

COMPORTAMENTO A FRATTURA DI TUBAZIONI IN ACCIAIO AL CARBONIO A TEMPERATURA AMBIENTE E 280 °C

Pietro Paolo Milella,
ANPA- Agenzia Nazionale per la Protezione dell' Ambiente,
Via V. Brancati, Roma

SOMMARIO: La presente memoria illustra alcuni dei risultati ottenuti dall'ENEA/DISP nell'ambito delle ricerche di sicurezza in campo meccanico condotte dal 1979 al 1987 nel quadro del PUN (*Programma Unificato Nucleare*). Le ricerche in questione riguardano, in particolare, il comportamento a frattura delle tubazioni in acciaio al carbonio, tipo A 106 B, sia a temperatura ambiente che a 280 °C, temperatura di funzionamento normale dei reattori ad acqua leggera. La necessità dello studio nasceva dall'esigenza di sicurezza, irrinunciabile in campo nucleare, che in nessuna condizione d'esercizio le tubazioni del circuito primario, contenenti acqua contaminata da radioisotopi di fissione, potessero cedere in maniera catastrofica ed anticipava quella che sarebbe diventata la filosofia del LBB (*Leak Before Break*) che avrebbe privilegiato la logica dei controlli non distruttivi su quella della cosiddetta rottura a ghigliottina dei tubi, ovvero del loro tranciamento netto. Le prove sperimentali, eseguite su oltre 100 tubazioni da 4, 6 ed 8 pollici di diametro e vari spessori, erano condotte su spezzoni di tubo di oltre 2 m di lunghezza sottoponendo la sezione criccata a momento puro mediante flessione su 4 punti.

PAROLE CHIAVE: Net section collapse load, tenacità a frattura J , zona plastica.

INTRODUZIONE

La presente memoria illustra, sinteticamente, alcuni dei risultati ottenuti dall'ENEA/DISP nell'ambito delle ricerche di sicurezza in campo meccanico condotte dal 1979 al 1987 nel quadro del PUN (*Programma Unificato Nucleare*). Le ricerche in questione riguardano, in particolare, il comportamento a frattura delle tubazioni in acciaio al carbonio, tipo A 106 B, sia a temperatura ambiente che a 280 °C, temperatura di funzionamento normale dei reattori ad acqua leggera. La necessità dello studio nasceva dall'esigenza di sicurezza, irrinunciabile in campo nucleare, che in nessuna condizione d'esercizio le tubazioni del circuito primario, contenenti acqua contaminata da radioisotopi di fissione, potessero cedere in maniera catastrofica ed anticipava quella che sarebbe diventata la filosofia del LBB (*Leak Before Break*) che avrebbe privilegiato la logica dei controlli non distruttivi su quella della cosiddetta rottura a ghigliottina dei tubi, ovvero del tranciamento netto, che, introducendo strutture di protezione dei componenti limitrofi dai previsti colpi di frusta delle tubazioni impazzite, ne impediva, di fatto, la corretta e puntigliosa ispezione. Le prove sperimentali, condotte su oltre 100 tubazioni criccate e non da 4", 6" ed 8" di vario spessore, furono eseguite presso i laboratori del CISE di Milano, sotto la conduzione dell'ing. A. Squilloni. Le analisi

teoriche furono svolte presso il CISE e presso l'ENEA/DISP. L'autore della presente memoria era l'ideatore ed il responsabile dell'intero programma. Le prove sperimentali erano condotte su spezzoni di tubo di oltre 2 m di lunghezza sottoponendo la sezione criccata a momento puro mediante flessione su 4 punti operata da una macchina di carico da 1 MN (100 tn) secondo lo schema riportato in figura 1. La presente memoria illustra alcuni dei risultati teorici mai pubblicati in Italia.

