

UN CRITERIO GENERALE PER LA VALUTAZIONE DELLA DURATA A FATICA DI STRUTTURE SALDATE A PUNTI.

P. Fanelli¹, F. Vivio¹, V. Vullo¹

¹ Dip. di Ingegneria Meccanica, Università di Roma “Tor Vergata”, Roma (Italy)
E-mail: fanelli@ing.uniroma2.it; vivio@uniroma2.it, vincenzo.vullo@uniroma2.it

SOMMARIO

Nel presente lavoro, un criterio di valutazione della durata a fatica di strutture saldate multipunto, già illustrato in precedenti lavori, viene applicato ad una serie di risultati sperimentali presenti in letteratura.

Tale criterio è basato sull'utilizzo di un elemento punto di saldatura da inserire nel modello FE di strutture saldate a punto. Con l'impiego di tale elemento, la cui formulazione è basata sulla soluzione analitica in forma chiusa di un modello teorico di riferimento del punto di saldatura, è possibile simulare in maniera estremamente accurata il comportamento strutturale del punto di saldatura medesimo e della regione di lamiera ad esso adiacente. Ciò consente un'altrettanto accurata valutazione degli effettivi carichi transitanti sui punti presenti in una struttura multi-spot. L'elemento punto di saldatura presenta un link di connessione tra le due lamiere, che può essere considerato rigido, nelle condizioni di punto di saldatura integro, o adeguatamente deformabile, allo scopo di simulare il danneggiamento subito dal punto medesimo. Quest'ultima caratteristica è quella che permette di definire una procedura di simulazione del danneggiamento progressivo dei vari punti di saldatura durante l'evolversi del ciclo di carico affaticante applicato alla struttura.

Il criterio prevede inoltre la definizione di un parametro tensionale convenzionale (ERS – Equivalente Radial Stress) che può essere valutato, analiticamente, per mezzo del modello teorico di riferimento, per ogni punto di saldatura. Tale parametro tiene conto anche dell'evoluzione del danneggiamento del singolo punto di saldatura, simulabile grazie alla particolare definizione dell'elemento punto di saldatura, e della conseguente variazione dei carichi su di esso agenti.

Vengono quindi illustrati i risultati con diagrammi ERS-N in base a numerosi dati reperiti in letteratura, dimostrando la buona flessibilità nell'applicazione del criterio proposto, allorché si considerano provini di caratteristiche molto differenti.

1. INTRODUZIONE

Le difficoltà emergenti nello studio della durata a fatica di strutture saldate a punti derivano principalmente dalla ridistribuzione dei carichi che avviene in maniera continua durante il danneggiamento della struttura. Altro elemento di difficoltà nella completa comprensione del problema è rappresentato dalla predizione della modalità di rottura del punto saldato. Gli studi presenti in letteratura propongono criteri spesso troppo legati alla geometria del provino utilizzato, piuttosto che alle modalità di carico, così da non consentire l'individuazione e la definizione di univoci parametri di confronto generali, validi per qualsiasi geometria. Inoltre, molto spesso, l'influenza causata da stati tensionali pre-esistenti, come quelli dovuti alla

presenza di zone termicamente alterate (ZTA), che si generano in fase di realizzazione della giunzione, viene trascurata a causa della notevole difficoltà dell'analisi ad essi inerente.

Naturalmente la resistenza a fatica del punto saldato è strettamente legata al campo tensionale nominale esistente in prossimità della stesso, la cui definizione rappresenta una condizione necessaria alla predizione della sua vita a fatica. La definizione accurata della rigidità della zona di giunzione e del campo tensionale ivi presente può avvenire per via puramente analitica o tramite indagini numeriche svolte con modelli FE anche complessi.

Un approccio classico comporta l'individuazione di un parametro rappresentante lo stato tensionale prossimo al punto. Tale parametro rappresenta il metro di valutazione della durata a fatica della struttura. In tal senso Rupp et al. [1-2] introdussero per primi la tensione radiale massima come parametro di valutazione dello stato tensionale a fatica. Tale via risulta difficile e persino impraticabile a causa della difficoltà di determinazione di fattori di concentrazione delle tensioni, attesa una geometria continuamente variabile a causa dell'evoluzione del danneggiamento. Inoltre sono influenti e di difficile valutazione gli effetti della ZTA, le tensioni residue e l'esistenza di una plasticizzazione locale nei pressi delle singolarità geometriche.

Dall'evoluzione dell'idea proposta in [1], nasce il parametro descritto in [3], consistente in una tensione radiale "estrapolata". Considerando l'elemento rigido rappresentante il nocciolo del punto di saldatura incastrato in una piastra circolare, la caratterizzazione strutturale e l'analisi delle tensioni sono effettuabili in forma chiusa per qualunque condizione di carico [3,4]. In questo modo si determina un parametro proprio del punto, indipendente dagli effetti di bordo e di concentrazione di tensioni. Proseguendo in tale direzione, in [4] il parametro scelto viene tramutato nella ERS (Equivalent Radial Stress). Dalla contemporanea applicazione di un approccio analitico e di un'analisi numerica emerge uno strumento in grado di garantire l'accuratezza dei risultati in termini di rigidità e la congruenza con la struttura circostante. Inoltre tale strumento è in grado di cogliere i carichi transitanti su ciascun punto di saldatura all'avanzare del danneggiamento in strutture multi punto.

Connessa con la definizione del parametro ERS, in [4,5] viene proposto un elemento punto di saldatura che si basa sul medesimo approccio analitico della piastra circolare. La sostituzione del punto saldato e della porzione di lamiera prossima allo stesso con l'elemento proposto permette una notevole riduzione degli oneri computazionali in favore di un'ottima accuratezza descrittiva del comportamento della struttura, come confermato in [6], soprattutto in presenza di strutture complesse dotate di numerosi punti di saldatura.

L'applicazione dell'elemento punto di saldatura ed il relativo modello teorico di riferimento sono stati successivamente estesi per la valutazione del comportamento del punto di saldatura in campo elasto plastico [7]. In [8] viene invece presentato un nuovo approccio teorico generale per la simulazione, in campo elastico lineare, di strutture multipunto saldate a punti o rivettate.

Come accennato precedentemente ed ampiamente illustrato in [3], un parametro tensionale inerente alla struttura non danneggiata può non fornire indicazioni affidabili sulla durata a fatica dello stesso; ciò perché il danneggiamento delle giunzioni comporta una continua redistribuzione dei carichi transitanti su ciascun punto di saldatura e, di conseguenza, un comportamento strutturale in continua evoluzione. Per ovviare a dette circostanze, in [4] viene proposto ed introdotto il parametro ERS che, connesso con il modello FE equivalente, può essere calcolato per qualsiasi condizione di danneggiamento del punto, che viene simulato riducendo progressivamente le caratteristiche di rigidità dell'elemento di connessione dell'elemento punto di saldatura, al crescere del danno subito dalla struttura [5]. In questo modo si ottiene un valore reale dell'ERS per ciascun punto, che rappresenta un riferimento

assoluto caratteristico del numero di cicli di carico, indipendentemente dal tipo di provino utilizzato.

