

VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO A FATICA DI NODI DI
PIATTAFORME OFFSHORE REALIZZATI IN ACCIAIO
LAMINATO IN CONTROLLO

O. Vittori, G. Demofonti - CSM Roma

SOMMARIO

Nel presente articolo viene riportato uno studio comparativo, in termini di vita a fatica, tra giunti saldati realizzati in acciaio da TMCP (acciai ottenuti per laminazione in controllo seguita da raffreddamento accelerato) e in acciaio normalizzato Fe 510 EU25, ambedue di grado BS355.

Tale confronto è stato realizzato tramite prove di fatica condotte, in aria ed in acqua di mare sotto protezione catodica (-850 mV), su giunti saldati piastra-piasta (T-butt) e su giunti tubolari saldati in piena scala; gli spessori interessati da tale indagine sono stati pari a 32 e 50 mm.

Per i due ambienti di prova sono state definite le curve S/N (Sollecitazione applicata/Numero di cicli) riferite alla vita a fatica dei giunti esaminati. Dall'analisi dei risultati è emerso che l'acciaio da TMCP mostra un comportamento a fatica paragonabile a quello dell'acciaio normalizzato.

Utilizzando i dati sperimentali a disposizione è stato possibile, inoltre, effettuare un studio sull'effetto della protezione catodica e dello spessore del materiale sulla vita a fatica dei giunti saldati. Infine vengono fatte alcune considerazioni sulla trasferibilità dei risultati ottenuti sui giunti saldati di piccole dimensioni ai nodi in scala reale.

INTRODUZIONE

La messa a punto, a livello industriale, del processo di produzione della laminazione in controllo (Thermal Mechanical Controlled Process) seguita dal raffreddamento accelerato per la realizzazione di lamiere per impieghi strutturali, ha permesso di ottenere acciai aventi elevati valori di tenacità e di resistenza meccanica (tensione di snervamento ≥ 355 MPa) associati ad una buona saldabilità rispetto al tradizionale acciaio normalizzato.

Un possibile impiego di queste lamiere è risultato essere il campo dell'offshore con particolare riferimento alla struttura portante della piattaforma [1].

Affinchè la tendenza ad utilizzare lamiere da TMCP nel campo dell'offshore venga consolidata è necessario fornire risposte

precise ed esaurienti sul comportamento a fatica, in aria ed in ambiente marino, dei giunti saldati. Infatti risulta necessario verificare se i criteri di progettazione a fatica finora utilizzati, basati essenzialmente su esperienze fatte sull'acciaio normalizzato, possono essere adottate anche per le nuove classi di acciai.

Allo scopo è stata effettuata una estesa campagna di prove sperimentali, su nodi in piena scala e su provette T-butt, in aria ed in acqua di mare sotto protezione catodica [2,3].

ATTIVITA' SPERIMENTALE

Selezione dei materiali

Per la realizzazione dei giunti saldati sono stati utilizzati due tipi di acciaio di grado BS 355 ed aventi spessori compresi tra 16 e 50 mm:

- un acciaio normalizzato Fe 510 EU25
- un acciaio TMCP da raffreddamento accelerato prodotto presso lo stabilimento ILVA di Taranto

Nelle tabelle I e II vengono riportate rispettivamente le composizioni chimiche medie e le caratteristiche meccaniche dei due acciai.

Giunti saldati

Nelle figg. 1 e 2 sono riportate rispettivamente le dimensioni geometriche dei nodi in piena scala e delle T-butt.

I giunti saldati sono stati realizzati mediante saldatura in arco manuale, con apporto termico medio di 1.8 kJ/mm. Per ambedue i materiali si sono utilizzati elettrodi basici PH56 a basso contenuto di idrogeno: elettrodi normalmente utilizzati per la realizzazione di strutture offshore in acciaio normalizzato.

Il profilo del cordone di saldatura, sia per le T-butt che per i nodi, è in accordo con le normative standard D1.1 classe 2: angolo di attacco al piede della saldatura 135°; angolo medio della saldatura pari a 45°.

