

**IGF11-XI Convegno Nazionale
Gruppo Italiano di Frattura
Brescia, 4-6 luglio 1995**

**PROBLEMI CONNESSI ALLA STABILITÀ DI TUBI TRASPORTO GAS
DANNEGGIATI MECCANICAMENTE**

F.Dodi*, Sh. Basha**, R.Roberti***

* SNAM S.p.A., San Donato M., (MI)

** Dottorando in Ingegneria dei Materiali, Politecnico di Milano

*** Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Trento

Introduzione

La causa più importante di incidenti su linee di trasporto gas è il danneggiamento meccanico delle tubazioni da parte di macchine operatrici. Il danneggiamento più grave e di più difficile valutazione che una tubazione può subire è l'ammaccatura con graffio. Diverse società del gas e istituti di ricerca hanno eseguito prove in piena scala per studiare l'effetto di un'ammaccatura con graffio sull'integrità di una tubazione. Da prove realizzate è emerso che, una volta formata, l'ammaccatura viene parzialmente riespulsa dalla pressione nel tubo e che durante la riespulsione si produce una lacerazione duttile al di sotto del graffio [1], la cui entità dipende essenzialmente dalla profondità dell'ammaccatura e dal tipo di acciaio. Alcuni ricercatori riportano anche una certa variazione delle caratteristiche meccaniche a causa della deformazione subita [2].

Al fine di comprendere meglio i fenomeni che interagiscono durante la formazione e la successiva espulsione di un'ammaccatura con graffio, dai quali dipendono sia il carico massimo sopportabile dalla struttura, sia la capacità della stessa di resistere in misura più o meno rilevante alla propagazione della lacerazione duttile, presso il laboratorio Metal della SNAM S.p.A. sono in corso prove appositamente progettate su campioni predeformati, di acciai scelti come rappresentativi di alcuni fra quelli oggi in esercizio per le tubazioni trasporto gas.

Parte sperimentale

Per investigare l'influenza della precedente deformazione plastica sul comportamento a frattura degli acciai per tubi selezionati si sono realizzate prove con provini tipo TPB predeformati (vedi fig. 1); la scelta del metodo di incrudimento mediante flessione in direzione tale da provocare la chiusura della cricca nei provini preventivamente precriccati è stata dettata dalla esigenza di riprodurre una situazione quanto più vicina a quella del materiale al fondo di una ammaccatura. Allo stesso tempo, non potendo riprodurre sui campioni le condizioni di carico che si realizzano in un tubo danneggiato durante la riespulsione di una ammaccatura, si è sollecitata a trazione una prima serie di

provini predeformati, mentre i rimanenti campioni sono stati sottoposti a flessione su tre punti. Per entrambe le serie di provini il grado di incrudimento è stato fissato in funzione dell'angolo di predeformazione pari a 10°, 20°, 30°, 40° e 50°.

Le prove sono state condotte su due acciai diversi, di seguito indicati come X60970LC e X65980LC, rappresentativi di materiali a bassa e media energia assorbita nella prova di resilienza. Nella tabella I sono riportate la composizione chimica e le caratteristiche meccaniche degli acciai sottoposti a prova; α ed n sono i coefficienti della legge di incrudimento. In relazione alle esigenze di prelievo nella direzione trasversale (TS) ed allo spessore dei tubi i provini sono stati ricavati con una sezione di 10x10 mm (BxW). I provini sono stati precriccati secondo la norma ASTM E813-87 per avere un rapporto $a/W=0,5$. Per le prove si è usata una macchina elettromeccanica Schenck da 250 kN.

