

ANALISI DI DANNEGGIAMENTO STRUTTURALE PER GRUPPI DI SOLLEVAMENTO

R.Tovo⁽¹⁾, F.Villani⁽¹⁾, G.Fabbri⁽²⁾, P.Quagliarella⁽³⁾, G.Balugani⁽³⁾, G.Tartara⁽³⁾

⁽¹⁾Università degli Studi di Ferrara Facoltà di Ingegneria, Via Saragat 1, Ferrara;

⁽²⁾L.T.E S.p.a Via Caravaggio 6, S.Giovanni di Ostellato, Ferrara;

⁽³⁾Cesab S.p.a Via Persicetanea Vecchia 10, Bologna.

SOMMARIO

Con il presente lavoro si è voluto determinare una metodologia di analisi per la valutazione del danneggiamento in condizioni di carico affaticanti su elementi strutturali di carrelli elevatori.

Il dettaglio studiato nella fattispecie consiste in una serie di prototipi di un montante facente parte di un gruppo di sollevamento che presenta giunzioni saldate in corrispondenza delle posizioni più critiche.

L'obiettivo del lavoro consiste nella valutazione della resistenza a fatica di due varianti geometriche del dettaglio saldato che caratterizza il componente. A tale scopo, a monte del lavoro sono stati eseguiti test di fatica a banco prova sulle due diverse soluzioni esplorate per stimare il comportamento a fatica.

In seguito ad una serie di rilievi estensimetrici eseguiti sul componente in condizioni di esercizio e in condizioni di campo prova è stato possibile stimare i cumulativi di danneggiamento tenendo conto delle curve di resistenza ottenute sperimentalmente.

Con la presente metodologia è stato possibile mettere a confronto geometrie saldate complesse sottoposte a condizioni di carico affaticanti ad ampiezza variabile confrontando inoltre il danneggiamento per diverse storie di carico tarate su diverse condizioni di lavoro.

Sfruttando l'ipotesi di accumulo lineare del danneggiamento dei cicli contati si è risaliti al numero dei blocchi a rottura e quindi alla durata prevista in termini di ore di lavoro per ogni tipologia di montante analizzato.

Successivamente, mediante analisi FEM, è stato possibile effettuare una stima di durata in base ai valori delle tensioni di "hot spot" rilevate in corrispondenza della giunzione maggiormente sollecitata, tenendo conto della classe del dettaglio strutturale per i quali risulta noto il limite di fatica convenzionale a $2e6$ cicli.

1. OGGETTO DI ANALISI

L'oggetto di analisi riguarda due prototipi di montanti facente parte di un gruppo di sollevamento di un carrello elevatore. Il gruppo di sollevamento, rappresentato principalmente dal telaio fisso (oggetto di questo studio), telaio mobile, carrellino, piastra porta forche e forche, viene agganciato al carrello elevatore attraverso due attacchi saldati.

I movimenti dell'intera struttura sono rappresentati dalla traslazione verticale in direzione ortogonale al suolo e dall'angolo di brandeggio, che rappresenta l'inclinazione del montante rispetto al piano ortogonale al suolo a cui avviene la traslazione verticale.

La traslazione verticale è permessa dallo scorrimento relativo dei longheroni attraverso cuscinetti a rulli cilindrici che esercitano un contatto di strisciamento con le piastre interne dei profili. Il carico appoggia sulle forche ancorate alla piastra, la quale può essere fissa o traslante in direzione

orizzontale. La piastra è sorretta dal carrellino, il quale scorre all'interno dei profili con lo stesso sistema di guide presente per lo scorrimento dei profili lungo la traslazione verticale.

2. PROCEDURA DI MISURA

La misura delle deformazioni è stata ottenuta attraverso l'utilizzo di estensimetri elettrici a resistenza incollati nei punti ritenuti più significativi ai fini dell'analisi.