L'introduzione del danneggiamento comporta il passaggio ad una analisi non lineare, nella quale i valori istantanei dell'ERS di ciascun punto sono fortemente variabili nel tempo, al progredire del danneggiamento. La continua redistribuzione dei carichi sui vari punti di saldatura della struttura, da cui consegue una altrettanto continua variabilità dei punti maggiormente sollecitati, porta necessariamente all'individuazione di un criterio di rottura. Al riguardo, sono molteplici le proposte (ad esempio: completo distacco della giunzione; predefinita riduzione della rigidità del provino; comparsa di cricche sul bordo del punto).

Attraverso la raccolta di numerose prove sperimentali e l'analisi dei risultati mediante ERS, è possibile raggruppare in un unico grafico i dati relativi alla durata a fatica di provini differenti, indipendentemente dalla modalità di rottura riscontrata. In tale ottica, in [9] la procedura viene applicata a dati sperimentali riportati in letteratura; nonostante si tratti di provini di forma differente soggetti a diversa condizione di carico, è possibile ottenere un'unica curva S-N attraverso la rappresentazione delle curve ERS-N.

Nel presente lavoro si vuole estendere l'applicazione della procedura di calcolo dell'ERS a nuovi set di dati sperimentali, che vengono dettagliatamente riportati, comparandoli con quelli proposti in [10].

Si dimostra che, mediante l'utilizzo di diagrammi ERS-N, dati di fatica relativi a provini di diversa geometria, con diversa tipologia di carico applicato, possono essere raggruppati in maniera significativa in una unica curva, caratteristica solo del materiale costituente le giunzioni.

2. DESCRIZIONE DEL MODELLO PUNTO DI SALDATURA

La condizione necessaria per la valutazione del parametro ERS risulta l'implementazione di una modellazione accurata del punto di saldatura della zona prossima ad esso, in grado di fornire un'elevata accuratezza nella valutazione delle rigidità, mantenendo contenuto l'apporto di gradi di libertà aggiuntivi. Inoltre tale strumento deve essere in grado di cogliere il progressivo danneggiamento della struttura e la conseguente redistribuzione dei carichi, come sottolineato nell'introduzione. La soluzione analitica per una piastra circolare che presenti un nocciolo rigido centrale, rappresentante il punto di saldatura, è nota per qualsiasi condizione di carico [4,5]; è quindi possibile utilizzare tale soluzione per definire la rigidità della zona prossima al punto e, conseguentemente, valori accurati dell'ERS [5].

Come si riferisce in altri lavori [4,5], è possibile definire l'elemento punto di saldatura mediante l'uso di elementi presenti in qualsiasi codice commerciale. A tal fine si introduce una schiera di elementi *beam* monodimensionali disposti in direzione radiale che, complessivamente, devono presentare la stessa rigidità proposta dalla soluzione analitica. L'applicazione del procedimento a settori angolari della piastra permettere di differenziare le caratteristiche delle *beam* in modo da utilizzare l'elemento anche per mesh irregolari [5]. In Fig. 1 sono riportati sia il processo di generazione dell'elemento punto, a partire dalla soluzione analitica per le varie configurazioni di carico, fino alla definizione delle due schiere di elementi e dell'elemento *link* di connessione tra dette due schiere, sia la sostituzione di parte della mesh rappresentante le lamiere con il modello punto. Impostando una predefinita perdita delle sue caratteristiche meccaniche, l'elemento di connessione, detto *main link*, può consentire di simulare il comportamento a danneggiamento progressivo della giunzione, fino alla rottura determinata dall'eliminazione del *link* medesimo. L'algoritmo di variazione delle caratteristiche meccaniche di questo elemento viene illustrato in [3,5]. Tutta la procedura è stata implementata in una macro compatibile con qualsiasi codice commerciale agli elementi finiti [5]; le informazioni richieste si limitano al diametro del punto di saldatura ed alla

posizione dello stesso. Le caratteristiche della lamiera vengono infatti lette dalla macro a partire dalla mesh esistente, adattandosi alla forma di quest'ultima, senza la necessità da parte dell'utilizzatore di disporre una mesh particolare per ogni caso.

In fase di post-processing, si passa alla definizione del parametro ERS per ciascun punto di saldatura presente. Basandosi sul medesimo impianto teorico utilizzato per la definizione del modello punto, si ricavano i valori di ERS, valutando sia i carichi trasmessi dal punto, sia le tensioni membranali presenti nella lamiera. Poiché detti valori derivano dalla soluzione analitica per ciascuna porzione di lamiera, essi non risentono delle concentrazioni di tensione dovute alla connessione lamiera-nocciolo rigido. Il valore di ERS calcolato rappresenta la massima tensione radiale misurabile in qualsiasi direzione radiale all'interfaccia nocciolo-lamiera. Anche la sua valutazione viene ricondotta ad una procedura ripetitiva automatica per ciascuno step di calcolo [5], in modo da quantificare l'influenza del progressivo danneggiamento della struttura mediante la rappresentazione nel tempo del valore dell'ERS.

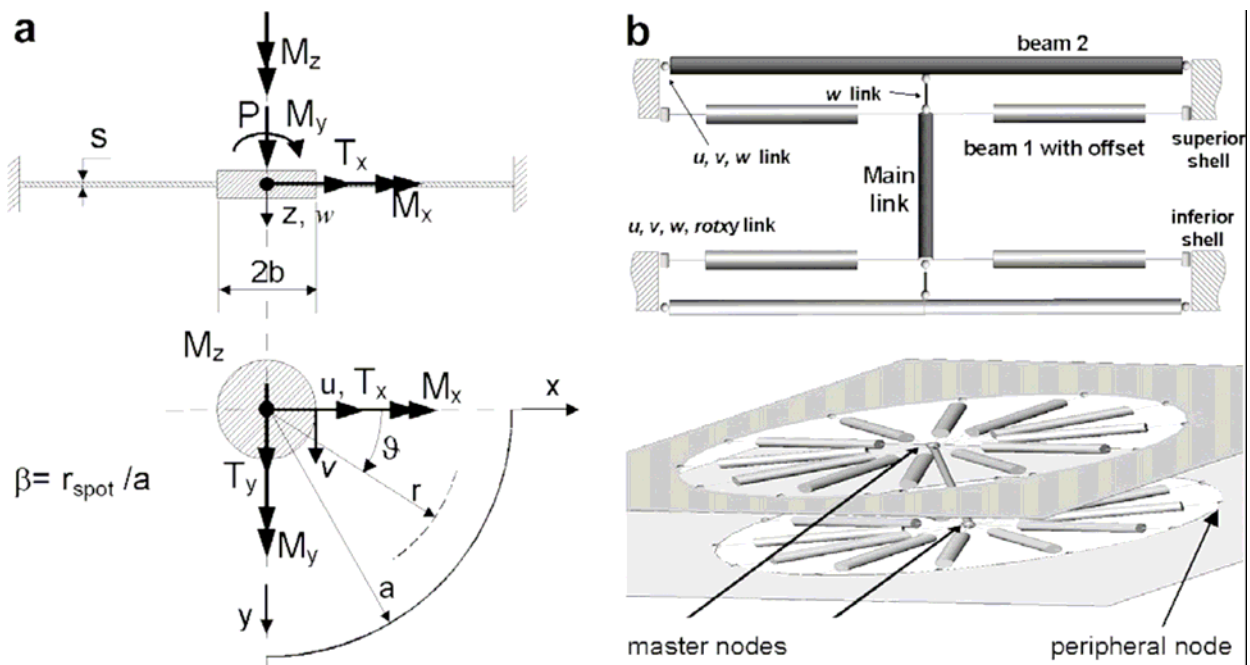


Figura 1: Procedimento di generazione dell'elemento punto di saldatura.