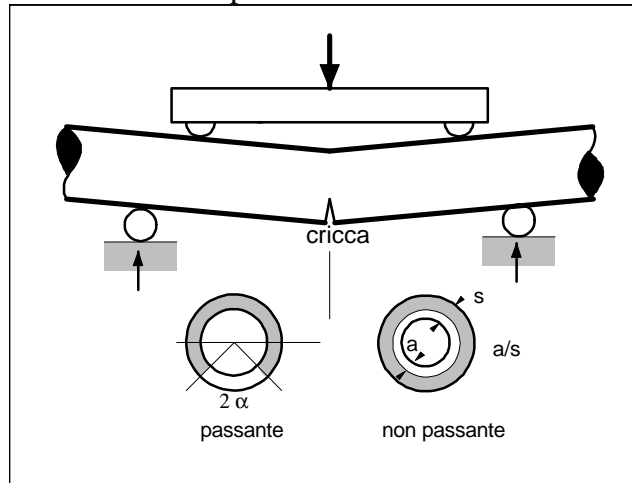


Fig. 1 - Disegno schematico del sistema di flessione su quattro punti dei tubi contenenti una cricca circonferenziale passante di estensione angolare 2α o continua (non passante) di profondità a/s .

In particolare, si vuole illustrare l'applicabilità del metodo cosiddetto del *Net Section Collapse Load* (NSCL) al calcolo della resistenza delle tubazioni criccate e la variabilità della tenacità del materiale, misurata attraverso diverse formulazioni dell'integrale J , in funzione dell'estensione della cricca passante. Quest'ultima era realizzata in due fasi. Nella prima, la tubazione veniva tagliata localmente introducendo una fessura circonferenziale di circa 3 mm di apertura. Nella seconda, si affilavano gli apici della fessura praticando, con un sistema di elettroerosione, degli intagli sottilissimi di 0.1 mm di ampiezza e circa 1 cm di lunghezza. La stessa metodologia era applicata nell'esecuzione delle cricche continue circonferenziali non passanti in cui l'intaglio praticato di macchina veniva reso acuto mediante elettroerosione. Sono state sottoposte a prove sperimentali sei *famiglie* di tubazioni. Per *famiglia* si vuole intendere un gruppo di tubazioni aventi lo stesso diametro e spessore. I diametri andavano da un massimo di 200 mm (8") ad un minimo di 60 mm. Gli spessori coprivano un campo variabile da 18 mm a 5.5 mm. La tabella 1 fornisce un quadro sinottico degli esperimenti condotti sulle tubazioni di acciaio al carbonio.

NET SECTION COLLAPSE LOAD

Uno degli obiettivi del programma era quello di verificare, a fronte delle evidenze sperimentali, la validità del criterio cosiddetto del *Net Section Collapse Load* (NSCL) o del carico di collasso della sezione netta. Ciò in quanto il criterio si presenta estremamente semplice ed immediato per una valutazione dell'integrità di una tubazione, anche criccata, e, dunque, idoneo più di altri ad essere inserito in una normativa o in criteri di progetto.

Tabella 1: Quadro sinottico delle prove eseguite su tubazioni di A 106 B

codice prova	diametro esterno (mm)	spessore (mm)	tipo di cricca	estensione (gradi)	profondità (a/s)	temperatura (°C)
2A1I45	60.3	5.54	passante(P)	45	1	ambiente TA
2B1I67	60.3	5.54	P	67.5	1	TA
2B2I90	60.3	5.54	P	90	1	TA
2C1I55	60.3	5.54	P	55	1	TA
2D1I55	60.3	5.54	P	55	1	TA
4A1II180	114.3	18.4	P	180	1	TA
4A2II180	114.3	18.4	P	180	1	TA
4A3II180	114.3	18.4	P	180	1	TA
4B1II180	114.3	18.4	P	180	1	TA
4B2I90	114.3	18.4	P	90	1	TA
4B3I90	114.3	18.4	P	90	1	TA
4C1I90	114.3	18.4	P	90	1	TA
4A1III45	114.3	11	P	45	1	TA
4A2II90	114.3	11	P	90	1	TA
4A3III135	114.3	11	P	135	1	TA
4A4III180	114.3	11	P	180	1	TA
4B1III025	114.3	11	nonpass(NP)	360	0.25	TA
4B2II025	114.3	11	NP	360	0.25	TA
4B3II059	114.3	11	NP	360	0.5	TA
4B4II050	114.3	11	NP	360	0.5	TA
4C1II070	114.3	11	NP	360	0.7	TA
4C2II070	114.3	11	NP	360	0.7	TA
4C3II035	114.3	11	NP	360	0.35	TA
4A1IV30	114.3	17	P	30	1	TA
4A2IV60	114.3	17	P	60	1	TA
4A3IV135	114.3	17	P	135	1	TA
6A1II180	168.3	18.5	P	180	1	TA
6A2II180	168.3	18.5	P	180	1	TA
6B1II180	168.3	18.5	P	180	1	TA
6B2I90	168.3	18.5	P	90	1	TA
6C1I90	168.3	18.5	P	90	1	TA
6C2I90	168.3	18.5	P	90	1	TA
6A1III45	168.3	13.8	P	45	1	TA
6A2II90	168.3	14	P	90	1	TA
6B1III135	168.3	13.7	P	135	1	TA
6B2II180	168.3	13.6	P	180	1	TA
6C1III025	168.3	13.6	NP	360	0.25	TA