Le informazioni ricavate dalle prove sono rappresentate dagli andamenti della deformazione in funzione del tempo, che essendo caratterizzate da un andamento irregolare, è stato necessario estrarre e ricostruire i cicli in alternanze e ampiezze, cioè si è reso necessario effettuare un conteggio, utilizzando il metodo Rainflow, il quale offre migliori garanzie nella riduzione di una storia temporale in una serie di cicli a fatica.

I valori in microstrain ottenuti durante i rilievi in esercizio con percorso stabilito, sono stati riportati in termini di tensioni sul longherone, ipotizzando un legame sforzi-deformazioni elastico lineare e ipotizzando la monoassialità dello stato tensionale. Il percorso è stato scelto in modo da rappresentare al meglio il reale utilizzo del carrello.

I segnali estensimetrici fanno riferimento a due diverse prove, simulanti le condizioni di esercizio e di campo prova. Per questa seconda serie di rilievi sono state analizzate sia le storie di carico originali, sia quelle ottenute eliminando il tratto di storia di carico relativo al passaggio sopra ai dossi. In questo modo è stato possibile valutare il contributo al danneggiamento dei passaggi, a pieno carico, sopra a terreno sconnesso.

I cumulativi di carico e di danno sono stati ricavati con il *toolbox* WAFO di MatLab, tenendo conto della curva di Wohler e del valore di intercetta a fatica $\Delta\sigma_A$ a 2 milioni cicli ricavate mediante prove sperimentali di fatica a banco prova.

Tra i diversi punti estensimetrati sono stati presi in considerazione solo i dati degli estensimetri incollati a 250 mm dal piede di cordone di saldatura superiore della traversa di brandeggio.

3. PROVE SPERIMENTALI

Le due coppie di montanti analizzati si differenziano per la diversa geometria del dettaglio strutturale dell'attacco della traversa di brandeggio, identificati come tipologia 1 e tipologia 2, riportati nelle seguenti figure.



Figure 1-3. Carrello elevatore e particolare traversa di brandeggio tipologia 1 e tipologia 2

Per la stima della resistenza in esercizio sono state svolte una serie di prove sperimentali le quali hanno permesso di ottenere una previsione sulla resistenza a fatica dei componenti saldati oggetto di analisi. Si riporta di seguito lo schema di funzionamento del banco prova e i valori dei carichi applicati per entrambi i test effettuati.

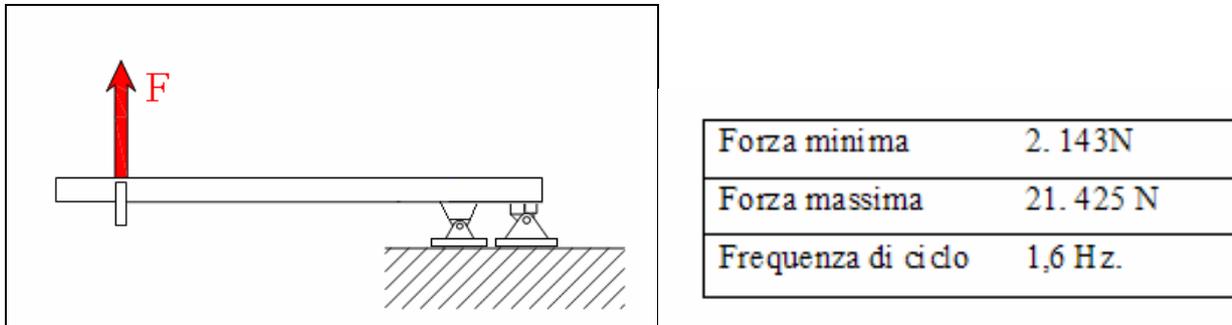


Figura 4. Schema di funzionamento del banco prova e carichi di prova applicati

Il numero dei cicli a rottura è stato prefissato in corrispondenza ad un incremento della cedevolezza pari al 5% del valore iniziale. A titolo di esempio, si riporta la curva di cedevolezza ottenuta sperimentalmente in laboratorio per la prima coppia di montanti testati