La variabilità dell'ERS nel tempo offre la possibilità di valutare un ulteriore parametro denominato ERSeq, rappresentante la media pesata rispetto al danneggiamento dei valori istantanei dell'ERS durante la vita a fatica della giunzione [3]. La sequenza di valutazione dell'ERSeq è riportata in Fig. 2, dove è evidente la trattazione dell'intera struttura *multi-spot* come un insieme unico dove il punto maggiormente sollecitato può variare a causa del danneggiamento progressivo.

Seguendo l'ipotesi di Palmgren-Miner, viene seguita un'evoluzione lineare del danneggiamento imposto ai punti di saldatura. Nonostante questo però, l'effetto sul calcolo a fatica della struttura risulta non lineare, divenendo necessaria una procedura di calcolo *step by step*. Questo perché, da una parte, la valutazione della riduzione del modulo di Young del *main link*, a seguito di un predeterminato *step* di danneggiamento, segue una legge ottenuta da

una caratterizzazione sperimentale di un provino di riferimento, e dall'altra, perché dette variazioni comportano una continua redistribuzione dei carichi transitanti sui punti. Infine risulta di grande importanza la definizione del criterio di fine vita della struttura sottoposta al ciclo di carico alternato. L'approccio proposto permette il confronto dei risultati tra differenti strutture, definendo un valore minimo di rigidità complessiva "residua" della struttura soggetta a carichi affaticanti. In relazione all'approccio di calcolo eseguito, emerge che per definire quantitativamente il parametro $ERSeq$, è necessario definire, come dato di input relativo al materiale base, semplicemente l'esponente della curva S-N di quest'ultimo. Lo strumento proposto può essere quindi di grande utilità anche nell'ottimizzazione della resistenza di una struttura, semplicemente variando la distribuzione dei punti di saldatura in modo tale che l'evoluzione dei valori dell' $ERSeq$ sia il più possibile uniforme, così da evitare che si raggiunga precocemente e localmente il valore limite di rottura.

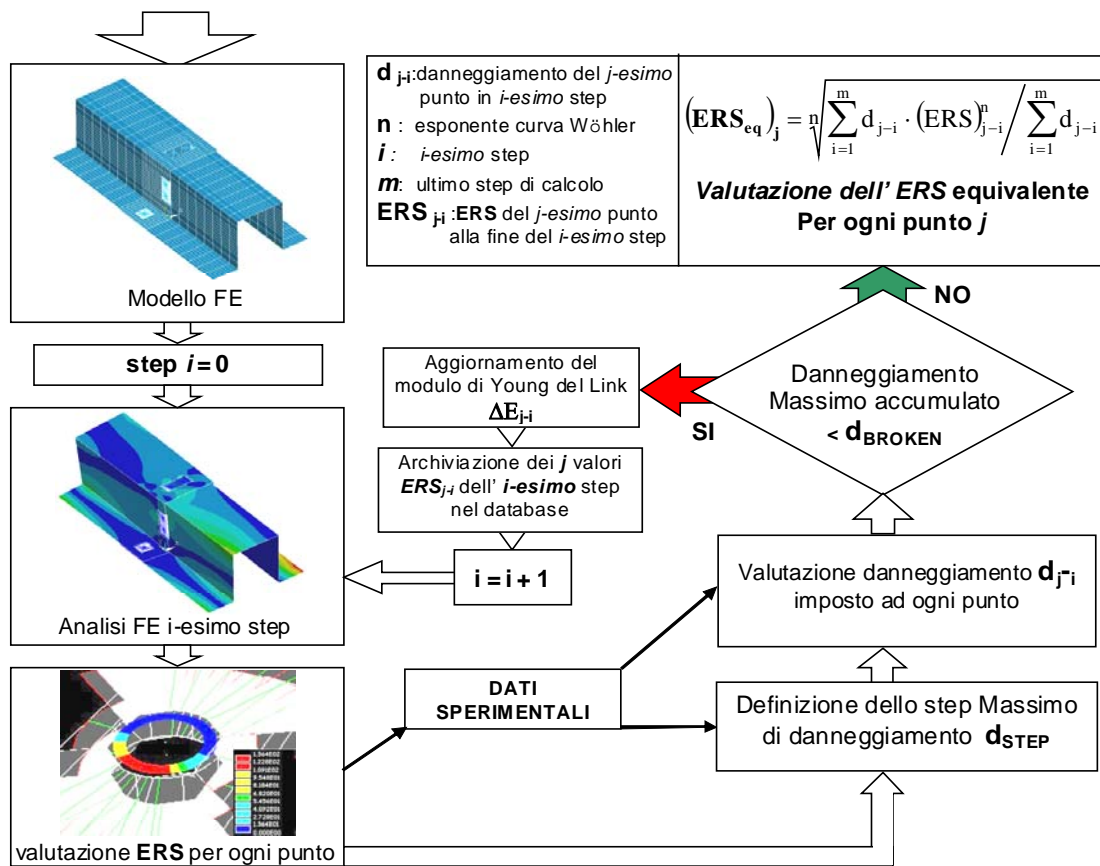


Figura 2: Procedura di valutazione dell' $ERSeq$.

È infine da evidenziare che lo strumento di simulazione "elemento punto di saldatura", per le sue vantaggiose caratteristiche in termini di accuratezza nella simulazione della rigidità locale della giunzione saldata, di tutti i carichi su di essa transitanti nonché in termini di bassa onerosità computazionale, può divenire di utile ausilio anche nell'estensione di ulteriori criteri di previsione della durata a fatica di giunzioni saldate presenti in letteratura, che risultano di difficile applicazione soprattutto quando si debbano studiare a fatica reali strutture multi-punto.

3. CURVE ERS-N

L'aspetto più importante che si vuole sottolineare in questo lavoro è l'indipendenza delle curve ERS-N dalle caratteristiche geometriche della struttura. A tal fine sono stati analizzati i dati sperimentali presentati in [11], onde valutare i valori dell'ERSeq per ciascuna prova e riportarli in un unico diagramma ERS-N. Tutti i dettagli relativi ai suddetti dati sperimentali sono riportati in appendice.

I provini analizzati sono di 5 tipologie differenti (Fig. 3) e presentano le caratteristiche geometriche riportate in Tab. 1. La lunghezza libera riportata è da riferirsi alla distanza tra gli afferraggi della macchina di trazione.

