

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale***  
***RESISTENZA A FATICA DI GIUNZIONI SALDATE PER***  
***FRICTION STIR WELDING***

Tutor universitario: Prof. Alberto Campagnolo

Laureando: *Francesco Mantovan*

Padova, 16/09/2022

1217846

- ⚙️ Caratteristiche del processo di saldatura
- ⚙️ Zone di saldatura
- ⚙️ Materiali lavorati con FSW
- ⚙️ Campi di applicazione
  - 🚢 Industria navale
  - 🚂 Industria ferroviaria
  - 🚀 Industria aerospaziale
  - 💻 Computer

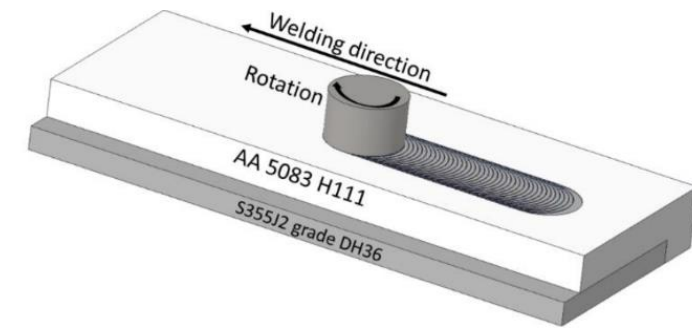


Figura 1: Illustrazione schematica del processo FSW realizzato sui giunti in sovrapposizione



Figura 2: Rappresentazione schematica delle zone che si formano in un processo FSW: (a) weld nugget, (b) TMAZ sull'AS, (c) TMAZ sul RS, (d) HAZ sull'AS, (e) HAZ sul RS e (f) materiale di base



Figura 3: La Super Liner Ogasawara, costruita nel 2005, è la più grande imbarcazione realizzata con saldatura ad attrito (FSW).

- ① Definizione dell'influenza delle variabili di processo sulla resistenza a fatica
- ② Analisi delle curve a fatica e delle superfici a frattura ottenute sperimentalmente per provini saldati con tecnologia FSW
- ③ Confronto con curve a fatica definite dalle normative
- ④ Confronto con le curve a fatica ottenute con saldatura TIG

- ✎ Geometria dell'utensile
  - ➔ Spalla
  - ➔ Perno
- ➡ Effetto del foro di uscita
- 💡 Parametri di processo
  - ➔ Velocità di rotazione
  - ➔ Velocità di avanzamento
  - ➔ Tempo di permanenza dell'utensile
- ⚙️ Tensioni residue
- 🔥 Trattamenti termici