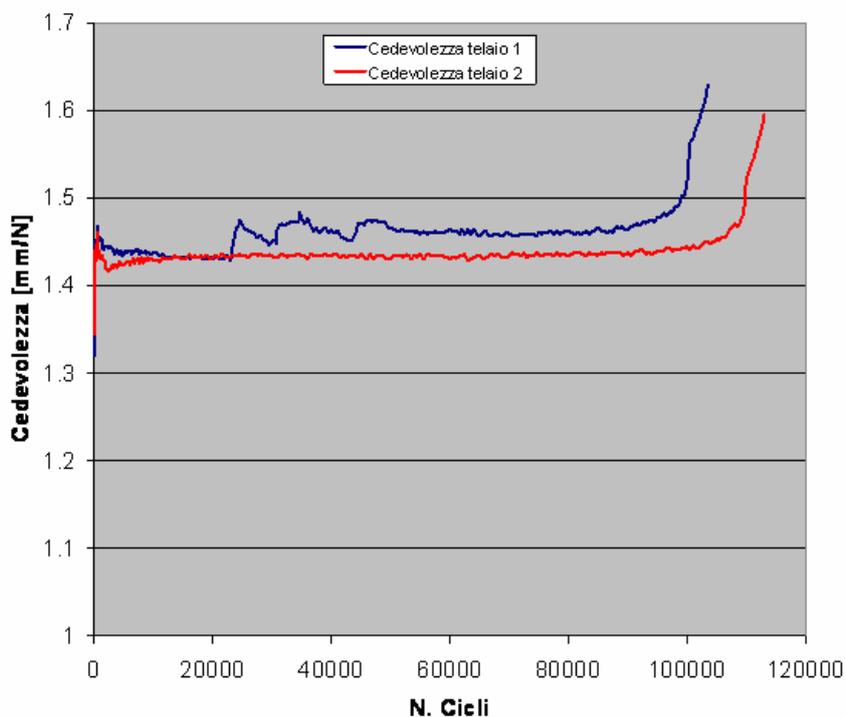


Figura 5. Cedevolezza prima coppia di telai testati.

Il numero di cicli a rottura per la condizione di cedimento imposta e le relative zone di rottura sono riassunte nelle seguenti tabelle.

Tabelle 1 e 2. Numero cicli di rottura

Nr. Telaio	Denominazione	$\Delta\sigma$ [MPa]	Cicli a rottura	Zona di rottura
Tipologia1 n°1	Tipologia 1	160	98990	Saldatura superiore traversa di brandeggio
Tipologia1 n°2	Tipologia 1	160	109900	Saldatura superiore traversa di brandeggio

Nr. Telaio	Denominazione	$\Delta\sigma$ [MPa]	Cicli a rottura	Zona di rottura
Tipologia 2 n°1	Tipologia 2	160	280000	Saldatura superiore traversa di brandeggio
Tipologia 2 n°2	Tipologia 2	160	258000	Saldatura superiore traversa di brandeggio

Facendo riferimento alla prima tipologia di montante analizzato, partendo dall'equazione della curva è possibile calcolare il limite di fatica $\Delta\sigma_A$ a 2 milioni cicli:

$$\Delta\sigma^{-k} \cdot \bar{N} = \Delta\sigma_A^k \cdot 2e6 \Rightarrow \Delta\sigma_A = \Delta\sigma \cdot \left(\frac{\bar{N}}{2e6}\right)^{1/k} = 60 \text{ MPa}$$