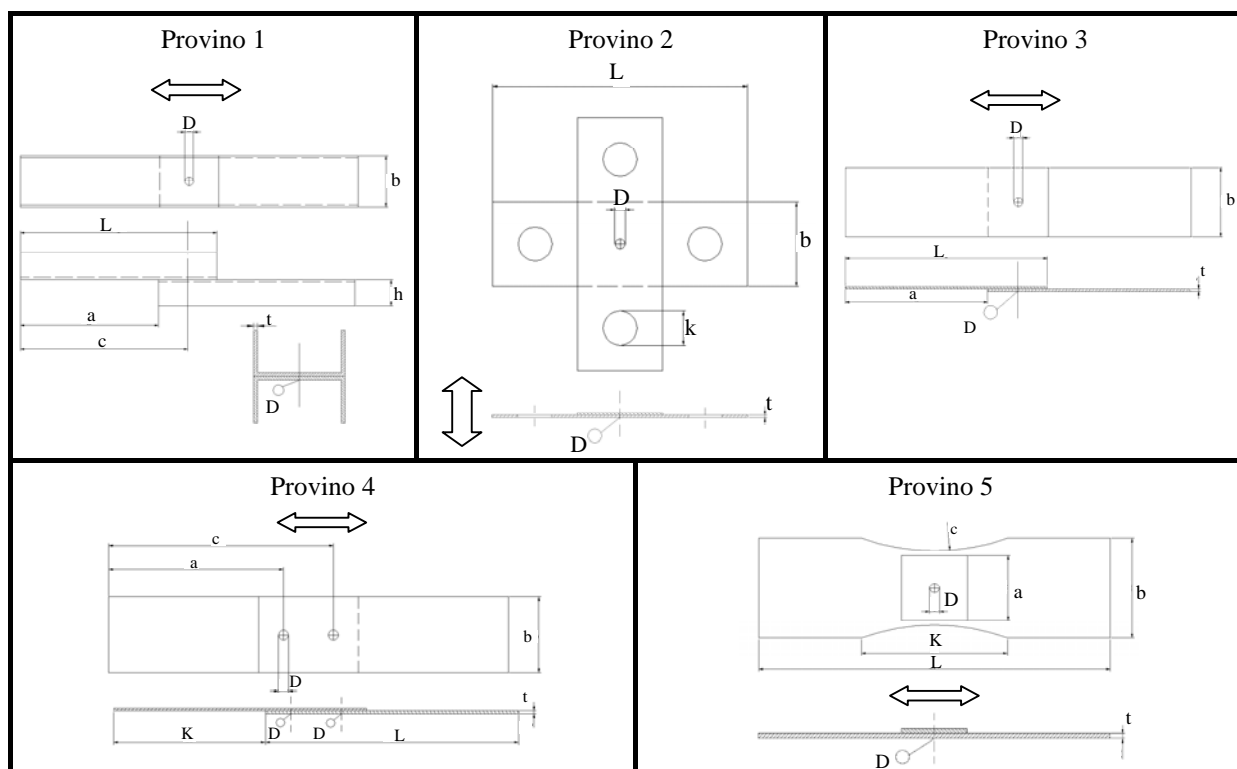


Figura 3: Tipologie di provini utilizzati e direzione di applicazione del carico.

Per la prima tipologia si tratta di un provino *tensile shear* con ali laterali, le quali conferiscono al provino medesimo una maggiore rigidezza, soprattutto in relazione alla flessione. Quest'ultimo tipo di sollecitazione infatti influenza notevolmente lo stato tensionale in prossimità della giunzione saldata rispetto al classico provino *tensile shear* a semplice sovrapposizione, rendendo inoltre difficile la caratterizzazione del solo effetto membranale. Il secondo tipo di provino, denominato *cross specimen*, garantisce la minimizzazione degli effetti legati alle modalità di afferraggio. Le tipologie 3 e 4 sono classici provini *tensile shear* con uno e due punti di saldatura rispettivamente. Infine la tipologia 5 è di particolare interesse poiché i punti di saldatura sono sollecitati esclusivamente nel piano, non essendo presenti carichi trasmessi tra le due lamiere.

Tabella 1: Grandezze geometriche dei provini utilizzati (in mm).

Tipologia	P1				P2		P3		P4	P5
	s15	s30	s40	s15+30	s15	s40	s15	s40	s15	s15
t	1.05	3	4	1.5 + 3	1.05	4	1.05	4	1.05	1.05
D	6	8	9	8	6	9	6	9	6	6
a	95	95	95	95	--	--	95	95	105	40
b	35	48	56	48	50	50	46	60	46	62
c	115	115	115	115	--	--	115	115	135	128
h	18	25	30	25	--	--	--	--	--	--
K	--	--	--	--	20	20	--	--	90	89
L	135	135	135	135	150	150	135	135	150	214
Lungh. libera	100	100	100	100	56	56	100	100	100	100
Numero provini	24	22	121	21	24	42	20	20	15	10

Come prima indagine sono stati elaborati i dati forniti per i provini di tipo 1, ovvero i *tensile shear* rinforzati. In questo caso, come nelle prove relative ai provini di tipo 3, 4 e 5, la prova è stata interrotta al raggiungimento del 25% di perdita di rigidità complessiva. Nel caso di provini di tipologia 2, il limite è stato fissato al 30%. Di seguito sono riportate le curve ERS_{eq}-N per detti provini: quella di Fig. 4 si riferisce ad acciaio AISI304, mentre quella di Fig. 5 è inerente ad un acciaio SAF2304. In dette figure le lettere A e B individuano diverse partite di materiale, mentre l'ultima serie si riferisce a prove con ciclo R=0.67, eseguito secondo quanto disposto dalla norma UNI 7670. Il ciclo di carico di tutte le altre prove è caratterizzato da R=0.05; nelle stesse curve vengono riportati i dati relativi a provini con spessori differenti.

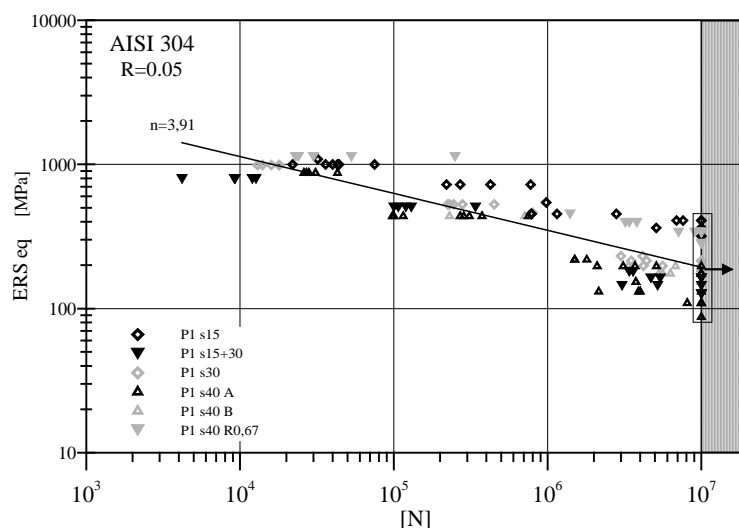


Figura 4: Curva ERS_{eq}-N per provini di tipo 1, in AISI304.

Come si può notare, i valori dell'ERS_{eq} si distribuiscono intorno ad una curva di regressione con pendenza compresa tra 3 e 4, in analogia a quanto evidenziato già in [10]. Tale risultato

dimostra come siano comparabili i risultati in termini di resistenza a fatica di strutture con parametri geometrici differenti. In questo caso, oltre ad avere diversi spessori delle lamiere, si hanno differenti dimensioni del punto di saldatura, le quali, come è noto, risultano strettamente legate ai valori dello spessore della lamiera giuntata.