Metodologia di prova

Le prove di fatica sono state effettuate con carico sinusoidale ad ampiezza costante ($R = 0.1$), sia in aria che in acqua di mare sintetica (ASTM D1142-52) sotto protezione catodica (-850 mV), alla temperatura di 10 °C.

La frequenza di lavoro è stata pari a 0.35 Hz per le prove in ambiente ed a 2 Hz per le prove in aria.

L'entità della sollecitazione di prova è stata definita come:

- valore nominale per le T-butt
- valore massimo al piede della saldatura, stimato tramite misure estensimetriche, per i nodi in piena scala

Il numero di cicli di inizio cricca (N1) e di fine prova (N3) sono stati definiti in accordo con le normative emesse dal Gruppo di lavoro Tecnologie Marine della CECA [4].

RISULTATI SPERIMENTALI

Tutti i risultati delle prove di fatica sono elaborati in termini di regressione lineare per la determinazione delle curve di fatica Sollecitazione/Numero di cicli (S/N). Tale elaborazione é in accordo con l'equazione:

$$\text{Log}N = C - m\text{Log}\Delta\sigma$$

dove:

- N é il numero di cicli d'inesco (N1) o rottura (N3)
- $\Delta\sigma$ é la sollecitazione applicata nell'hot-spot
- "C" ed "m" sono i coefficienti della retta di regressione

Nelle figg. da 3 a 8 vengono riportate le rette di regressione calcolate ed i relativi punti sperimentali. In tabella III sono riportati i valori numerici di "C", "m" e della deviazione standard riferiti alle provette T-butt ed in tabella IV quelli riferiti ai nodi in piena scala.

In particolare per le T-butt sono esclusi da tale elaborazione quei risultati "run-out" ($N3 > 10^7$ cicli) ottenuti a livelli di sollecitazione pari a 108 MPa.

Confronto su base statistica dei risultati ottenuti

Il confronto tra le rette di regressione viene fatto tramite analisi statistica utilizzando la teoria dei piccoli campioni; in particolare si é utilizzata la distribuzione "t" di Student impostando "l'ipotesi nulla" [5]:

$$H_0 : \text{Log} N_a = \text{Log} N_b$$

dove N_a e N_b sono rispettivamente la vita a fatica calcolata dalle rette di regressione dell'acciaio normalizzato e dell'acciaio da TMCP.

Da tale analisi si può affermare, con una probabilità del 95%, che i giunti saldati realizzati con i due acciai hanno il medesimo comportamento in termini di vita a fatica; cioè i due materiali sono statisticamente indistinguibili.

Nelle figg. 9 ÷ 12 vengono riportate le curve di fatica S/N3 ed

S/N1 totali, ottenute considerando uguali i due materiali, ed in tabella V i relativi coefficienti C ed m.

Effetto protezione catodica

Le curve di regressione totali S/N3, in aria ed in ambiente per le T-butt e per i nodi in piena scala ed i relativi dati sperimentali, sono utilizzate per produrre i diagrammi di "penalizzazione" (figg. 13 e 14). In tali diagrammi viene riportato il rapporto $N3(PC)/N3(A)$ in funzione della sollecitazione; dove $N3(PC)$ é il dato sperimentale riferito alle prove in ambiente ed $N3(A)$ é la vita in aria calcolata tramite la relativa curva di regressione [6].

Dall'analisi dei due grafici emerge che l'efficacia della protezione catodica non é costante ma può dipendere dal livello della sollecitazione applicato e dalla geometria del giunto. Inoltre tali risultati sono una ulteriore conferma che la protezione catodica non annulla completamente l'effetto dell'acqua di mare, ma lo riduce parzialmente.

Effetto spessore

Utilizzando le curve S/N3, determinate in una precedente attività per lo spessore di 32 mm [2], si é valutato l'effetto dello spessore sulla vita a fatica dei giunti saldati secondo la formula proposta da Gurney [7]:

$$N = N_0 (T_0/T)^{3n} \quad n = 0.25$$

Nel nostro caso si é utilizzato il rapporto tra i due gruppi di dati per poi risalire al valore più appropriato dell'esponente "n"; quindi senza nulla togliere all'aspetto interpretativo del fenomeno si é definito un fattore F (effetto spessore) come:

$$F = N_{32}/N_{50}$$

dove i pedici 32 e 50 indicano i rispettivi spessori.