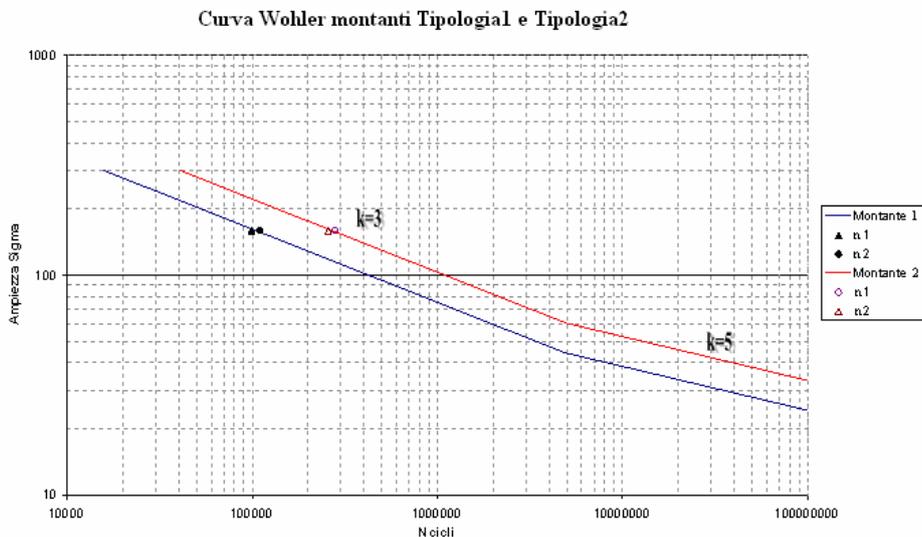
dove $\bar{N} = 104445$ è la media geometrica dei cicli a rottura sperimentali al livello $\Delta\sigma = 160 \text{ MPa}$. Analogamente per la seconda tipologia di montante analizzata, la relazione risulta:

$$\Delta\sigma^{-k} \cdot \bar{N} = \Delta\sigma_A^k \cdot 2e6 \Rightarrow \Delta\sigma_A = \Delta\sigma \cdot \left(\frac{\bar{N}}{2e6}\right)^{1/k} = 82 \text{ MPa}$$

Dove $\bar{N} = 269000$ è la media geometrica dei cicli a rottura sperimentali al livello $\Delta\sigma = 160 \text{ MPa}$. Questa modifica ha permesso di aumentare in maniera considerevole il numero dei cicli a rottura con conseguente traslazione della curva di Wohler verso destra.

In base ai valori dei numeri di cicli a rottura ottenuti a parità di $\Delta\sigma$ applicato, è possibile rappresentare le rispettive curve di Wohler in cui è stato imposto pendenza $k=3$ fino ad un numero di cicli pari a $5e6$ per poi estendere la curva a pendenza $k=5$ fino ad un numero di cicli pari a $1e8$. L'andamento delle due curve per i montanti analizzati è riportato in figura.

Figura 6. Cura di Wohler coppia montanti testati



4. STIMA DEL DANNEGGIAMENTO

Mediante procedimento Rainflow è ora possibile tracciare i cumulativi del danno per ogni rilevamento effettuato.

Per entrambe le coppie di montanti analizzate, noto il valore dell'intercetta a $2e6$ cicli (σ_{SA}) si è voluto valutare il nuovo valore dell'intercetta a $5e6$ cicli (σ_{SE}) e il valore dell'intercetta a $1e8$ cicli (σ_{ST}). I valori di danneggiamento riscontranti in corrispondenza di valori di ampiezza di sollecitazioni inferiori a $24,28$ Mpa (σ_{ST} tipologia montante 1) e $33,19$ Mpa (σ_{ST} tipologia montante 2) non saranno più conteggiati nella determinazione dei cumulativi di danno.

A titolo di esempio si riportano le curve di danneggiamento ottenuta con il *toolbox* WAFO di MatLab per tipologia montante 1, profilo sinistro e destro ciclo originale condizioni campo prova.