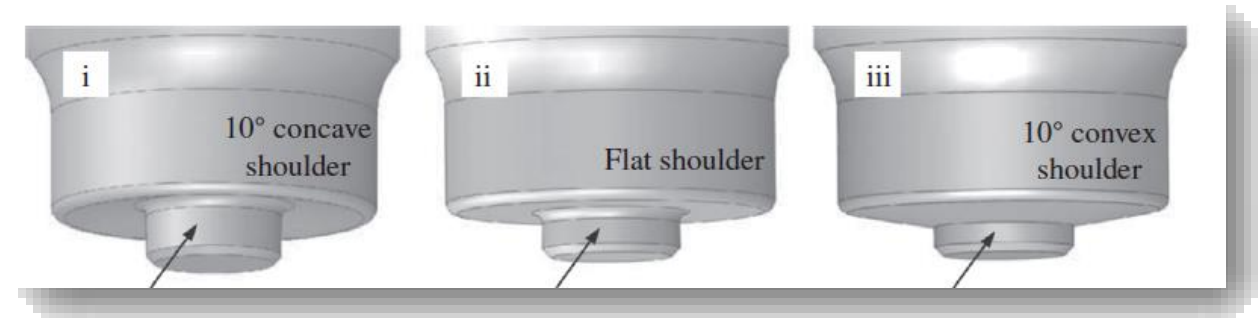


Figura 4: Possibili configurazioni della spalla dell'utensile

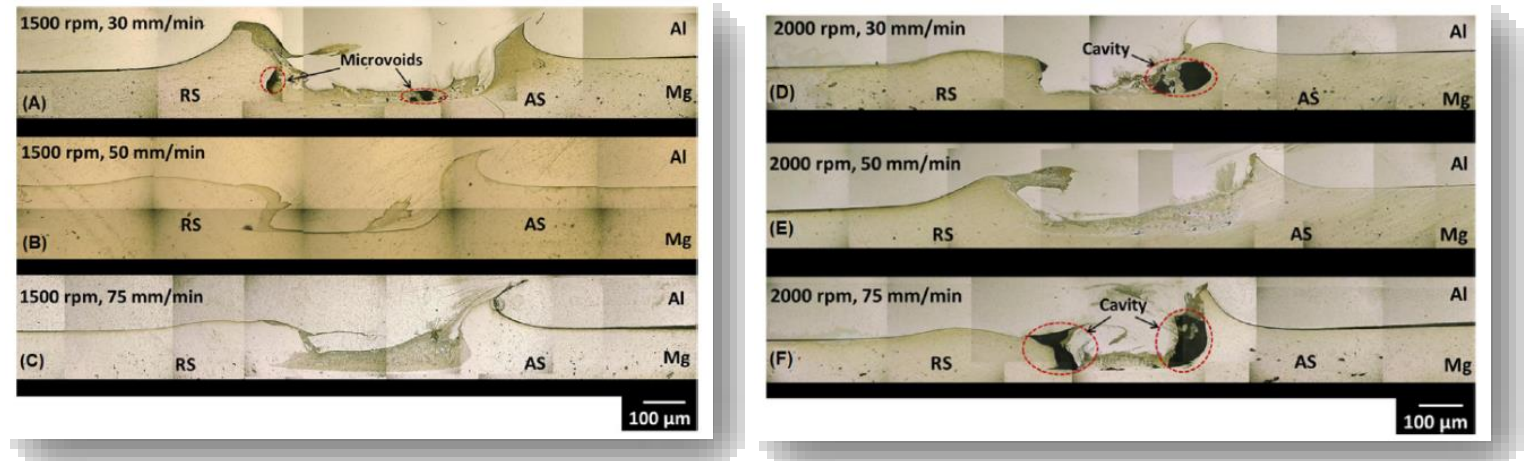


Figura 5: Sezione trasversale di saldatura FSW di lega di alluminio 6022 con Magnesio AM60 sotto diverse condizioni di velocità di rotazione e traslazione

Sono state realizzate prove a fatica a flessione alternata con rapporto di carico  $R=-1$ .

Element wt%	SI	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Ti	Al
AA5086-H3	0.06	0.28	0.07	3.72	0.1	-	0.06	0.01	Rem

Tabella 1: Composizione chimica della lega in alluminio

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Linear speed (mm/min)	50	75	90	50	75	90	50	75	90
Rotation sped (RPM)	680	680	680	920	920	920	1500	1500	1500

