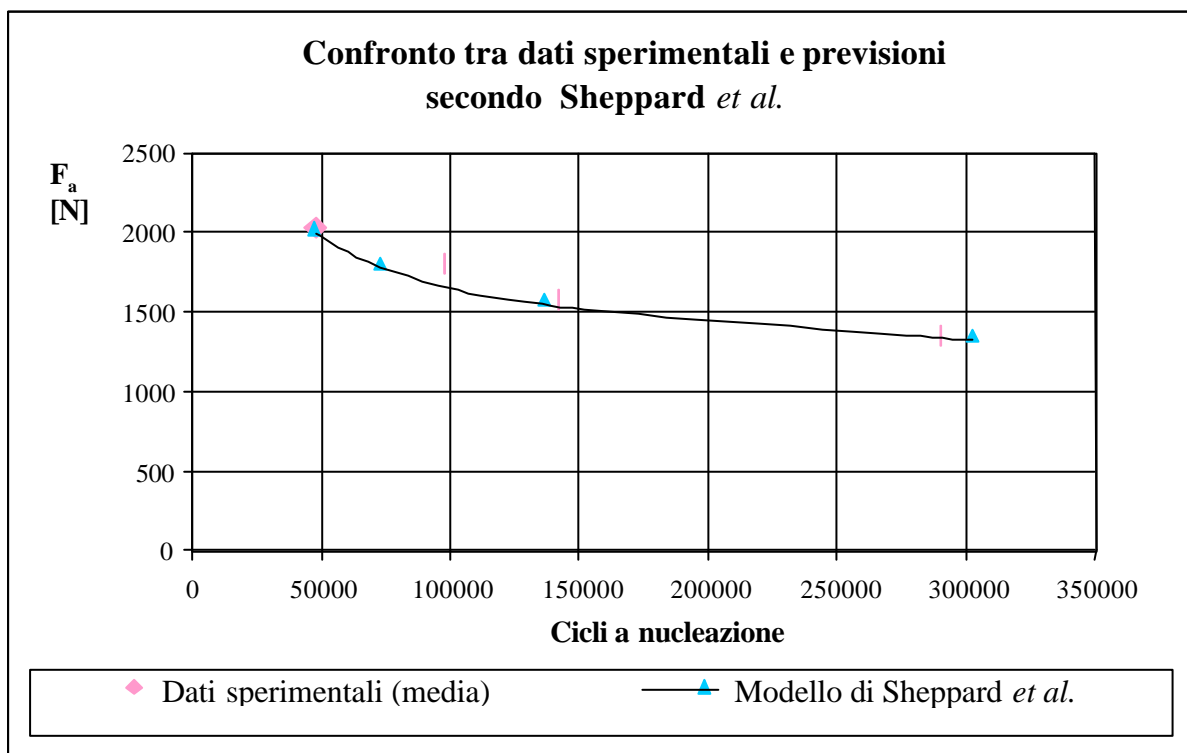
Il modello di Rupp *et al.* deve, per la sua natura, essere tarato usando la curva S-N sperimentale ottenuta con provini ad un solo punto di saldatura. Si è tuttavia notato che, a differenza di quanto prevedono Rupp *et al.* per casi analoghi, nelle prove eseguite la rottura dei provini *peel-joint* si è sempre manifestata nel punto di saldatura.

Nella Tabella 1 sono presentati i confronti tra i dati ottenuti su provini con tre punti di saldatura e le previsioni ottenibili con i due approcci, applicati secondo gli assunti prima ricordati. La migliore correlazione si è ottenuta applicando il modello di Rupp *et al.*. Le difficoltà d'applicazione di questo

approccio sono risultate, come si è già fatto notare, minori di quelle che si incontrano usando l'approccio di Sheppard *et al.*.



*Figura 3*  
Campioni adoperati nelle prove di fatica, eseguite in controllo di carico a 15 Hz con rapporto di asimmetria  $R=0,1$ .



*Figura 4*  
Risultati sperimentali e previsione della rottura per fatica dei provini lap joint con un solo punto di saldatura secondo Sheppard *et al.*

Tabella 1

Confronto tra risultati sperimentali e previsioni della rottura per fatica di provini lap joint con tre punti di saldatura secondo i procedimenti di Rupp *et al.* e di Sheppard *et al.*

Livelli di carico [N]	Numero di cicli a rottura (media)	Numero di cicli a rottura secondo Rupp <i>et al.</i>	Numero di cicli a rottura secondo Sheppard <i>et al.</i>
900 – 9000	297000	245000	81900
700 – 7000	623935	610000	162933
600 – 6000	1479000	1400000	303266

#### 4. Conclusioni

Si sono confrontati due modelli per la previsione della rottura a fatica di collegamenti con punti di saldatura nel campo della fatica ad alto numero di cicli. Il modello di Sheppard *et al.* presenta, rispetto al modello di Rupp *et al.*, il merito di descrivere meglio la rigidità iniziale del punto di saldatura. Inoltre, teoricamente, è richiesta solo la conoscenza di parametri propri del materiale e della geometria locale per prevedere la resistenza a fatica del punto. Ciò nonostante sembrano discutibili alcuni assunti del modello di Sheppard *et al.*, quali, ad esempio, la stima *a priori* sia dell'effetto di concentrazione sia del contributo delle tensioni residue. Inoltre la procedura è di laboriosa applicazione, in particolare per le incertezze sulle proprietà meccaniche della ZTA. Nell'applicazione al caso di saldature con alcuni punti di saldatura, questo modello, pur essendo stato messo a punto tramite prove su campioni con un solo punto di saldatura, non è risultato soddisfacente. Migliori risultati si potrebbero presumibilmente ottenere utilizzando il modello di propagazione (da "micro" a "macrofessura") che Sheppard *et al.* propongono, ma che appesantisce ulteriormente la procedura.

Il modello di Rupp *et al.*, concettualmente semplice e di facile applicazione, è risultato sostanzialmente soddisfacente nel caso di giunzioni con alcuni punti. Questo modello può essere presumibilmente perfezionato in modo da modellare sia la rigidità locale, sia la riduzione di rigidità che si produce a causa di fessurazioni parziali e che modifica la ripartizione del carico tra più punti di saldatura. Con tali modifiche l'impiego del modello di Rupp *et al.* potrebbe rivelarsi adeguato nel caso di giunzioni reali.

Attualmente è in corso una modifica in tal senso del modello di Rupp *et al.*, che si intende convalidare mediante prove di fatica su simulacri di telai motoveicolistici stabilendo, inoltre, altri confronti con le previsioni fornite dagli altri modelli proposti dalla letteratura.

#### Bibliografia

- [1] Sheppard S.D., Strange M., "Fatigue Life Estimation in Resistance Spot Welds: Initiation And Early Growth Phase"; Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, vol. 15, **6**, 531-549, **1992**
- [2] Sheppard S.D., "Estimation of Fatigue Propagation Life in Resistance Spot Welds"; ASTM Special Technical Publication, **1211**, 169-185, **1993**

- [3] Sheppard S.D., “*Further Refinement of a Methodology for Fatigue Life Estimation in Resistance Spot Weld Connections*”, ASTM Special Technical Publication, **1292**, 265-282, **1996**
- [4] Zuniga S.M., Sheppard S.D., “*Determining the constitutive properties of the heat-affected zone in a resistance spot weld*”, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, vol. 3, **3**, 391-416, **1995**
- [4] Rupp A., Störzel K., Grubish V.: “*Computer Aided Dimensioning of Spot-Weld Automotive Structures*”; Proceedings of the SAE International Congress and Exposition, March, **1995**