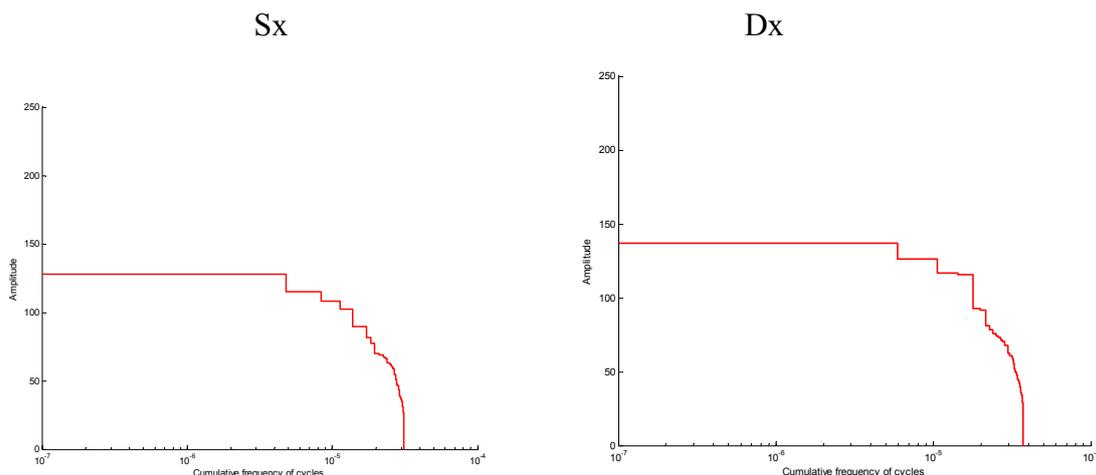


Figure 7 e 8. Rilevazioni condizioni campo prova, tipologia montante 1 ciclo Originale, montante sinistro e destro

Dai grafici ottenuti si evidenzia come per valori di ampiezza di sollecitazione inferiore al valore dell'intercetta ottenuti a $1e8$ cicli non partecipano alla stima del danno.

I valori di danneggiamento ottenuti sono di seguito riassunti e classificati in base ai diversi rilievi effettuati.

Tabella 3. Valori di danneggiamento stimati per ogni rilevamento effettuato.

Danno per misura	Condizioni esercizio Ciclo1		Condizioni esercizio Ciclo 2		Campo prova		Campo prova ciclo modificato	
	Sx	Dx	Sx	Dx	Sx	Dx	Sx	Dx
Tipologia 1	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-5}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$
Tipologia 2	$4.7 \cdot 10^{-6}$	$4.1 \cdot 10^{-6}$	$3.2 \cdot 10^{-6}$	$2.55 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$3.9 \cdot 10^{-6}$	$4.7 \cdot 10^{-6}$

Effettuando una media tra le misure riferite al longherone destro (flessione nominale destra) e longherone sinistro (flessione nominale sinistro) per ogni rilevamento eseguito, è possibile ricavare un solo valore di danneggiamento per ogni rilevamento effettuato. I valori ricavati per le due tipologie di montanti analizzati sono di seguito riassunti.

Tabella 4. Valori di danneggiamento finali

Danno per misura	Condizioni esercizio	Campo prova	Campo prova ciclo modificato
Tipologia 1	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$
Tipologia 2	$3.64 \cdot 10^{-6}$	$1.32 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$

È possibile calcolare il danno secondo l'ipotesi di accumulo lineare del danneggiamento dei cicli contati (legge di Miner) ed effettuare una stima del numero di ripetizione del blocco di carico per arrivare a rottura (n) attraverso la semplice relazione:

$$D \cdot n = 1 \Rightarrow n = \frac{1}{D}$$

Il danneggiamento conseguente a tale ciclo di lavoro (con ipotesi di accumulo lineare) consente di stimare la vita di rottura. Il numero di blocchi a rottura calcolati per ogni tipo di telaio analizzato, sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 5. Numero di blocchi a rottura

N blocchi a rottura	Condizioni esercizio	Campo prova	Campo prova ciclo modificato
Tipologia 1	76923	29412	76923
Tipologia 2	274725	75758	232558