Tabella 2: Parametri di processo adottati per la saldatura FSW

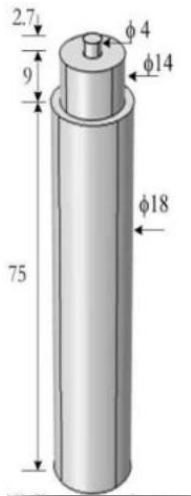


Figura 5: Utensile quotato utilizzato per le saldature FSW

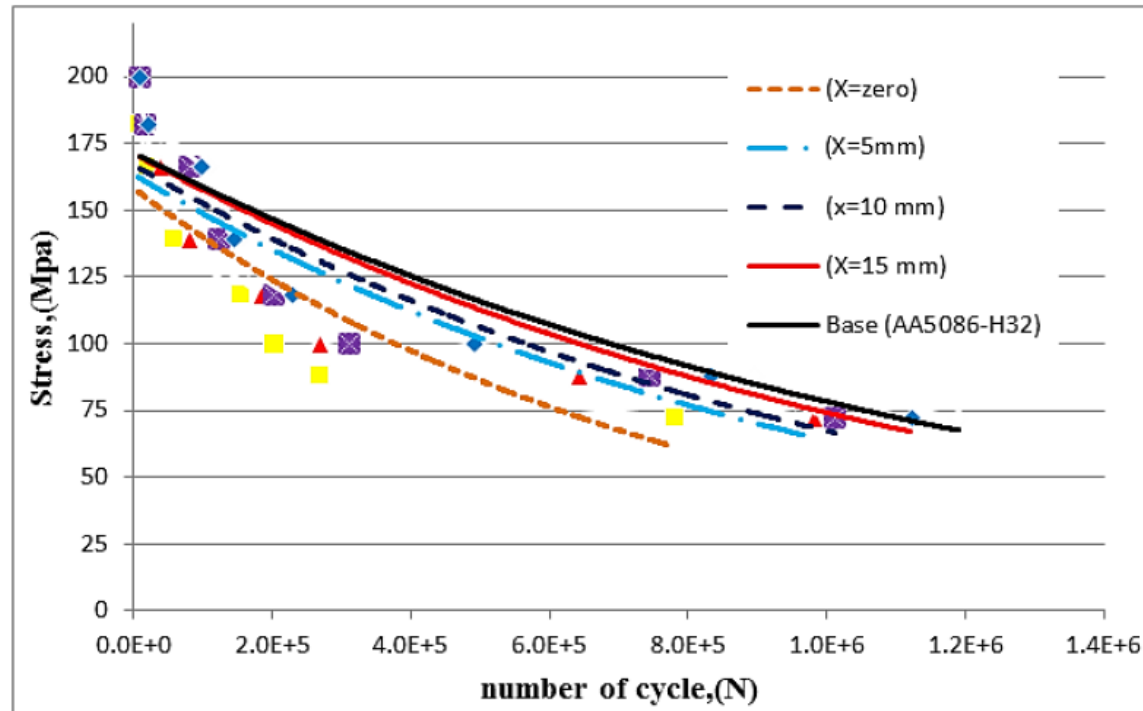


Figura 6: Curve a fatica tensione - numero di cicli a rottura ottenute alle varie distanze ( $x = 0, 5, 10, 15$  mm) dalla linea di saldatura e la curva a fatica del materiale di base AA5086-H32.

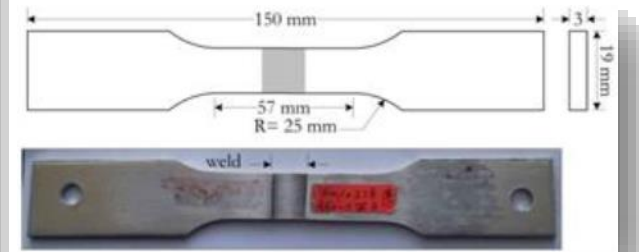
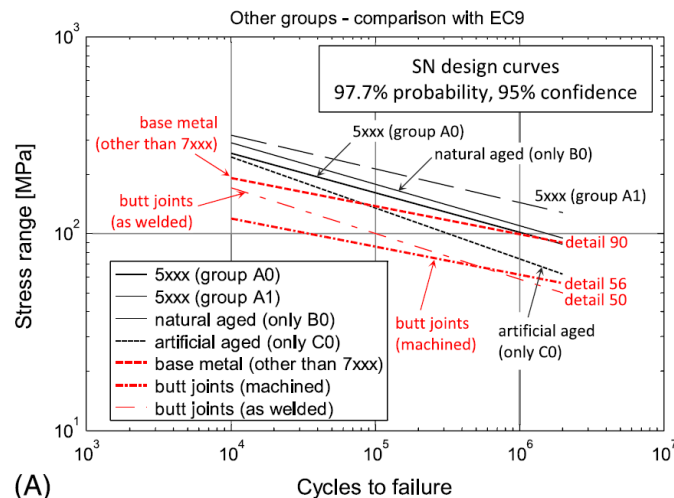
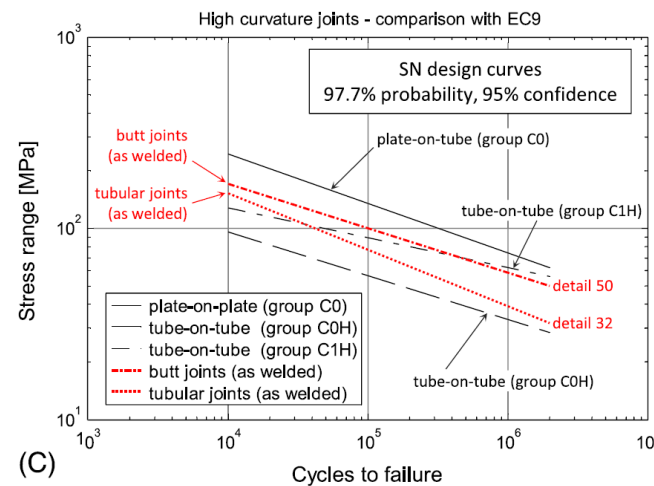


Figura 7: Geometria dei provini testati

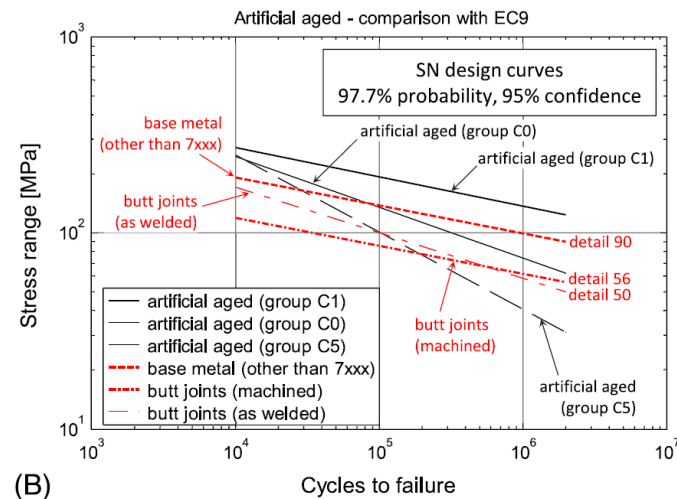




(A)