Nella fig. 15 vengono riportati gli andamenti del fattore "F" in funzione del livello di sollecitazione applicato ed il corrispondente valore teorico del coefficiente "F" (pari a 1.4) ottenibile con la formula di Gurney con $n = 0.25$.

Per quanto riguarda le provette T-butt in aria si nota un andamento del fattore F abbastanza costante in funzione della sollecitazione, però con valori leggermente superiori rispetto a quello teorico. La formula di Gurney descrive bene il fenomeno ma non é conservativa per tutti i livelli di sollecitazione; il valore più appropriato di "n" dovrebbe essere 0.29 che corrisponde ad un valore medio di F pari a 1.47.

Per le provette T-butt in acqua di mare sotto protezione catodica, l'andamento del fattore F dipende fortemente dalla sollecitazione: diminuisce all'aumentare della stessa. La formula di Gurney non descrive in maniera corretta il fenomeno e risulta conservativa solo per bassi valori della sollecitazione. Tutta-

via volendo utilizzare la formula di Gurney il valore di "n", riferito al valore medio di F, dovrebbe essere pari a 0.33. Il fattore F per i nodi in piena scala, in ambiente marino, presenta il medesimo andamento delle rispettive T-butt: decresce all'aumentare della sollecitazione, con la differenza che risulta per quasi tutti i livelli di sollecitazione più basso del valore teorico. La formula di Gurney risulta decisamente conservativa; in questo caso il valore più appropriato di "n" risulta essere 0.13.

Effetto scala

Per ricercare una possibile correlazione tra i dati derivanti da prove di fatica su T-butt ed i relativi nodi in piena scala, è stato definito un parametro "s" (effetto scala):

$$s = N_{3T\text{-butt}} / N_{3\text{nodi}}$$

Nella fig. 16 vengono riportati gli andamenti del parametro "s", per i diversi spessori ed ambiente, in funzione del livello di sollecitazione applicato.

Dal confronto dei grafici si nota che il valore del parametro "effetto scala" dipende dallo spessore, dal tipo di ambiente e dalla sollecitazione applicata. Più in dettaglio per le prove in acqua di mare sotto protezione catodica, all'aumentare dello spessore (da 32 a 50 mm), il fattore "s" si riduce di circa il 20% ed in entrambi i casi risulta poco dipendente dal valore della sollecitazione. Per contro nel caso delle prove in aria, solo per lo spessore di 50 mm, s risulta fortemente dipendente dalla sollecitazione applicata.

Mentre per le prove in acqua di mare si potrebbe definire un valore medio di "s" pari a 0.59 e 0.47, rispettivamente per lo spessore di 32 e 50 mm, nel caso delle prove in aria non è stato possibile definire un valore medio del parametro "s" in quanto lo stesso presentava una notevole variazione in funzione del livello di sollecitazione (da 0.24 per 252 MPa a 0.91 per 108 MPa).

Pertanto al momento non è possibile determinare un valore unico del parametro "s" tale da poter correlare i dati delle provette T-butt con quelli dei nodi, indipendentemente dallo spessore e dall'ambiente di prova.

CONCLUSIONI

- I giunti saldati realizzati in acciaio laminato in controllo seguito da raffreddamento accelerato, mostrano un comportamento del tutto analogo, in termini di vita a fatica, a quello dei giunti realizzati in acciaio normalizzato. Tale comportamento fa presupporre la possibilità che i criteri utilizzati per la progettazione di giunti saldati per impieghi offshore, possano essere uguali per i due tipi di acciaio.
- La protezione catodica (-850 mV) non annulla completamente

l'effetto dell'acqua di mare. Infatti la vita a fatica di un giunto saldato, in acqua di mare sotto protezione catodica, risulta circa la metà di quella di un analogo giunto in aria. Inoltre l'efficacia della protezione catodica sembra dipendere dal tipo di giunto e dalla sollecitazione applicata