Calcolato il numero di blocchi a rottura per i diversi montanti nelle diverse condizioni di esercizio, considerando un possibile numero di ripetizioni orarie di tali cicli, corrispondente a un possibile utilizzo dal componente in oggetto stimato in 15 ripetizioni all'ora, si può stimare la durata prevista in ore di lavoro. I tempi di durata, espressi in ora, sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 6. Ore di durata stimate

Durata (h)	Condizioni esercizio	Campo prova	Campo prova ciclo modificato
Tipologia 1	5128	1961	5128
Tipologia 2	18315	5051	15504

Lo stesso procedimento è stato applicato nel caso in cui si fosse ipotizzata la curva di Wohler con pendenza $k=3$.

Tabella 7. Ore di durata stimante con pendenza della curva di Wohler $k=3$

Durata (h)	Condizioni esercizio	Campo prova	Campo prova ciclo modificato
Tipologia 1	3419	1802	4301
Tipologia 2	8525	4445	11696

Si può notare come la maggiore variazione in termini di ore di durata si ha per la seconda tipologia di montante in corrispondenza dei rilievi effettuati in condizioni di esercizio, il cui valore percentuale è stato stimato attorno ad un 115%. È necessari ricordare, infatti, che l'assunzione di $k=3$ per la curva di resistenza fornisce valori di danneggiamento superiori e può essere considerata un'assunzione in vantaggio di sicurezza.

5. ANALISI FEM

Successivamente sono state svolte simulazioni FEM affinché si simulassero le condizioni adottate nella stima del comportamento a fatica dei componenti coinvolti. Le geometrie dei montanti e le rispettive analisi sono state realizzate mediante il software CATIA. Per tutti i modelli sono stati creati i giochi esistenti tra le traverse e i longheroni e sono state modellate le saldature con particolare attenzione alla traversa di brandeggio, che caratterizza le diverse tipologie di montante. Affinché si simulassero le medesime condizioni di banco prova, è stata applicata una forza di 21425N sulla mezzeria della traversa superiore. Tale valore è stato ricavato con $\Delta\sigma = 160$ MPa e con valore del rapporto di sollecitazione $R = 0.1$.

Il modello è stato meshato con elementi tetraedrici a 10 nodi con dimensione globale di 10 mm, mentre sulle saldature è stata imposta una dimensione di 5 mm. Per garantire una mesh più affinata in corrispondenza della saldatura della traversa di brandeggio, è stata realizzata una superficie di cucitura posta a 2,5 mm dal piede della saldatura in cui la dimensione degli elementi è stata imposta pari a 2 mm.

Si riportano di seguito le immagini per la prima tipologia di montante, in cui si evidenziano la geometria del montante, la distribuzione della sollecitazione principale massima e il particolare della traversa di brandeggio che caratterizza la geometria di ogni singolo montante.