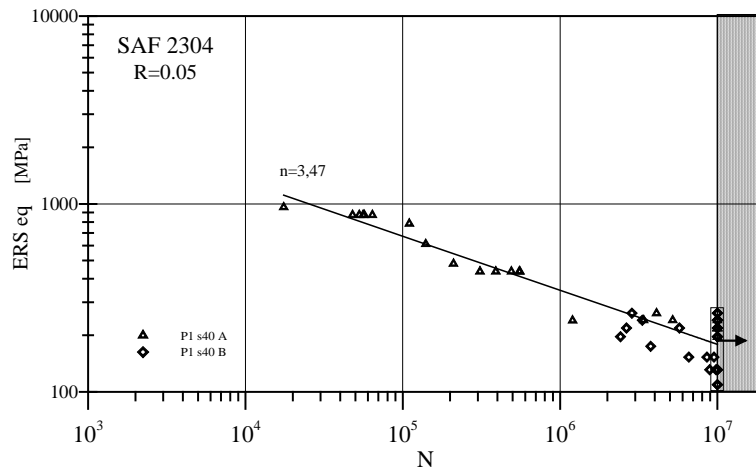


Figura 5: Curva ERS-N per provini di tipo 1, in SAF2304.

Si delinea quindi la validità della metodologia, che risulta essere generale e che oltrepassa uno dei limiti che si evincono dagli approcci presenti in letteratura, spesso validi solamente per determinate configurazioni geometriche. La pendenza della curva di regressione attorno a cui si distribuiscono i dati varia invece in base al materiale utilizzato, come si desume dal confronto delle Figg. 4 e 5.

Nel caso dei provini di tipologia 2, i dati risultano ancor più concentrati intorno alla curva di regressione (Figg. 6 e 7). Anche in questo caso, nello stesso grafico vengono riportati i risultati relativi a provini con spessori differenti; quanto detto per la precedente tipologia di provini trova qui piena conferma.

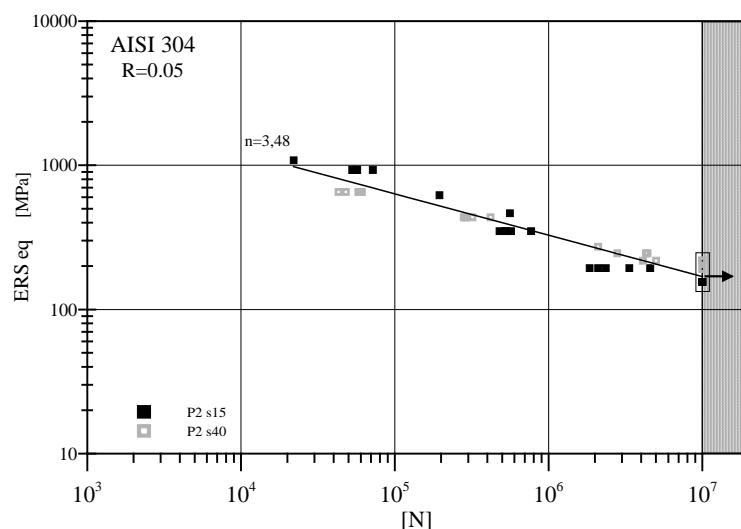


Figura 6: Curva ERS-N per provini di tipo 2, in AISI304.

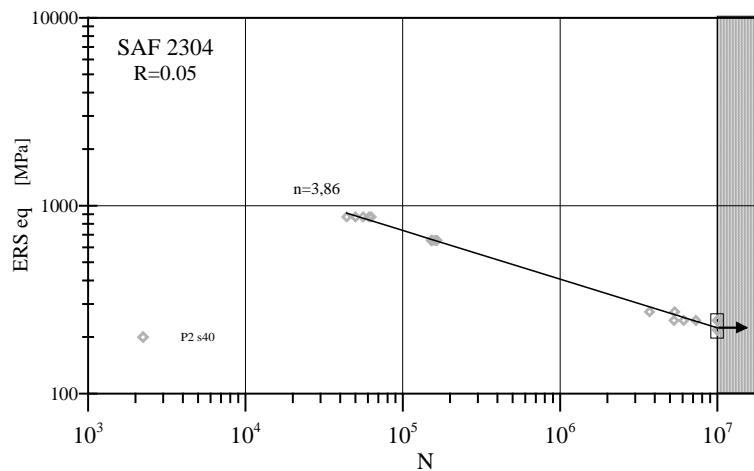


Figura 7: Curva ERS-N per provini di tipo 1, in SAF2304.

Nonostante il fatto che le differenze tra le due tipologie di provino siano notevoli, si riscontra che, a parità di materiale, i valori di pendenza delle due curve a parità di materiale, sono molto simili e comunque compresi nel *range* di variabilità sopracitato. Questo aspetto conferma ancor più la generalità della procedura, che permette il confronto della resistenza a fatica di strutture non solo geometricamente dissimili, ma anche sollecitate in maniera completamente differente.

La medesima procedura sopra descritta è stata poi utilizzata con i dati riguardanti le tipologie di provini 3, 4 e 5. Purtroppo i dati disponibili sono relativi ad un solo materiale per tipologia, per cui risulta difficile trarre da essi ulteriori conferme sulla generalità del criterio. I provini di tipologia 3 sono realizzati in acciaio AISI 304, mentre i provini di tipologia 4 e 5 sono realizzati con lo stesso acciaio, ma sottoposto a rinvenimento e tempra e, quindi, designato con la sigla AISI 304 SA. Per le curve di Fig. 8 e di Fig. 9 valgono le stesse osservazioni svolte in precedenza, è però da precisare che, nel caso dei provini di tipo 4 (Fig. 9), una pendenza così accentuata della curva di regressione è da imputare al fatto che le prove effettuate non ricoprono un *range* di valori di carico e, quindi, di durata a fatica sufficientemente ampio.

Per lo stesso motivo, i dati riguardanti il provino 5 riportati in Fig. 10 non costituiscono una base sufficiente per definire una curva di regressione; mancano infatti del tutto i necessari dati relativi a prove con carichi elevati (rottura a basso numero di cicli) e con carichi bassi (provini “sopravvissuti”).

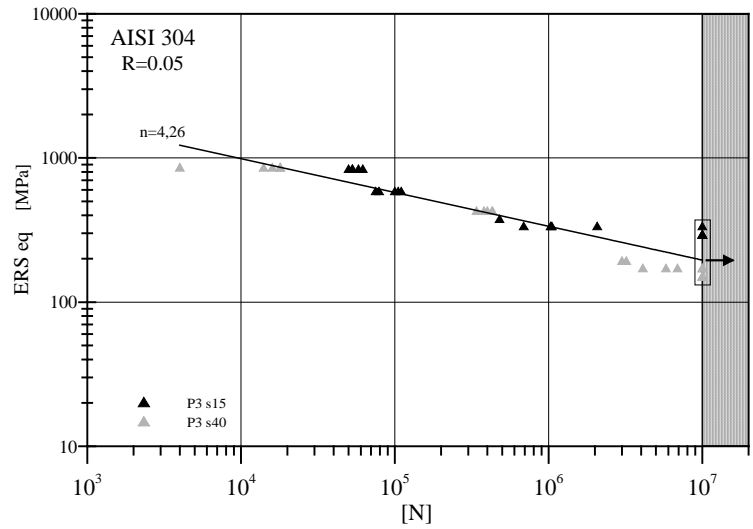


Figura 8: Curva ERS-N per provini di tipo 3, in AISI304.