codice prova	diametro esterno (mm)	spessore (mm)	tipo di cricca	estensione (gradi)	profondità (a/s)	temperatura (°C)
6C2II025	168.3	13.6	NP	360	0.25	TA
6D1II050	168.3	13.6	NP	360	0.5	TA
6D2II050	168.3	13.6	NP	360	0.5	TA
6F1II45	168.3	18.9	P	45	1	TA
6F2II135	168.3	18.9	P	135	1	TA
6F3II05	168.3	18.9	NP	360	0.5	TA
6B3IV	168.3	18.3	-	-	-	TA
6A1IV20	168.3	18.3	P	20	1	TA
6A2IV140	168.3	18.3	P	140	1	TA
6A3IV240	168.3	18.3	P	240	1	TA
6B1IV60	168.3	18.3	P	60	1	280
6B2IV90	168.3	18.3	P	90	1	280
6C1IV120	168.3	18.3	P	120	1	280
6C3IV150	168.3	18.3	P	150	1	280
6C2IV180	168.3	18.3	P	180	1	280
8A1III45	219	10.9	P	45	1	TA
8A2II90	219	11	P	90	1	TA
8B1III135	219	10.8	P	135	1	TA
8B2II180	219	10.6	P	180	1	TA
8C1II025	219	10.3	NP	360	0.25	TA
8C2II025	219	10.3	NP	360	0.25	TA
8D1II05	219	10.3	NP	360	0.5	TA
8D2II05	219	10.3	NP	360	0.5	TA
8A1III180	219	10.6	P	180	1	TA
8A2III135	219	11	P	135	1	TA
8A3III050	219	10.9	NP	360	0.5	TA
8A1IV60	219	18.3	P	60	1	280
8A2IV90	219	18.3	P	90	1	280
8A3IV120	219	18.3	P	120	1	280
8B1IV150	219	18.3	P	150	1	280
8B2IV180	219	18.3	P	180	1	280
8A1IIIS180	219	10.3	P	180	1	TA

Proprio l'intenzione di derivarne un criterio di progetto ha consigliato la ripetizione, come appare evidente dalla tabella 1, di prove relative ad una stessa tipologia (stesso diametro, spessore, lunghezza o profondità di cricca, etc.).

A dispetto della grande variabilità dei parametri meccanici tradizionali, come la tensione di snervamento σ_s ed ancor più di meccanica della frattura, come il K_{Ic} , riscontrata tra lotto e lotto di una stessa fornitura ed addirittura sulla stessa tubazione tra punti diversi di prelievo, i risultati sperimentali ottenuti su tubazioni diverse, ma della stessa tipologia hanno rivelato una sorprendente riproducibilità spinta al punto stesso della sovrapposizione dei dati sperimentali. Il criterio del NSCL si basa sull'ipotesi di risposta della tubazione criccata alle sollecitazioni applicate, per scorrimento plastico generale (SPG). L'intera sezione, cioè, ha ceduto entrando in campo plastico. Nel caso in considerazione di carico da momento puro M , il momento limite che causa il collasso è ottenibile attraverso l'eguaglianza tra le caratteristiche di sollecitazione esterne, il momento M , e quelle di reazione interna, secondo lo schema di figura 2.