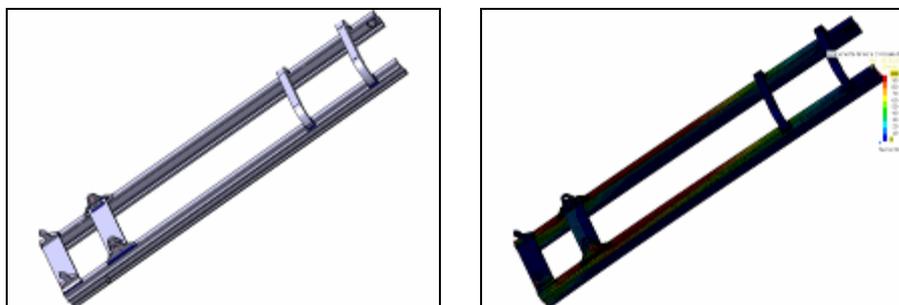


Figure 9 e 10. *Geometria e sollecitazione principale massima*

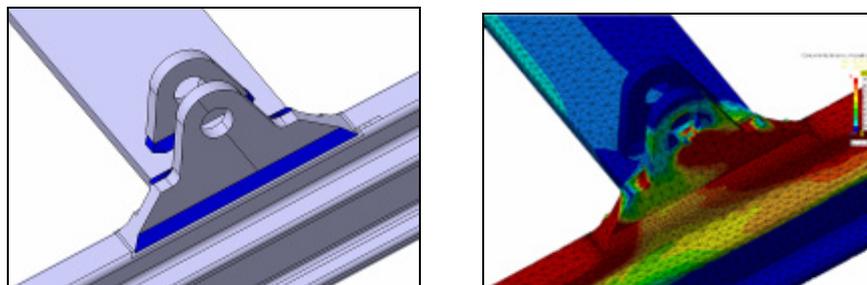


Figure 11 e 12. *Particolare attacco traversa di brandeggio*

Si riportano i valori delle tensioni nodali ottenute a diverse distanze dal piede del cordone di saldatura della traversa di brandeggio, indicati come punti sonda nella seguente tabella.

Tabella 8. Valori tensioni nodali in corrispondenza dei punti sonda montante Tipologia 1.

Tipologia 1		
Punti sonda	Tensione massima	$\Delta\sigma$
1	490	441
2.5	342	307,8
5	271	243,9
10	231	207,9
15	211	189,9
25	191	171,9

Analogamente, si riportano i risultati ottenuti per la seconda tipologia di montante.

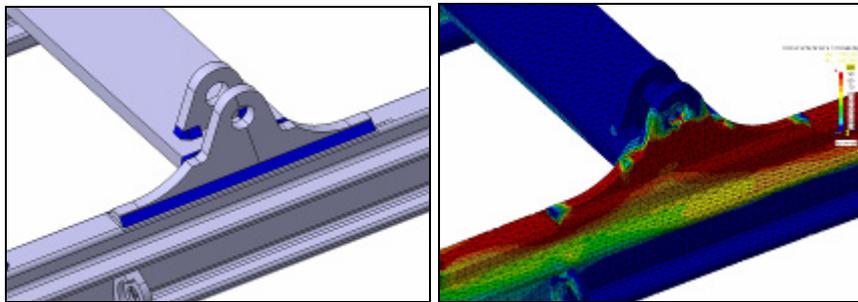


Figure 13 e 14. Particolare attacco traversa di brandeggio e tensione principale massima.

Tabella 9. Valori tensioni nodali in corrispondenza dei punti sonda montante Tipologia 2.

Tipologia 2		
Punti sonda	Tensione massima	$\Delta\sigma$
1	411	369,9
2.5	264	237,6
5	217	195,3
10	192	172,8
15	183	164,7
25	173	155,7

In base ai valori delle tensioni nodali rilevate, è stato possibile effettuare un confronto mediante la “tensione di hot spot” del dettaglio saldato oggetto dello studio, definita secondo l’equazione:

$$\sigma_{hs} = 1.5 \cdot \sigma_{5mm} - 0.5 \cdot \sigma_{15mm}$$

Tali confronti sono riportati nel seguente grafico.