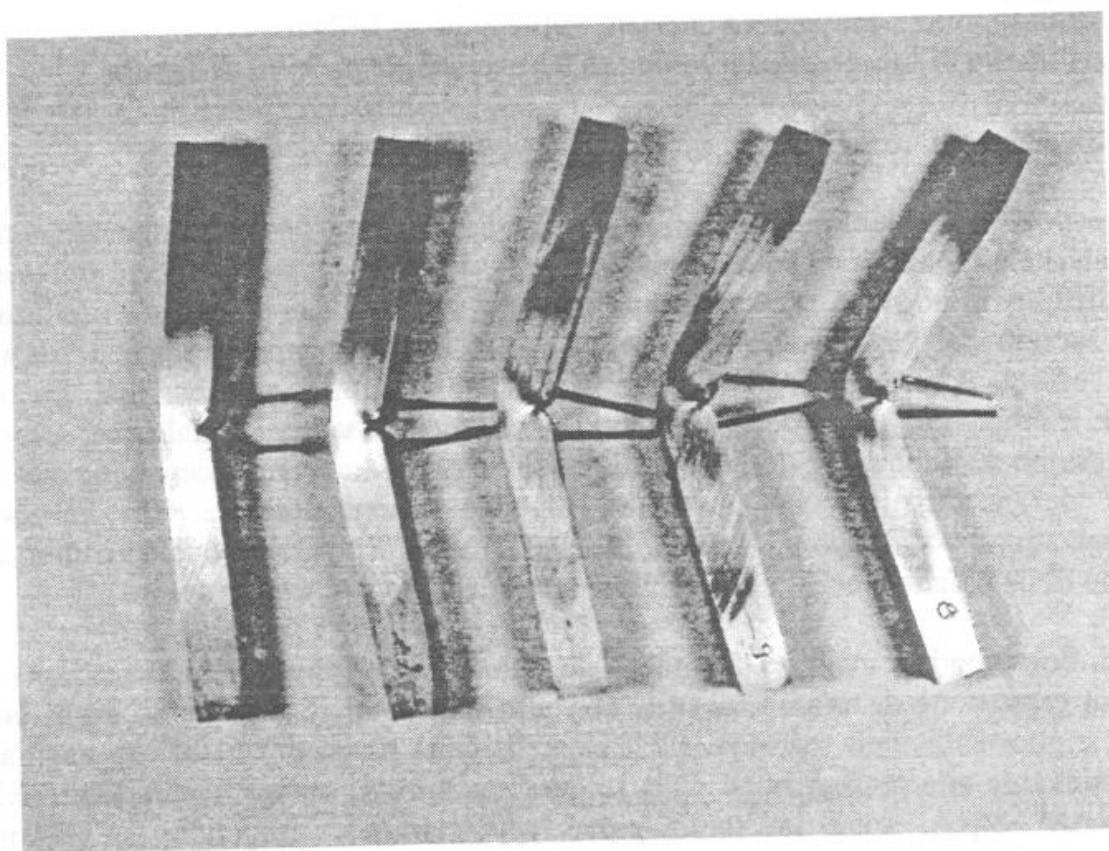


Figura 1 - Esempio di una serie di campioni con differente grado di predeformazione

Acciaio	% C	% Si	% Mn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% V	% P	% S	% Nb
X60970LC	0,204	0,315	1,38	0,025	0,015	0,005	0,006	0,002	0,026	0,01	0,03
X65980LC	0,094	0,264	1,78	0,011	0,012	0,006	0,018	-	0,019	0,01	0,05

	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Z [%]	α	n
X60970LC	482	565	74,2	3,20	8,59
X65980LC	553	605	74,1	3,57	11,77

Tabella 1 - Analisi chimica e caratteristiche meccaniche per i due acciai

Tramite un sistema di acquisizione dati durante le prove sono stati registrati il carico e lo spostamento del punto di applicazione del carico mentre i campioni sono stati monitorati misurando la caduta di potenziale per il calcolo dell'avanzamento della cricca. Tutte le prove sono state realizzate a temperatura ambiente. La velocità dello spostamento del punto di applicazione del carico è stata di 0,3 mm/min, rimanendo così nell'ambito delle prove statiche.

Risultati sperimentali

La prima serie di prove è stata realizzata sollecitando i campioni in trazione in maniera analoga a quelli CT, adottando uno schema di prova quale quello riportato nella fig. 2. Le prove sono state eseguite fino alla rottura dei provini. Nelle figg. 3 e 4 sono riportati i grafici carico-spostamento per le prove eseguite, mentre nelle figg. 5 e 6 sono riportate le curve J-R di resistenza alla propagazione duttile.