- La formulazione di Gurney dell'effetto spessore sulla vita a fatica di giunti saldati rimane valida ma con il valore di "n" pari a 0.3 per le provette T-butt ed a 0.2 per i nodi in piena scala

- L'effetto scala, ossia la trasferibilità dei risultati tra prove sulle T-butt e prove sui nodi al momento non trova una formulazione unica in quanto tale effetto risulta dipendere dallo spessore e dall'ambiente di prova.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Comunità Europea (CECA) per il contributo finanziario dato a sostegno delle attività di ricerca svolte, il MARIPERMAN (Laboratori della Marina Militare - La Spezia) per la collaborazione nell'effettuazione delle prove in piena scala e l'Ing. Luigi Rizzi (ILVA/Ta) per il suo valido contributo nella discussione dei risultati ottenuti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pontremoli M., Lessells J., Rohde W., Devillers L. -"The Present State of Technical Knowledge of Offshore Structural Steels and Future Material Requirements", Rapporto Finale CECA, Convenzione 7210-ZZ/466, 1992
- [2] Cole I., Vittori O., Pietrosanti C. -"Resistenza Sotto Carico a Fatica di Giunti Saldati per Piattaforme Offshore" Rapporto Finale CECA, Convenzione 7210-KG/401, 1990
- [3] Vittori O. -"Analisi del Comportamento a Fatica di Acciaio da TMCP da Raffreddamento Accelerato, in Prove di Laboratorio e in Piena Scala" Rapporto Finale CECA, Convenzione 7210-KD/414, 1993
- [4] De Back J. -"Strength of Tubular Joints", International Conference of Steel in Marine Structures, Paris 1981
- [5] Lingren B., McElrath G. -"Introduction to Probability and Statistics", Macmillan Company NY, 1966
- [6] Cole I., Vittori O. -"Cathodic Protection of Tubular Joints: a Reappraisal of the Evidence", ISOPE91, Edinburgh 1991
- [7] Gurney T. -"The Influence of Thickness on Fatigue Strength of Welded Joints", BOSS79, Bedford UK, 1979

MATERIALE	% C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	Ni	Ti	N	Ceq
Normalizzato Fe 510 EU25	.1	1.3	.3	.007	.009	.025	.002	.38	-	110*	.4
TMCP BS 355	.059	1.6	.23	.003	.01	.022	.024	.31	.029	98*	.35

(*) valori in ppm

Tabella I - Composizione Chimica

MATERIALE	Y.S. (1) (MPa)	UTS (1) (MPa)	CV ₄₀ Superf	J/cm ² ½Spes	R A (%)
Normalizzato Fe 510 EU25	403	540	-	154	64
TMCP BS 355	435	537	355	280	72

(1) Tutto spessore

Tabella II - Caratteristiche Meccaniche

Ambiente	Tipo di Acciaio	N3		Deviaz Standard	R
		C	m		
Aria	TMCP	12.090	-2.916	0.119	0.99
	Normal.	12.996	-3.323	0.142	0.91
Acq.Mare	TMCP	11.525	-2.792	0.157	0.98
	Normal.	13.299	-3.565	0.162	0.99

Tabella III - Parametri C ed m provette T-butt

Ambiente	Tipo di Acciaio	N3		Deviaz Standard	R
		C	m		
Acq.Mare	TMCP	10.879	-2.319	0.147	0.96
	Normal.	11.797	-2.763	0.152	0.97

Tabella IV - Parametri C ed m nodi ad "X"

Tipo di Provino	N1		N3		Deviaz Standard	R
	C	m	C	m		
T-butt Aria	15.581	-4.733	12.515	-3.104	0.126	0.94
T-butt A.Mare	13.545	-3.977	12.343	-3.146	0.139	0.98
Nodi X Aria	13.332	-3.521	11.323	-2.408	0.168	0.99
Nodi X A.Mare	11.970	-2.978	11.207	-2.483	0.138	0.94