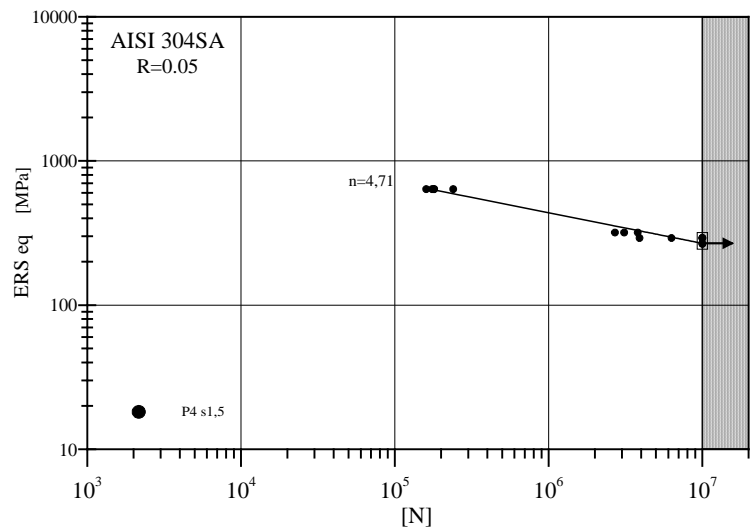


Figura 9: Curva ERS-N per provini di tipo 4, in AISI304SA.

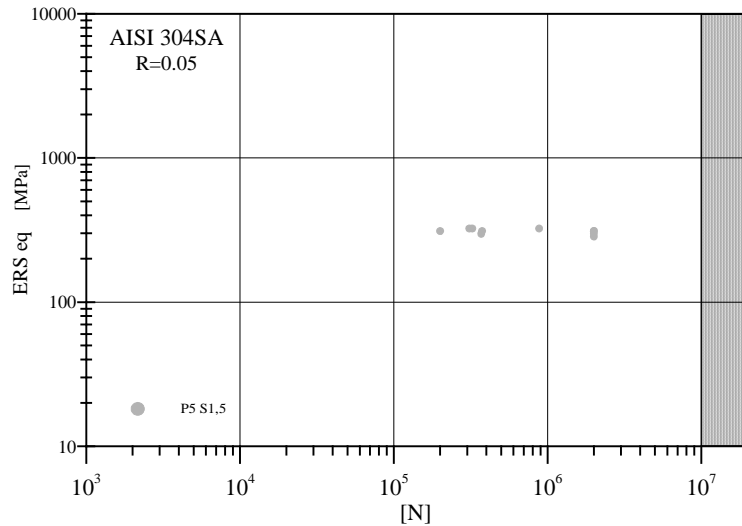


Figura 10: Curva ERS-N per provini di tipo 5, in AISI304SA.

A conferma di quanto detto a proposito della validità dello strumento come termine generale di confronto per la predizione della durata a fatica di qualsiasi giunzione saldata a punti, vengono raggruppati i dati relativi al medesimo materiale. In questo modo emerge come i dati riportati siano condensati intorno ad unica curva di regressione (Figg. 11, 12 e 13).

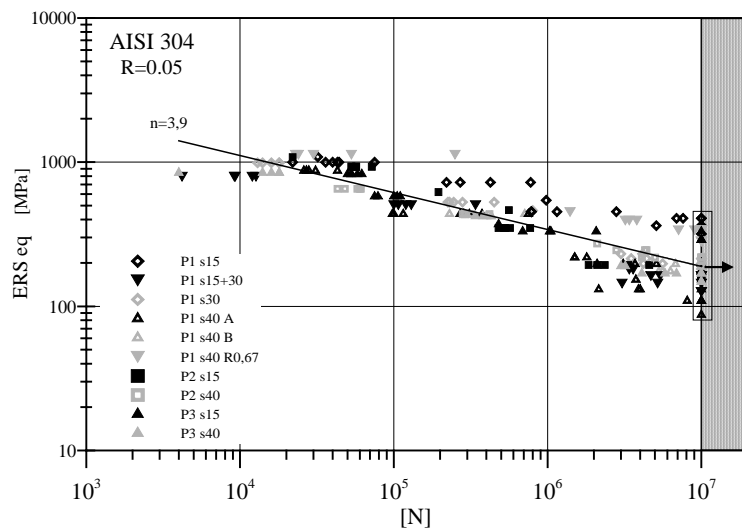


Figura 11: Curva ERS-N per provini di tipo 1-2-3, in AISI304.

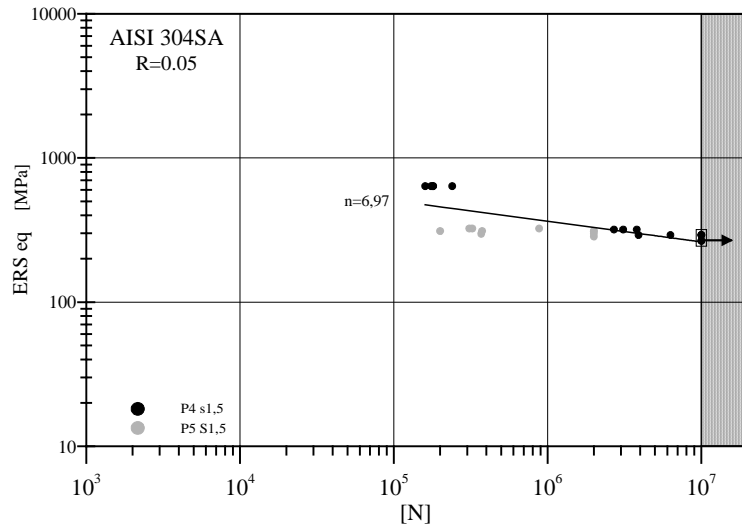


Figura 12: Curva ERS-N per provini di tipo 4-5, in AISI304SA

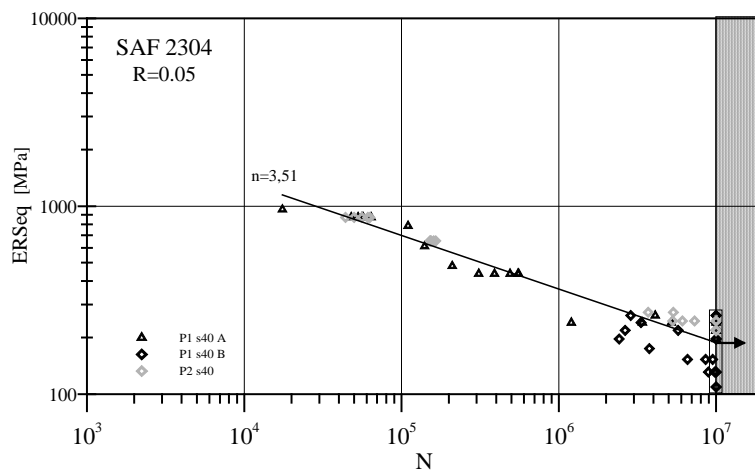


Figura 13: Curva ERS-N per provini di tipo 1-2, in SAF2304.