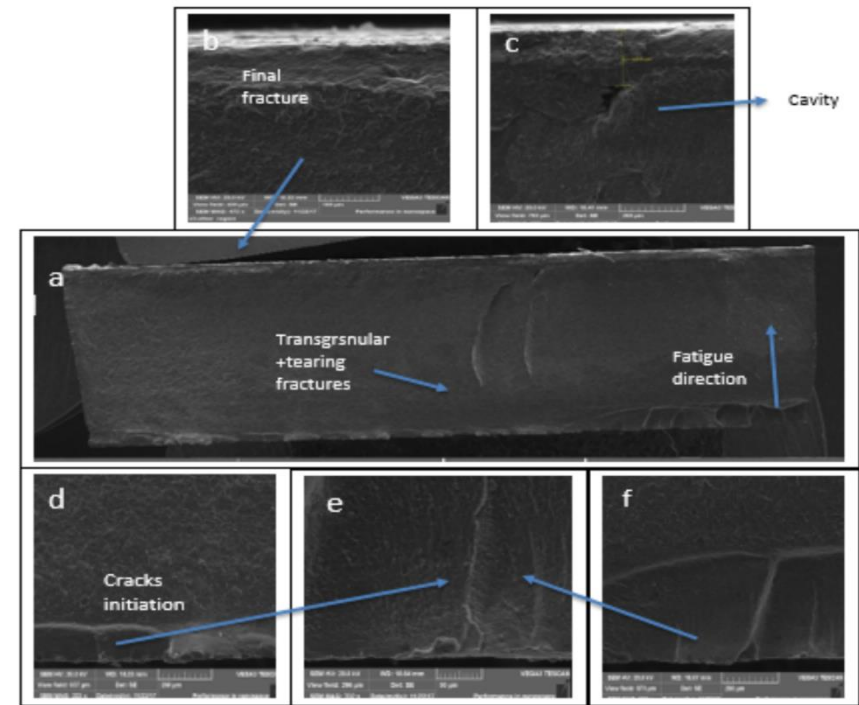


(C)



(B)

*Figura 8: Confronto tra le curve a fatica ottenute con probabilità di sopravvivenza del 97,7% e le curve a fatica stabilite dall'Eurocodice 9*



*Figura 9: Superficie di frattura del provino in AA5083-H111 soggetto a carico a fatica 140 MPa e numero di cicli a rottura 100'000.*

Fonte: E. Maggiolini, D. Benasciutti, L. Susmel, D. G. Hattingh, M. N. James, and R. Tovo, "Friction stir welds in aluminium: Design S-N curves from statistical analysis of literature data," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 41, no. 11, pp. 2212–2230, Nov. 2018

W. Hussein and M. A. Al-Shammari, "Fatigue and Fracture Behaviours of FSW and FSP Joints of AA5083-H111 Aluminium Alloy," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Dec. 2018, vol. 454, no. 1.

Sono state realizzate prove a fatica a carico assiale con rapporto di carico  $R=0,1$ .

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb
SMA490AW	0.12	0.20	1.14	0.012	0.002	0.32	0.10	0.48	0.02
SPA-H	0.08	0.43	0.38	0.094	0.003	0.31	0.18	0.67	

Tabella 3: Composizione degli acciai SMA490AW e SPA-H (% massa).

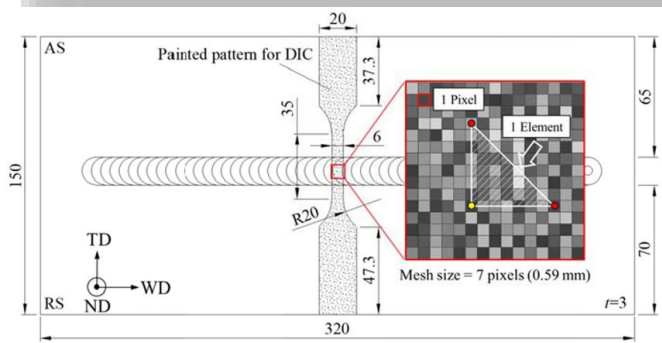
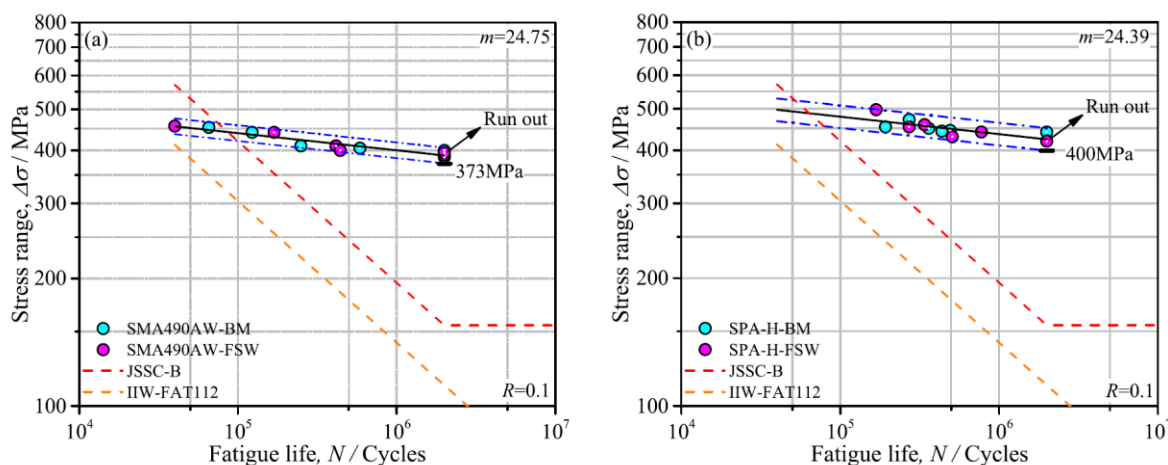