Tabella V - Parametri C ed m delle curve S/N totali

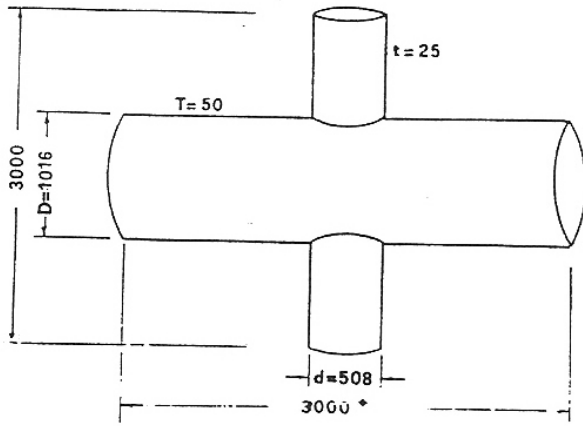


Fig.1 - Dimensioni geometriche dei nodi in piena scala

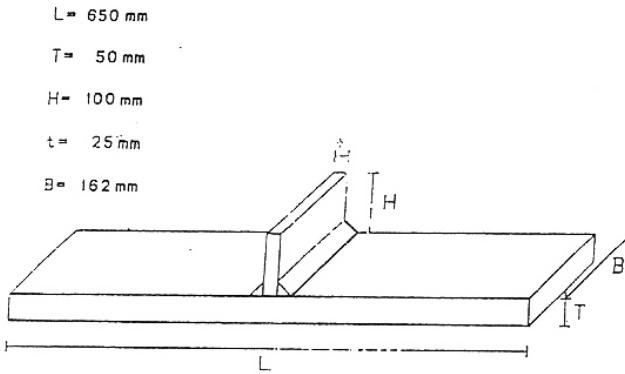


Fig.2 - Dimensioni geometriche delle provette T-butt

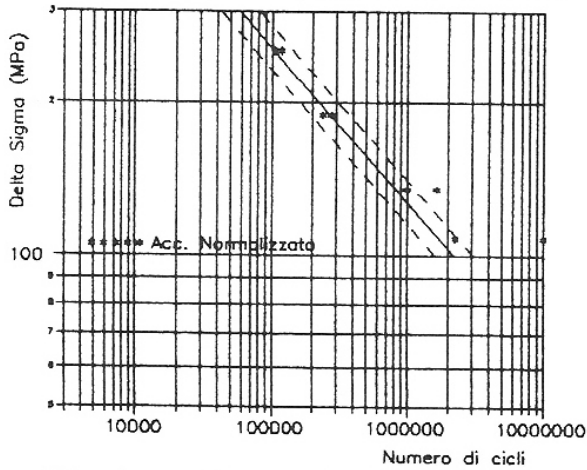


Fig.3 - Curva S/N T-butt Acc. Normalizzato, Aria

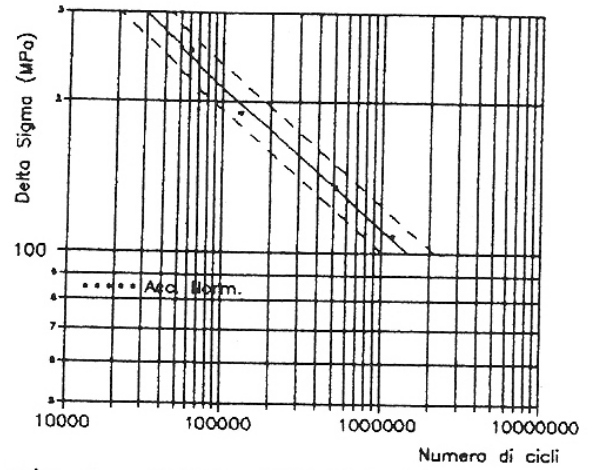