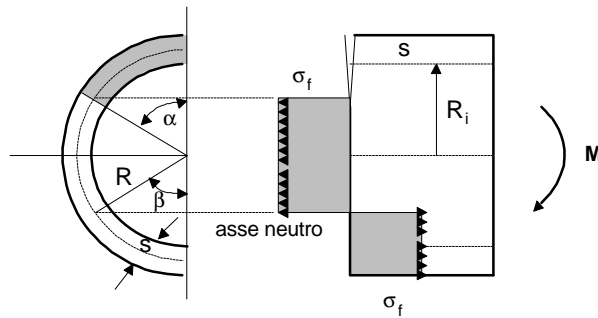


Fig.2 - Schema pratico per l'applicazione del NSCM

Come si può vedere dalla figura 2, nell'ipotesi di SPG si assume che la sezione resistente della tubazione reagisca con una tensione livellata al valore limite σ_f pari alla media tra la tensione di snervamento σ_s e quella di rottura σ_r :

$$S_f = \frac{S_s + S_r}{2} \quad (1)$$

La tensione σ_f viene definita di scorrimento o flow stress. L'equilibrio dei momenti porta ad esprimere il momento di collasso M_c sulla sezione netta (NSCM) come:

$$M_c = 2 \cdot S_f \cdot R^2 \cdot s \cdot (2 \sin \beta - \sin \alpha) \quad (2)$$

essendo, come si vede dalla fig. 2, α il semi-angolo di apertura della cricca passante, β l'angolo che definisce la posizione dell'asse neutro della sezione criccata, R il raggio medio ed s lo spessore della tubazione. L'angolo β è dato dalla relazione:

$$b = \frac{p - a}{2} \quad (3)$$

I risultati della sperimentazione condotta a temperatura ambiente sulle tubazioni da 8" contenenti cricche passanti di varia apertura 2α sono mostrati in figura 3.

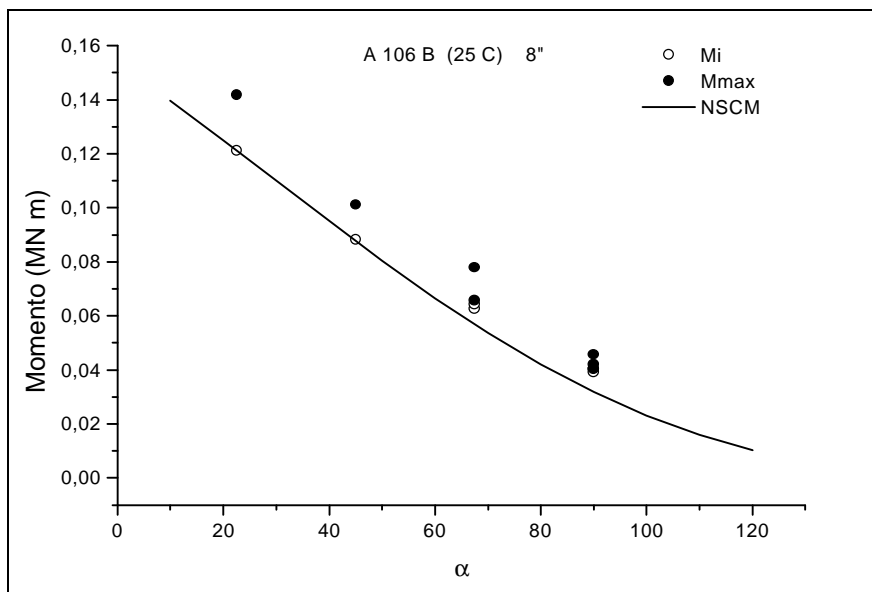


Fig. 3 - Risultati sperimentali ottenuti a temperatura ambiente su tubazioni da 8" criccate.