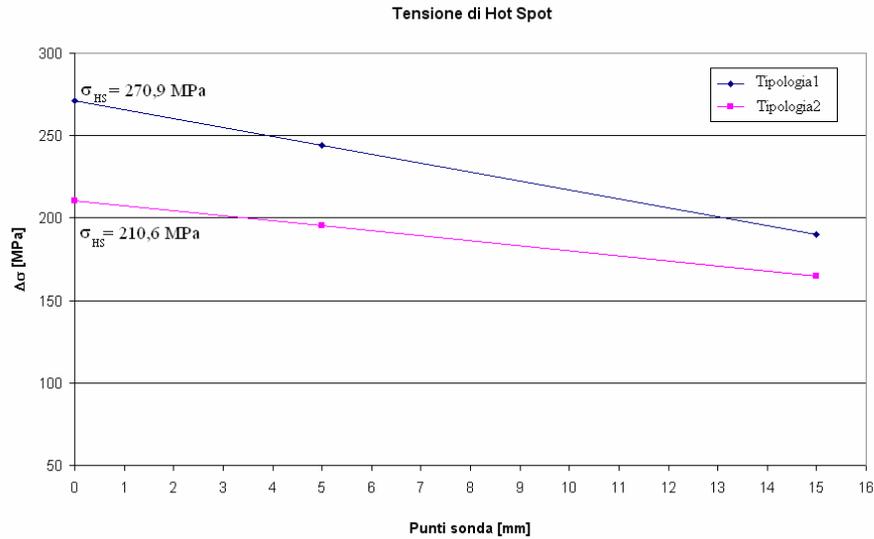


Figura 15. Confronto tensione di hot spot in condizioni a banco prova

In base alle caratteristiche del dettaglio strutturale [1] e ai valori delle tensioni di Hot Spot in precedenza valutati, è possibile stimare la durata in numero di cicli dei diversi componenti analizzati, dal momento che tutti i giunti sono classificati in classi di dettaglio strutturale e per ogni classe si è stabilito, mediante prove di fatica, il limite di fatica convenzionale a $2e6$ cicli con probabilità di sopravvivenza pari a 97,7% [2].

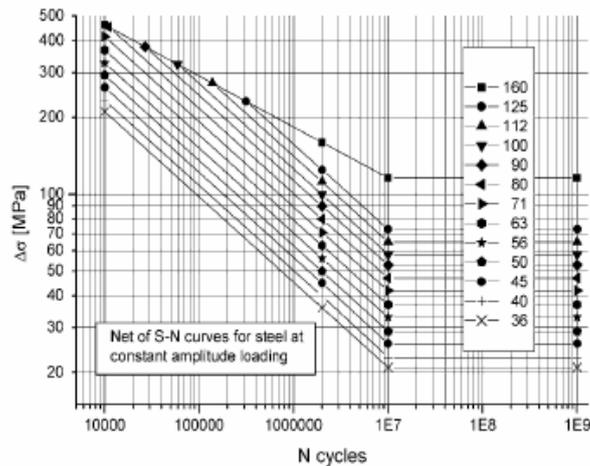


Figura 16. Curva di resistenza riferita a diversi elementi strutturali.

La stima di durata si riduce pertanto all'individuazione della classe di dettaglio appropriata per il componente che si sta verificando.

Le durate di progetto calcolati per i montanti analizzati sono riassunte nella seguente tabella.

Tabella 10. *Durata stimata con tensioni di Hot Spot*

Montante	Numero cicli di durata
Tipologia 1	75.000
Tipologia 2	160.000

A titolo di confronto, si riportano i numeri di cicli calcolato mediante il metodo Rainflow.

Tabella 11. *Durata stimata con procedimento Rainflow*

Montante	Condizioni esercizio	Campo prova	Campo prova modificato
Tipologia 1	76923	29412	76923
Tipologia 2	274725	75758	232558

Si può notare come esista una certa corrispondenza tra i numeri di cicli stimati mediante analisi Fem e numero di cicli valutati mediante metodo Rainflow, soprattutto per i rilievi effettuati nelle condizioni di esercizio e nelle condizioni campo prova con ciclo modificato.

Si può oltretutto notare come le sollecitazioni dovute al passaggio sugli ostacoli risultano troppo onerose e possono risultare eccessive nel simulare il reale utilizzo del carrello.

Bibliografia

[1] *Recommendations for fatigue design of welded joints and components* IIV document XIII-2151-07/ XV-1254-07. May 2007

[2] *Recent developments in local concept of fatigue assessment of welded joints*. D.Radaj, C.M. Sonsino, W. Ficke.