Figura 11: Geometrie del provino testato

Fonte: Y. Wang, S. Isutsumi, I. Kawakubo, and H. Fujii, "Fatigue performance of friction stir welded weathering mild steels joined below A1 temperature," International Journal of Fatigue, vol. 156, Mar. 2022

Figura 10: Curve a fatica tensione - numero di cicli a rottura ottenute per i giunti saldati in SMA490AW e SPA-H. Sono riportate con tratto-punto blu le curve con probabilità di sopravvivenza del 97,7% e 2,3% e tratteggiate le curve per questo tipo di giunti definite dall'International Institute of Welding (IIW) e dalla Japan Society of Steel Construction

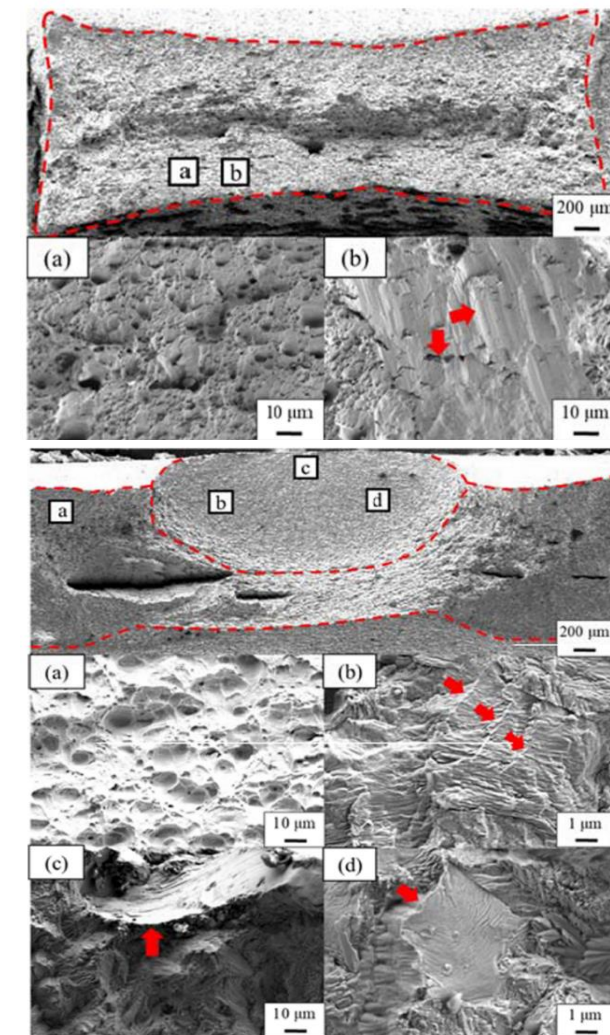


Figura 12: Superfici di frattura ottenute al termine delle prove a fatica

AA 5083 H111												
Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn						
4.0 ÷ 4.9	0.40	0.40	0.10	0.40-1.0	0.05-0.25	0.25						
S355J2 grade DH36												
C max	Si max	S max	Al	Mn	Cr max	Ni max	P max	Ti max	Cu max	Mo max	Nb	V
0.18	0.50	0.035	0.015	0.9-1.60	0.20	0.40	0.035	0.02	0.35	0.08	0.03	0.08

Tabella 4: Composizioni chimiche della lega di alluminio AA5083-H111 e acciaio S355J2-DH36 presi in esame (% massa)