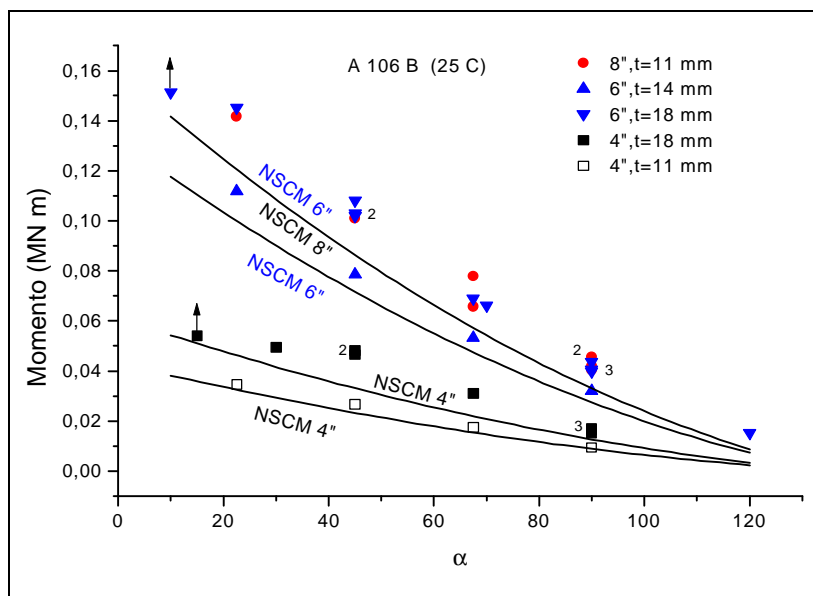


Fig. 4 - Risultati sperimentali ottenuti a temperatura ambiente su tutte le tipologie di prova, confrontati con quelli teorici da NSCM.

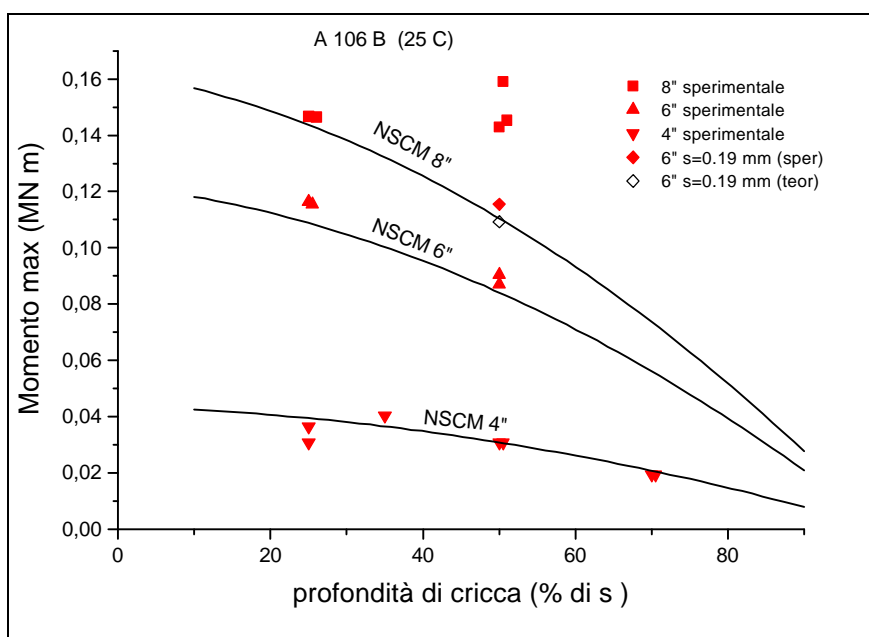


Fig. 5 - Risultati sperimentali ottenuti su tubazioni con cricca circonferenziale continua (non passante) e loro confronto con la teoria del NSCM.

Nella figura sono riportati i valori del momento M_i al quale si è prodotta la prima crescita sottocritica della cricca (momento di iniziazione) e di quello massimo M_{max} al quale si è interrotta la prova stessa. Data la natura delle condizioni di carico, a spostamento imposto, il momento massimo non ha mai condotto, con l'esclusione di due casi, al cedimento catastrofico della tubazione. Pure riportati, in figura, sono le previsioni teoriche del NSCM secondo l'eqn. (2). Si può ben vedere come la teoria fornisce dei valori che sono in buon accordo rispetto al momento di iniziazione M_i , ma sottostimano quello di collasso M_{max} . I risultati di tutte le prove su tubazioni da 8", 6" e 4" con

spessori vari, sono riportati in figura 4. Ancora una volta si può notare come il criterio del NSCM sottostima i risultati sperimentali con margini che vanno però riducendosi quando si ha a che fare con tubazioni di piccolo spessore, come nel caso del 4" da 11 mm di spessore. Tale conservativismo, almeno a temperatura ambiente, lo rende idoneo ad essere assunto come criterio di progetto. Nel caso di tubazioni con cricca continua circonferenziale, i risultati della sperimentazione a temperatura ambiente sono riportati in figura 5. Questa volta, la previsione teorica del momento di collasso M_c porta alla relazione:

$$M_c = 2 \cdot S_f \cdot (R_2^2 s_2 + R_1^2 s_1) \cdot \sin \beta \quad (4)$$

in cui R_1 ed R_2 sono i raggi medi della sezione in trazione e di quella in compressione, assunta priva di cricca, ed s_1 , s_2 i rispettivi spessori. L'angolo β è dato da:

$$b = \frac{\rho \cdot R_1 s_1}{(R_2 s_2 + R_1 s_1)} \quad (5)$$

Diversamente vanno le cose allorché si passa alle alte temperature. Ciò è visibile dai risultati sperimentali ottenuti su tubazioni di 8" e 6" contenenti cricche passanti di varia lunghezza, presentati in figura 6. Questa volta, le previsioni teoriche del NSCM sottostimano, anche se di poco, i risultati sperimentali. Ciò potrebbe lasciare alquanto perplessi, considerato che, essendo il criterio del NSCM basato su di un'ipotesi di comportamento completamente duttile del materiale, il criterio stesso dovrebbe applicarsi più felicemente ad alta temperatura che non a temperatura ambiente. La ragione di tale apparente anomalia, va ricercata in un evidente effetto di invecchiamento dinamico che si sviluppa già a partire da 120 °C in questo tipo di acciaio. A ~280 °C esso mostra proprio il suo massimo, come appare dalle curve di trazione che presentano un innalzamento della tensione di snervamento di ben 120-200 MPa rispetto alla temperatura ambiente. Ancor più significativa è la contemporanea riduzione della tenacità misurata attraverso il J_c che passa dai 200- 330 KN/m a temperatura ambiente a soli 40-65 KN/m a 280 °C. L'acciaio, dunque, si infragilisce in un arco di temperature che va da 120 °C a ~300 °C. Questo diverso comportamento, suggerisce l'opportunità di esprimere i risultati sperimentali, in termini di rapporto tra il momento sperimentale massimo, o di collasso, M_{max} e quello teorico di collasso M_c in funzione del parametro adimensionale di zona plastica P che rappresenta a sua volta il rapporto tra la zona plastica di fondo cricca e la distanza dal vertice della cricca dall'asse neutro. E' chiaro che l'applicabilità di un criterio basato sulla plasticizzazione dell'intera sezione richiede che tale parametro P sia prossimo ad uno. Ciò è visibile in figura 7 in cui sono riportati tutti i risultati sperimentali ottenuti sia a temperatura ambiente che a 280 °C. Si può osservare come l'unico gruppo di dati che cade al disotto del rapporto $M_{max}/M_c=1$, quello relativo alla temperatura di 280 °C, abbia un parametro adimensionale di zona plastica inferiore a 0.2. Tutti gli altri, al disopra di $M_{max}/M_c=1$, sono caratterizzati da un $P>0.35$. La figura riporta pure la curva indicata come limite di confidenza del 95% che rappresenta l'involuppo inferiore entro il quale si colloca il 95% di tutti i dati sperimentali sinora ottenuti in campo internazionale.

TENACITÀ DEL MATERIALE

La tenacità del materiale è stata misurata sia attraverso una sperimentazione su provini C(T) e TP(B) da ½ pollice, prelevati dalle tubazioni stesse, secondo il metodo ASTM E 813 dell'unloading compliance, che direttamente dalle curve di carico ottenute sui tubi.

In quest'ultimo caso è stato applicato il metodo dell'area A sotto la curva momento-angolo di rotazione, $M-\theta$, dal quale si ricava:

$$J = 2 A / s w \quad (6)$$

essendo s lo spessore del tubo e w la distanza $D-a$, con D diametro esterno ed a proiezione della semilunghezza di cricca sull'asse verticale. I risultati sono mostrati in figura 8.