Come prevedibile, nel caso di provini realizzati in AISI 304 SA non risulta possibile definire un andamento significativo dei dati disponibili, attesa la ristretta gamma di carichi ad essi relativa. È questo un limite cui si potrà ovviare con campagne sistematiche di ulteriori prove, anche perché soprattutto i provini di tipo 5 rivestono grande interesse, attesa la modalità di sollecitazione particolarmente difficoltosa da analizzare attraverso le procedure presenti in letteratura.

Nel caso invece dei due materiali maggiormente utilizzati, le serie di dati sono condensate intorno a curve di regressione aventi un valore della pendenza riconducibile a quella propria del materiale base.

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro una metodologia per la valutazione della durata a fatica di complesse strutture saldate a punti viene applicata ad una serie di dati sperimentali reperiti in letteratura. Il criterio si basa sulla valutazione di un parametro tensionale, denominato Equivalent Radial Stress, e permette di ridurre sensibilmente la dispersione di dati relativi a strutture di geometria tra loro differenti e soggette a diverse tipologie di carico.

I vantaggi del procedimento di simulazione strutturale della giunzione saldata sono notevoli sia in termini di accuratezza dei risultati, sia in termini di adattabilità del metodo a *mesh* di strutture anche complesse, con un ridottissimo apporto di gradi di libertà.

L'applicazione della metodologia proposta a dati relativi a provini di origine estremamente differente fornisce il presupposto per l'estensione del criterio di previsione a complessi giunti multipunto di reale applicazione ingegneristica.

Bibliografia

- [1] Rupp A, Grubisic V, Radaj D. (1990) Betriebsfestigkeit von punktschweissverbindungen. Sonderdruck aus Materialprüfung;32(6):1–6.
- [2] Radaj D, Soegiharto S. (1990) Structural stress concentration at spotwelded joints: improved model, comparison of results, stress singularity. Weld World ;28(9–10):183–9.
- [3] Salvini P, Scardecchia E, Vivio F. (1997) Fatigue life prediction on complex spot welded joints. SEA 1997 Trans J Mater Manuf;106:967–75.
- [4] Salvini P, Vivio F, Vullo V. (2000) A spot weld finite element for structural modelling. Int J Fatigue ;22(8):645–56.
- [5] Vivio F, Ferrari G, Salvini P, Vullo V. (2002) Enforcing of analytical solution of spot welds into finite element analysis for fatigue-life estimation. Int J Comput Appl Technol;15(4/5):218–29.
- [6] Palmonella M, Friswell MI, Mottershead JE, Lees AW. (2005) Finite element models of spot welds In structural dynamics: review and updating. Comput Struct;83(879):648–61.
- [7] Vivio, F., Fanelli P. (2009), A new analytical model for the elastic–plastic behaviour of spot welded joints subjected to orthogonal load. International Journal of Solids and Structures, 46 (3-4), 572-586
- [8] Vivio, F., (2009), A new theoretical approach for structural modelling of riveted and spot welded multi-spot structures.. Submitted to International Journal of Solids and Structures.
- [9] Salvini P, Vivio F, Vullo V. (2006) Application of a general criterion for fatigue evaluation of spot welded structures. In: Fatigue 2006: proceedings of the ninth international fatigue congress.
- [10] Salvini P, Vivio F, Vullo V. (2009) Fatigue life evaluation for multi-spot welded structures. International Journal of Fatigue; 31:122-129
- [11] Linder J., Melander A., Larsson M., Bergengren Y., (1998) Fatigue Data and Design Methods for Spot Welded Austenitic and Duplex Stainless Sheet Steels, Proceedings of “Stainless Steels in Transport Industry”, Espoo (Finland).

APPENDICE – Dati Sperimentali

Tipologia 1 AISI304 spessore 1,5 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
5100000	1,9	0,05
10000000	1,6625	0,05
10000000	1,9	0,05
10000000	2,1375	0,05
2800000	2,375	0,05
6900000	2,1375	0,05
10000000	1,9	0,05
10000000	2,1375	0,05
785000	2,375	0,05
7600000	2,1375	0,05
785000	2,375	0,05
1150000	2,375	0,05
980000	2,85	0,05
775000	3,8	0,05
425000	3,8	0,05
270000	3,8	0,05
220000	3,8	0,05
75000	5,225	0,05
44000	5,225	0,05
43000	5,225	0,05
40000	5,225	0,05
36000	5,225	0,05
22000	5,225	0,05
32000	5,7	0,05

Tipologia 1 AISI304 spessore 3 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
5600000	2,85	0,05
10000000	2,6125	0,05
10000000	2,85	0,05
10000000	3,0875	0,05
3000000	3,325	0,05
4400000	3,0875	0,05
10000000	2,85	0,05
10000000	3,0875	0,05
4150000	3,325	0,05
3500000	3,0875	0,05
4200000	2,85	0,05
800000	6,65	0,05
450000	7,6	0,05
280000	7,6	0,05
245000	7,6	0,05
230000	7,6	0,05
225000	7,6	0,05
18000	14,25	0,05
18000	14,25	0,05
16000	14,25	0,05
14000	14,25	0,05
13000	14,25	0,05

Tipologia 1 AISI304A spessore 4 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
5100000	4,275	0,05
10000000	3,8	0,05
10000000	4,275	0,05
1500000	4,75	0,05
3700000	4,275	0,05
10000000	3,8	0,05
2100000	4,275	0,05
10000000	3,8	0,05
3100000	4,275	0,05
1800000	4,75	0,05
1500000	4,75	0,05
750000	9,5	0,05
375000	9,5	0,05
310000	9,5	0,05
285000	9,5	0,05
270000	9,5	0,05
43000	19	0,05
31000	19	0,05
28000	19	0,05
27000	19	0,05
26000	19	0,05
10000000	2,85	0,05
3750000	3,325	0,05
3900000	2,85	0,05
10000000	2,375	0,05
2150000	2,85	0,05
10000000	2,375	0,05
4000000	2,85	0,05
8100000	2,375	0,05
10000000	1,9	0,05
10000000	2,375	0,05
115000	9,5	0,05
98000	9,5	0,05
100000	9,5	0,05

Tipologia 1 AISI304B spessore 4 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
5300000	3,8	0,05
10000000	3,325	0,05
6300000	3,8	0,05
10000000	3,325	0,05
5600000	3,8	0,05
10000000	3,325	0,05
10000000	3,8	0,05
3350000	4,275	0,05
10000000	3,8	0,05
6800000	4,275	0,05
230000	9,5	0,05
710000	9,5	0,05

Tipologia 1 AISI304 R=0,67 sp. 4 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
10000000	2,376	0,67
10000000	2,8446	0,67
3400000	3,3264	0,67
10000000	2,8446	0,67
3200000	3,3264	0,67
7100000	2,8446	0,67
10000000	2,376	0,67
9050000	2,8446	0,67
10000000	2,376	0,67
10000000	2,8446	0,67
3800000	3,3264	0,67
10000000	2,8446	0,67
1400000	3,8016	0,67
250000	9,504	0,67
30000	9,504	0,67
24000	9,504	0,67
53000	9,504	0,67
23000	9,504	0,67