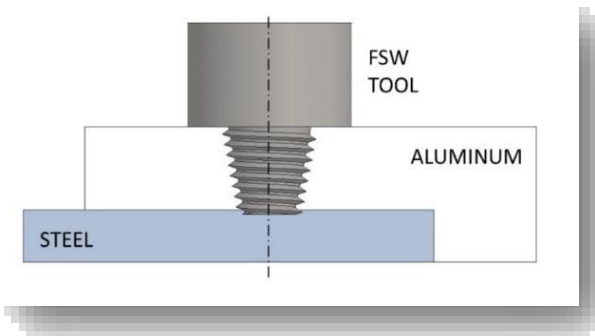


Figura 13: Illustrazione schematica del processo FSW realizzato sui giunti in sovrapposizione

Tabella 5: Risultati ottenuti dalle prove a fatica realizzate su 11 campioni. Sono riportati i numeri di cicli a rottura, i rapporti di sollecitazione, i range di sollecitazione e la zona dove si è verificata la frattura

Samples	$\sigma_{max}$ (N)	$\sigma_{min}$ (N)	$\sigma_m$ (N)	$\Delta\sigma/2$ (N)	$\Delta\sigma$ (N)	R	Number of Cycles at Break	Fracture Zone
C	7750	1250	4500	3250	6500	0.16	339,710	TMAZ aluminum
D	7750	1250	4500	3250	6500	0.16	340,085	TMAZ aluminum
E	7750	1250	4500	3250	6500	0.16	330,360	nugget
F	8250	750	4500	3750	7500	0.09	136,590	nugget
G	7000	2000	4500	2500	5000	0.29	9,770,460	TMAZ aluminum
H	7750	1250	4500	3250	6500	0.16	1,451,030	TMAZ aluminum
I	8000	1000	4500	3500	7000	0.13	842,780	TMAZ aluminum
L	8500	500	4500	4000	8000	0.06	337,525	nugget
M	7500	1500	4500	3000	6000	0.20	1,535,770	TMAZ steel
N	7750	1250	4500	3250	6500	0.16	263,130	nugget
O	8250	750	4500	3750	7500	0.09	531,589	nugget

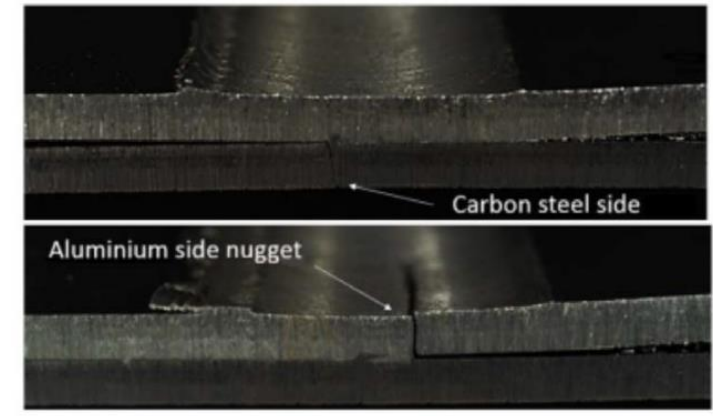


Figura 14: Fratture ottenute durante l'esecuzione delle prove di saldatura

Fonte: M. Mortello, M. Pedemonte, N. Contuzzi, and G. Casalino, "Experimental investigation of material properties in FSW dissimilar aluminum-steel lap joints," Metals (Basel), vol. 11, no. 9, Sep. 2021

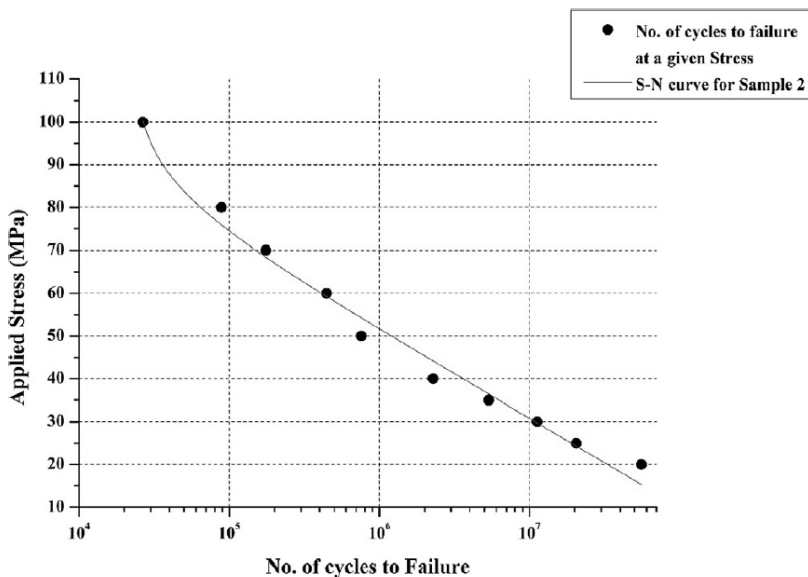


Sono state realizzate prove a fatica a carico assiale con rapporto di carico  $R=-1$  e provini conformi agli standard definiti dall'ASTM E0466.