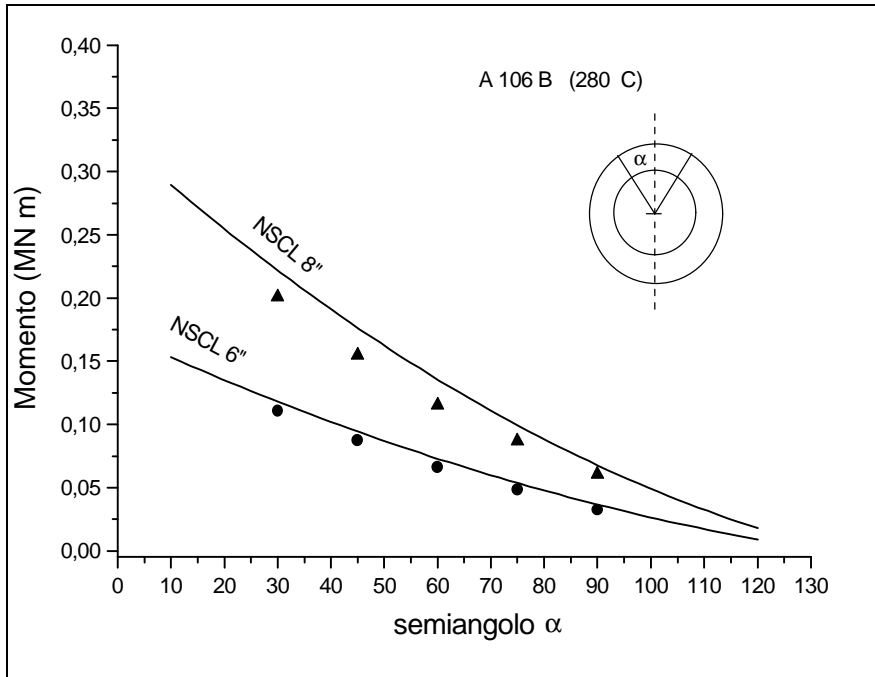


Fig. 6 - Risultati sperimentali ottenuti a 280 °C su tubazioni di acciaio al carbonio tipo A 106 B da 8" e 6", contenenti cricche passanti di varia lunghezza confrontati con il criterio del NSCM.

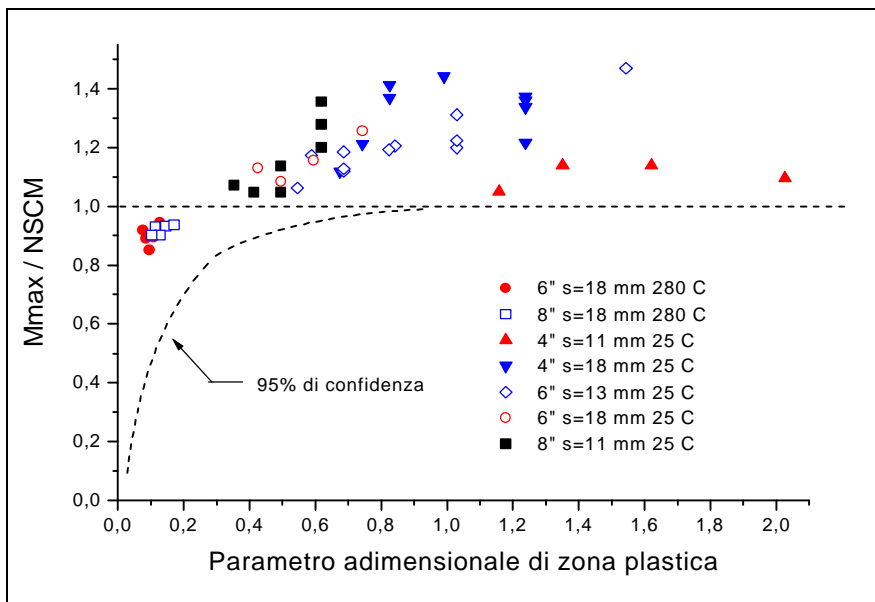


Fig. 7 - Andamento del rapporto M_{max}/M_c , tra momento massimo sperimentale e teorico, ed il parametro adimensionale di zona plastica.

E' interessante notare come i dati di tenacità ottenuti sui provini siano conformi a quelli misurati direttamente sulle tubazioni per angoli α superiori a 45 gradi. Per angoli inferiori, la tenacità misurata sui tubi è molto più elevata sia di quella ottenuta con i provini che di quella relativa agli angoli più grandi. Ciò è particolarmente evidente per gli angoli molto piccoli, meno di 20 gradi, ovvero per le cricche poco profonde. Tenuto conto del fatto che i provini avevano cricche profonde, l'andamento del J misurato sulle tubazioni, così come appare in fig. 8, conferma i risultati degli studi più recenti ormai consolidatisi, che alle piccole cricche resta associata una tenacità maggiore. Lo stesso andamento decrescente della tenacità con la profondità di cricca è osservabile a 280 °C, come riportato in figura 9.