Tipologia 1 AISI304 sp. 1,5+3 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
10000000	2,1375	0,05
3400000	2,375	0,05
10000000	2,1375	0,05
3600000	2,375	0,05
4700000	2,1375	0,05
3050000	1,9	0,05
10000000	1,6625	0,05
5200000	1,9	0,05
10000000	1,6625	0,05
10000000	1,9	0,05
5400000	2,1375	0,05
340000	6,65	0,05
130000	6,65	0,05
100000	6,65	0,05
120000	6,65	0,05
107000	6,65	0,05
12700	10,45	0,05
4200	10,45	0,05
9300	10,45	0,05
12000	10,45	0,05
9200	10,45	0,05

Tipologia 1 SAF2304A spessore 4 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
10000000	4,275	0,05
10000000	4,75	0,05
10000000	4,75	0,05
10000000	4,75	0,05
10000000	4,75	0,05
10000000	5,225	0,05
5200000	5,225	0,05
3400000	5,225	0,05
1200000	5,22	0,05
4100000	5,7	0,05
555000	9,5	0,05
550000	9,5	0,05
490000	9,5	0,05
390000	9,5	0,05
310000	9,5	0,05
210000	10,45	0,05
140000	13,3	0,05
110000	17,1	0,05
64000	19	0,05
57000	19	0,05
56000	19	0,05
53000	19	0,05
48000	19	0,05
17500	20,9	0,05

Tipologia 1 SAF2304B spessore 4 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
5740000	4,75	0,05
2420000	4,275	0,05
3770000	3,8	0,05
6570000	3,325	0,05
9800000	2,85	0,05
10000000	2,375	0,05
10000000	2,85	0,05
8570000	3,325	0,05
10000000	2,85	0,05
9500000	3,325	0,05
8940000	2,85	0,05
10000000	2,375	0,05
2640000	4,75	0,05
10000000	4,275	0,05
10000000	4,75	0,05
10000000	4,275	0,05
10000000	4,75	0,05
10000000	5,225	0,05
3330000	5,225	0,05
10000000	5,7	0,05
10000000	5,225	0,05
2860000	5,7	0,05
10000000	5,225	0,05
10000000	5,7	0,05

Tipologia 1 SAF2304B spessore 4 mm
Preesposto 1200-2000h in 3% NaCl

N rottura	ΔP (KN)	R=P_{min}/P_{max}
14000000	2,38	0,05
7000000	2,85	0,05
14000000	2,38	0,05
14000000	2,85	0,05
6200000	3,32	0,05
7700000	2,85	0,05
14000000	2,38	0,05
9900000	2,85	0,05
14000000	2,38	0,05

Tipologia 2 AISI304 spessore 1,5 mm

N rottura	ΔP (KN)	R=P_{min}/P_{max}
10000000	0,19	0,05
4580000	0,2375	0,05
10000000	0,19	0,05
2100000	0,2375	0,05
10000000	0,19	0,05
1850000	0,2375	0,05
10000000	0,19	0,05
2350000	0,2375	0,05
10000000	0,19	0,05
3350000	0,2375	0,05
10000000	0,19	0,05
520000	0,4275	0,05
770000	0,4275	0,05
530000	0,4275	0,05
570000	0,4275	0,05
480000	0,4275	0,05
560000	0,57	0,05
195000	0,76	0,05
22000	1,33	0,05
72000	1,14	0,05
57000	1,14	0,05
53000	1,14	0,05
57000	1,14	0,05
53000	1,14	0,05

Tipologia 2 AISI304 spessore 4 mm

N rottura	ΔP (KN)	R=P_{min}/P_{max}
10000000	1,6625	0,05
10000000	1,6625	0,05
10000000	1,9	0,05
10000000	1,9	0,05
10000000	1,9	0,05
10000000	1,9	0,05
5000000	1,9	0,05
4100000	1,9	0,05
4400000	2,1375	0,05
4300000	2,1375	0,05
2800000	2,1375	0,05
2100000	2,375	0,05
420000	3,8	0,05
320000	3,8	0,05
290000	3,8	0,05
290000	3,8	0,05
280000	3,8	0,05
61000	5,7	0,05
60000	5,7	0,05
58000	5,7	0,05
48000	5,7	0,05
43000	5,7	0,05

Tipologia 2 SAF2304 spessore 4 mm

N rottura	ΔP (KN)	R=P_{min}/P_{max}
5300000	2,1375	0,05
10000000	1,9	0,05
10000000	2,1375	0,05
5350000	2,375	0,05
10000000	2,1375	0,05
3700000	2,375	0,05
7300000	2,1375	0,05
10000000	1,9	0,05
6100000	2,1375	0,05
10000000	1,9	0,05
165000	5,7	0,05
160000	5,7	0,05
152000	5,7	0,05
152000	5,7	0,05
154000	5,7	0,05
63000	7,6	0,05
61000	7,6	0,05
50000	7,6	0,05
56000	7,6	0,05
44000	7,6	0,05

Tipologia 3 AISI304 spessore 1,5 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
1050000	1,9	0,05
10000000	1,6625	0,05
10000000	1,9	0,05
480000	2,1375	0,05
2070000	1,9	0,05
10000000	1,6625	0,05
690000	1,9	0,05
10000000	1,6625	0,05
1030000	1,9	0,05
10000000	1,6625	0,05
100000	3,325	0,05
79000	3,325	0,05
75000	3,325	0,05
105000	3,325	0,05
110000	3,325	0,05
53000	4,75	0,05
50000	4,75	0,05
58000	4,75	0,05
62000	4,75	0,05
53000	4,75	0,05

Tipologia 3 AISI304 spessore 4 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
3000000	4,275	0,05
3200000	4,275	0,05
4100000	3,8	0,05
5800000	3,8	0,05
6900000	3,8	0,05
10000000	3,8	0,05
10000000	3,8	0,05
10000000	3,325	0,05
10000000	3,325	0,05
10000000	3,325	0,05
430000	9,5	0,05
380000	9,5	0,05
340000	9,5	0,05
430000	9,5	0,05
400000	9,5	0,05
18000	19	0,05
4000	19	0,05
14000	19	0,05
16000	19	0,05
18000	19	0,05

Tipologia 4 AISI304SA spessore 1,5 mm		
N rottura	ΔP (KN)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
3900000	2,61	0,05
10000000	2,38	0,05
10000000	2,61	0,05
3800000	2,85	0,05
10000000	2,61	0,05
2700000	2,85	0,05
6300000	2,61	0,05
10000000	2,38	0,05
10000000	2,61	0,05
3100000	2,85	0,05
160000	5,7	0,05
175000	5,7	0,05
180000	5,7	0,05
180000	5,7	0,05
240000	5,7	0,05

Tipologia 5 AISI304SA spessore 1,5 mm		
N rottura	$\Delta \sigma$ (MPa)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
2000000	347	0,05
324000	361	0,05
375000	347	0,05
370000	332	0,05
2000000	318	0,05
2000000	332	0,05
2000000	347	0,05
310000	361	0,05
200000	347	0,05
880000	361	0,05

Lamiera AISI304SA spessore 1,5 mm		
N rottura	$\Delta \sigma$ (MPa)	$R=P_{\min}/P_{\max}$
10000000	280	0,05
320000	288	0,05
10000000	280	0,05
10000000	288	0,05
120000	294	0,05
110000	288	0,05
10000000	280	0,05
10000000	288	0,05
340000	294	0,05
10000000	288	0,05