Chemical Elements	Al %	Cr %	Cu %	Fe %	Mg %	Mn %	Si %	Ti %	Zn %	Residual %
AA5082	94.72	0.11	0.09	0.22	4.27	0.07	0.16	0.04	0.19	0.13
AA7075	89.07	0.23	1.56	0.42	2.61	0.24	0.23	0.17	5.31	0.16

Parameter	FSW		
	Sample 2	Sample 5	Sample 8
Fatigue Life below Endurance Strength (40 MPa)	$2.3 \times 10^6$	$0.5 \times 10^6$	$0.15 \times 10^6$
Fatigue Life at Endurance Strength (60 MPa)	$0.45 \times 10^6$	$0.15 \times 10^6$	$0.11 \times 10^6$
Fatigue Life Above Endurance Strength (80 MPa)	$0.09 \times 10^6$	$0.075 \times 10^6$	$0.05 \times 10^6$
Nature of Fracture	Ductile		

**Tabella 7: Vita a fatica dei giunti realizzati con FSW con ampiezze di carico di 40, 60 e 80 MPa**



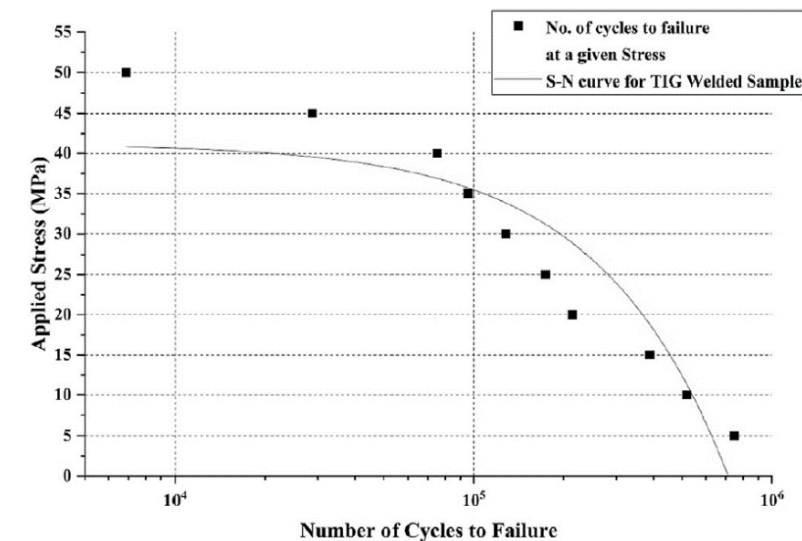
**Figura 15: Curva a fatica del provino realizzato con FSW nelle coordinate tensione - numero di cicli a rottura**

**Figura 16: Curva a fatica del provino realizzato con TIG nelle coordinate tensione - numero di cicli a rottura**

**Tabella 6: Composizione chimica delle leghe in alluminio**

Parameter	TIG
Fatigue Life below Endurance Strength (20 MPa)	$2.1 \times 10^5$
Fatigue Life at Endurance Strength (30 MPa)	$1.2 \times 10^5$
Fatigue Life Above Endurance Strength (40 MPa)	$7.5 \times 10^4$
Nature of Fracture	Brittle

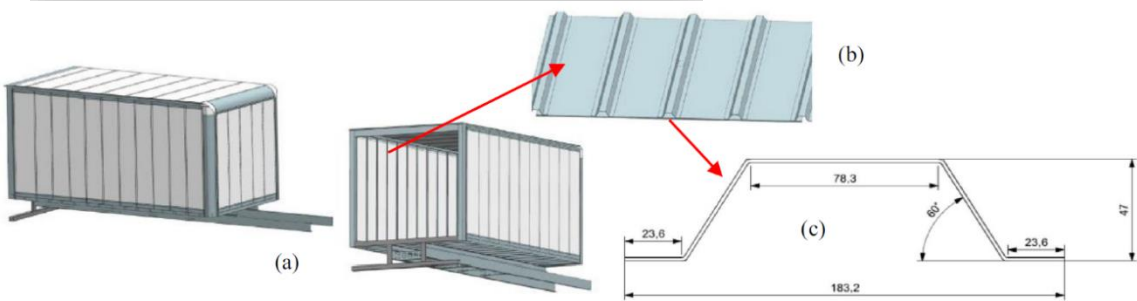
**Tabella 8: Vita a fatica dei giunti realizzati con TIG con ampiezze di carico di 20, 30 e 40 MPa**



Fonte: R. Kumar et al., "A comparative analysis of friction stir and tungsten inert gas dissimilar AA5082-AA7075 butt welds," Materials Science for Energy Technologies, vol. 5, pp. 74–80, Jan. 2022.