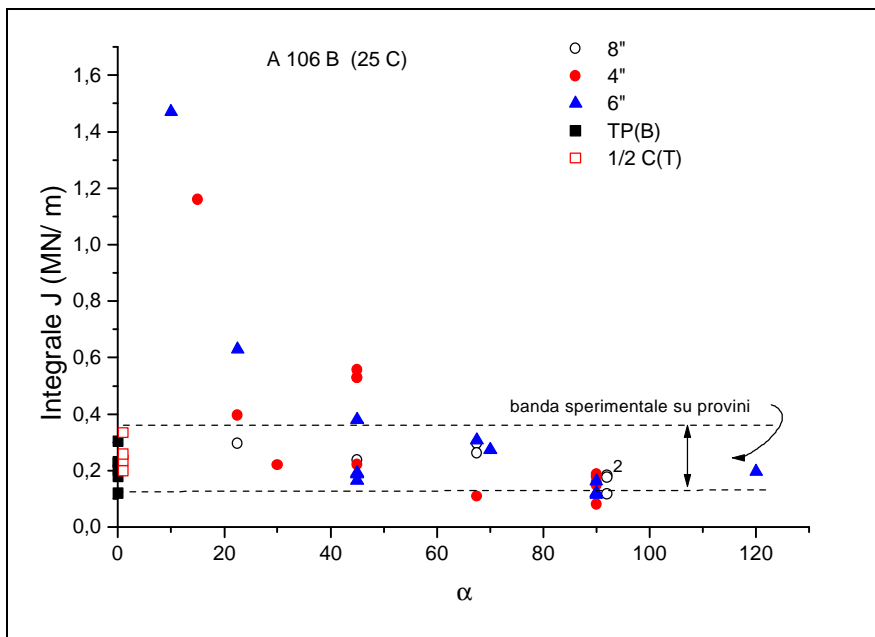


Fig. 8 - Risultati di tenacità J_c ottenuti a temperatura ambiente su provini C(T) e TP(B) da 1/2 pollice prelevati dalle sezioni di prova e misurati sulle tubazioni stesse in funzione del semi-angolo α di apertura della cricca.

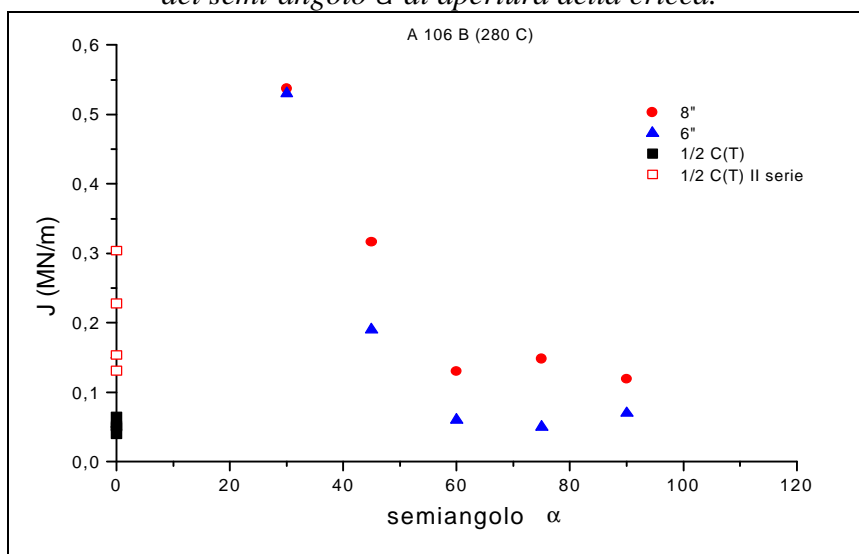


Fig. 9 - Risultati sperimentali di tenacità J_c ottenuti a 280 °C su provini C(T) prelevati dai tubi e sulle tubazioni stesse in funzione del semiangolo di apertura della cricca.