Fig.4 - Curva S/N T-butt Acc. Normalizzato, Acqua

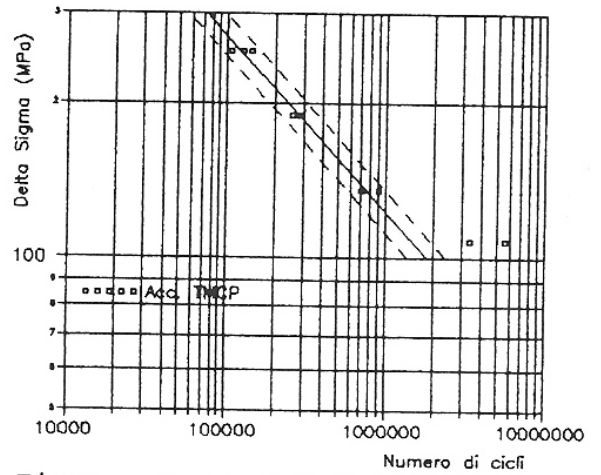


Fig.5 - Curva S/N T-butt Acc. TMCP, Aria

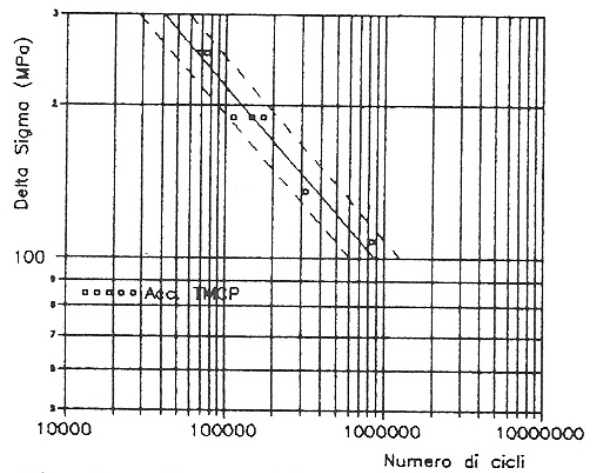


Fig.6 - Curva S/N T-butt Acc. TMCP, Acqua

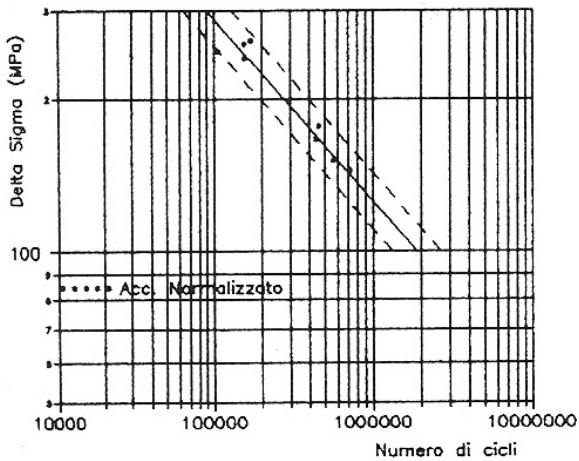


Fig.7 - Curva S/N Nodi Acciaio Normalizzato, Acqua

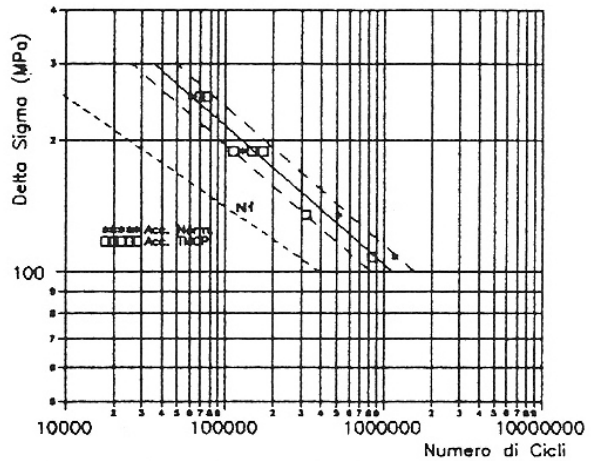