Chemical composition (wt%)							
Al	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	UTS (MPa)	
AA-6061-T6	Bal.	0.83	0.07	0.19	0.19	0.55	285

**Tabella 9: Composizione della lega AA6061-T6 presa in esame (% massa)**

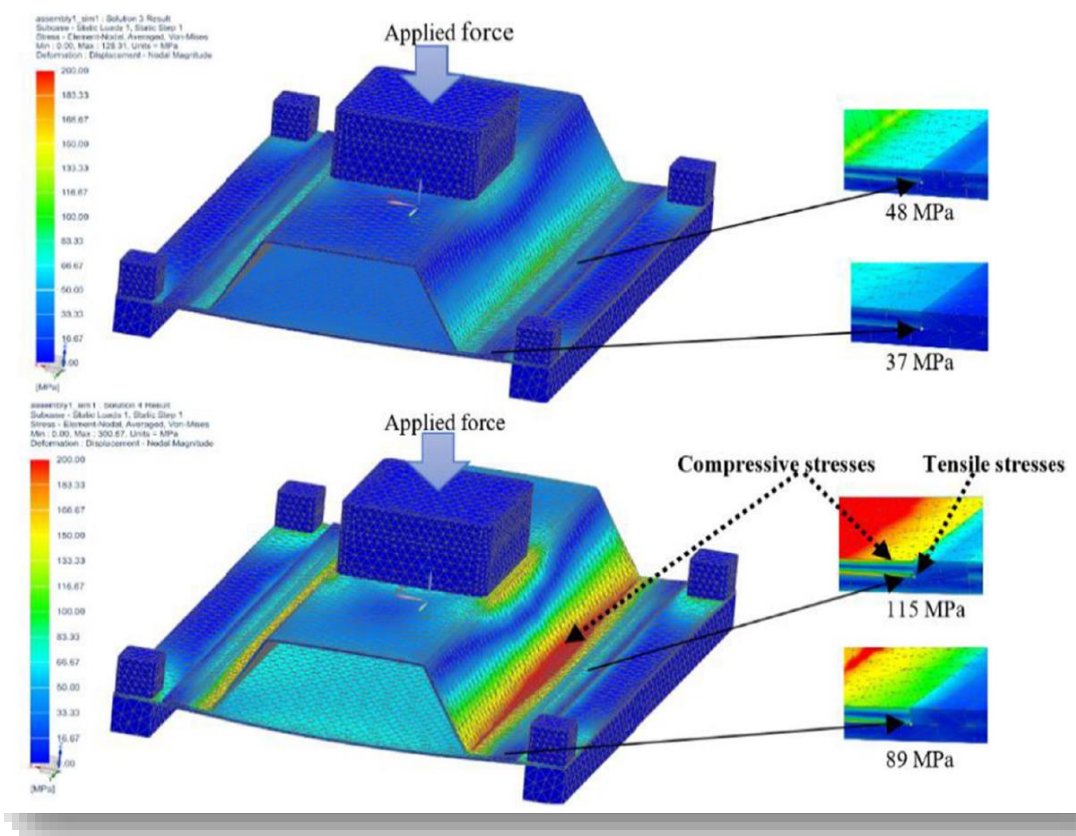


**Figura 17: Illustrazione del cassone del camion, dei pannelli laterali e dell'irrigidimento a forma di delta opportunamente quotato**



**Figura 19: Fotografie relative alla frattura ottenuta al termine della prova a fatica con carico massimo 2880 N**

Fonte: M. Momeni and M. Guillot, "Implementation of right angle friction stir welding (RAFSW) to assemble the side panels of truck box," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 110, no. 1-2, pp. 351-364, Sep. 2020.



**Figura 18: Distribuzione delle sollecitazioni durante le prove di fatica: la prima immagine è relativa al carico di 1200 N che non ha portato a rottura e la seconda al carico di 2880 N che ha portato a rottura dopo 100.000 cicli**

## PRO

- ✓ Formazione di un numero inferiore di difetti con giunti che non necessitano una preparazione
- ✓ Vita massima a fatica in termini di numero di cicli a rottura pari a circa 30 volte quella ottenuta con saldatura TIG
- ✓ FSW mostra una resistenza a fatica migliore di quella imposta dall'Eurocodice 9 in alcuni casi pari a 3 volte valori stabiliti
- ✓ L'energia in gioco è mediamente inferiore del 30-40% rispetto alle saldature convenzionali
- ✓ Costi di saldatura unitari inferiori perché non vi è necessità di materiale d'apporto

## CONTRO

- × Costi di investimento elevati per macchine CNC che arrivano anche a cifre a quattro zeri (20'000-30'000 euro) rispetto a saldatrici TIG del valore di 300/400 euro.
- × Necessità di sperimentazioni precedenti per la definizione dei parametri di processo ottimali per ogni determinata saldatura
- × Limitata varietà di geometrie per lo più lineari