Fig.10 - Curva S/N totale T-butt in Acqua

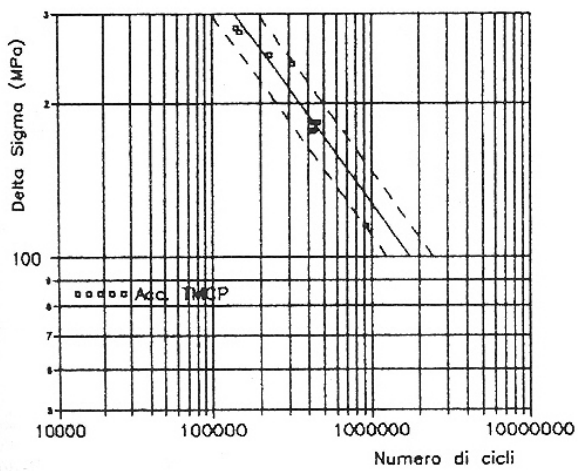


Fig.8 - Curva S/N Nodi Acciaio TMCP, Acqua

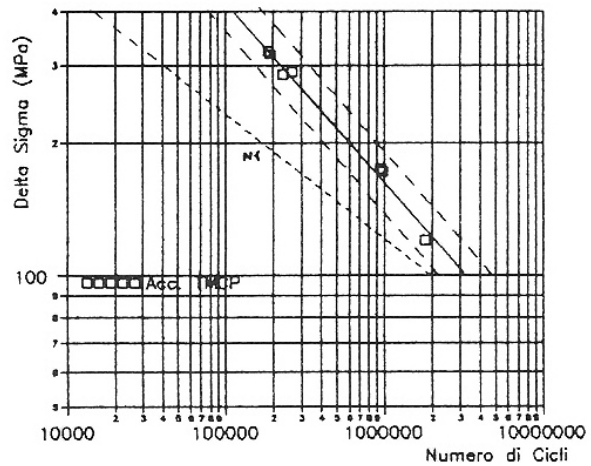


Fig.11 - Curva S/N totale Nodi in Aria

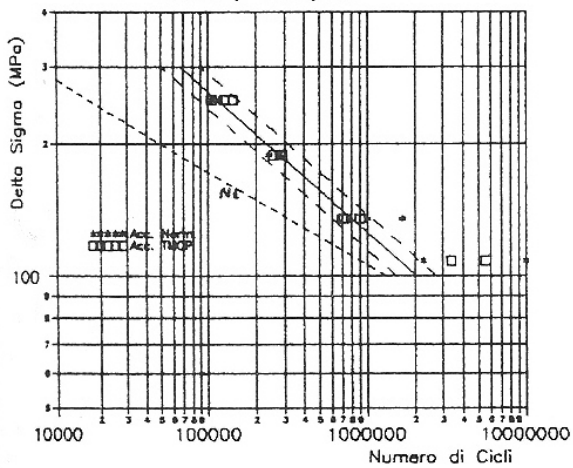


Fig.9 - Curva S/N totale T-butt in Aria

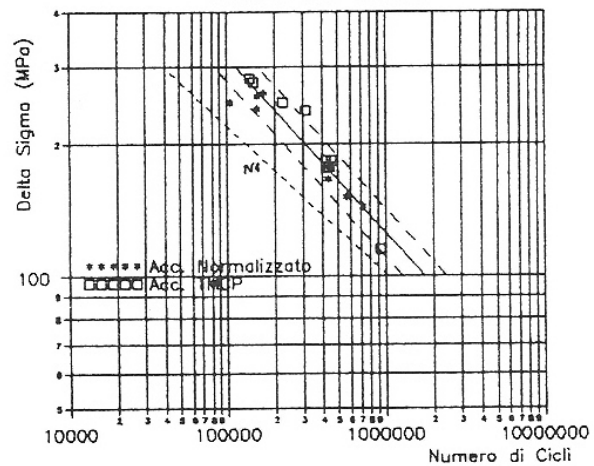


Fig.12 - Curva S/N totale Nodi in Acqua

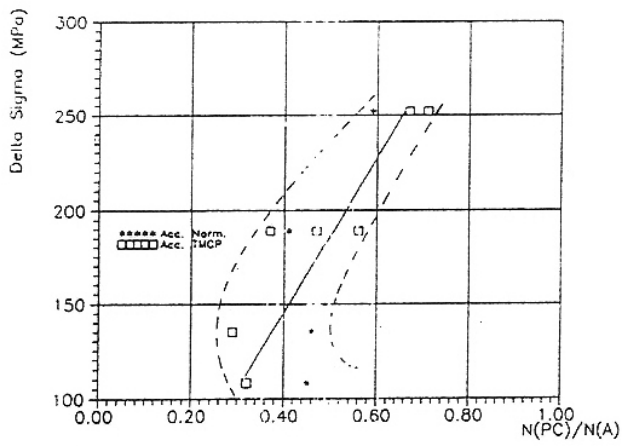


Fig. 13 - T-butt: Rapporto di penalizzazione

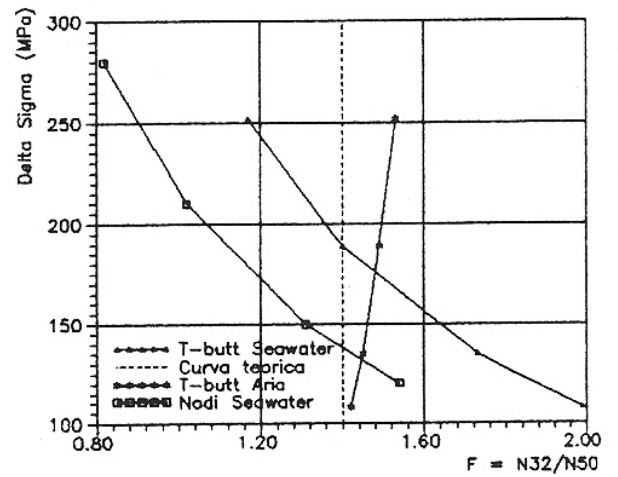


Fig. 15 - Rapporto "F" effetto spessore

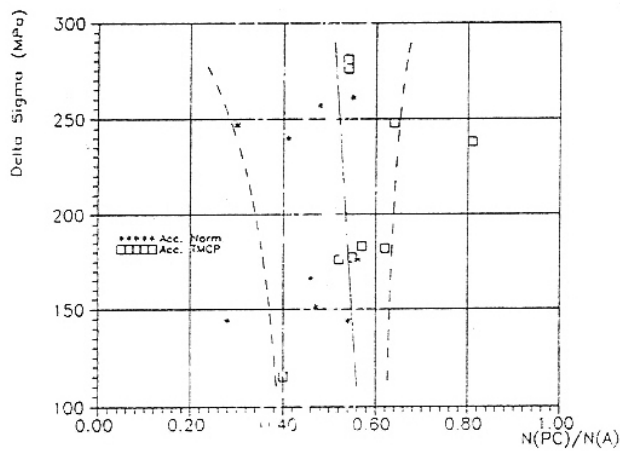


Fig. 14 - Nodi: Rapporto di penalizzazione

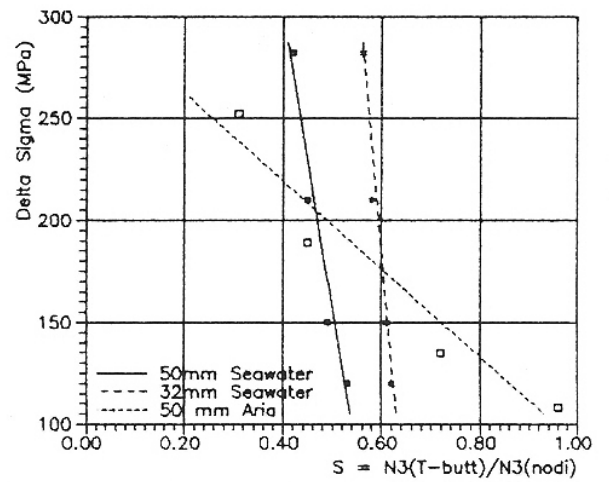


Fig. 16 - Rapporto "S" effetto scala