Per verificare l'applicabilità delle formule raccomandate dalla normativa per i campioni CT ai provini predeformati impiegati si sono fabbricate, con l'acciaio X65980LC con direzione di prelievo TL, due ulteriori serie di provini, una uguale ai campioni predeformati ma ottenuta di lavorazione alla macchina utensile ed una di geometria analoga a quella di un CT e tale da rispettare i rapporti fra le dimensioni dei provini predeformati, così come mostrato in fig. 7.

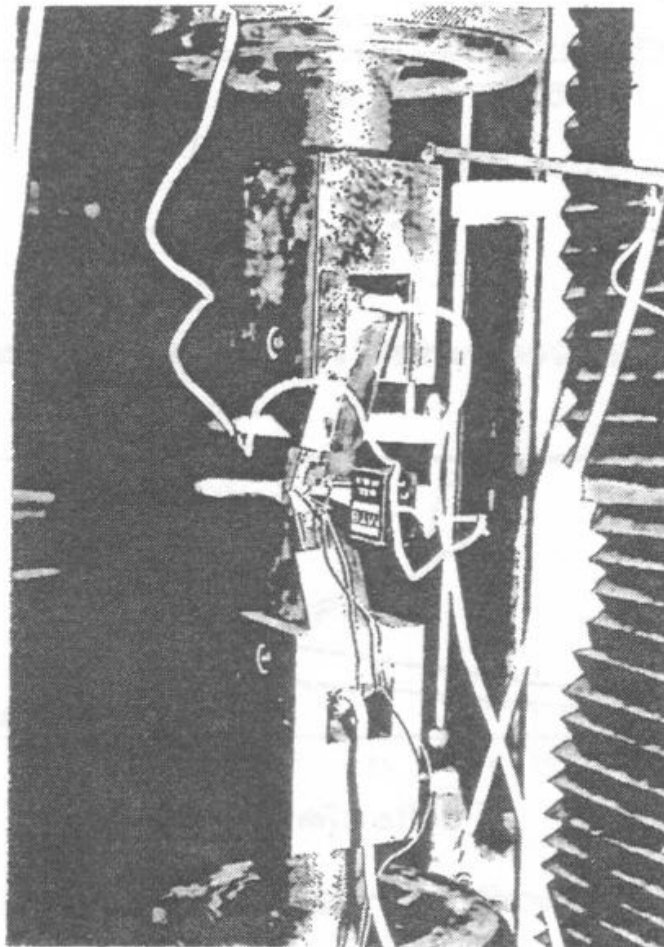


Figura 2 - Schema di prova adottato per sollecitare i campioni predeformati in trazione

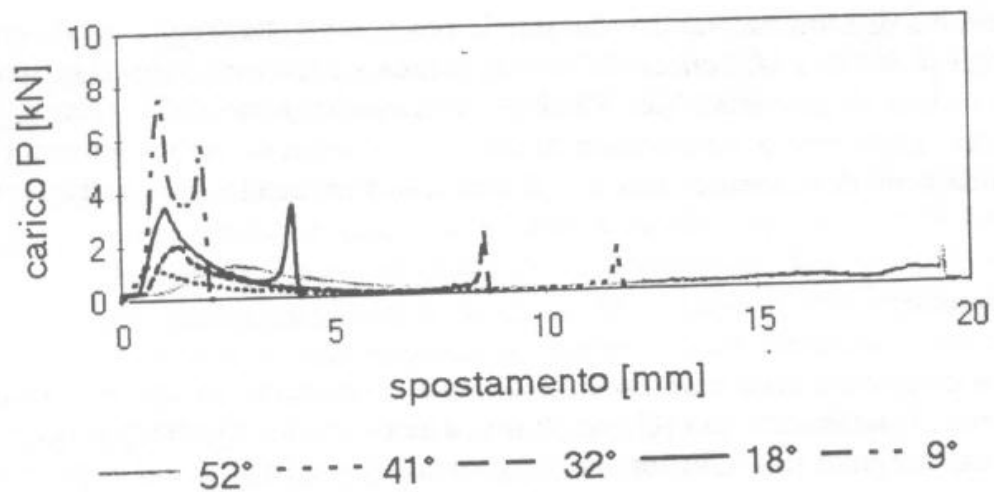


Figura 3 - Curve sperimentali dei provini in acciaio X60970LC sollecitati in trazione

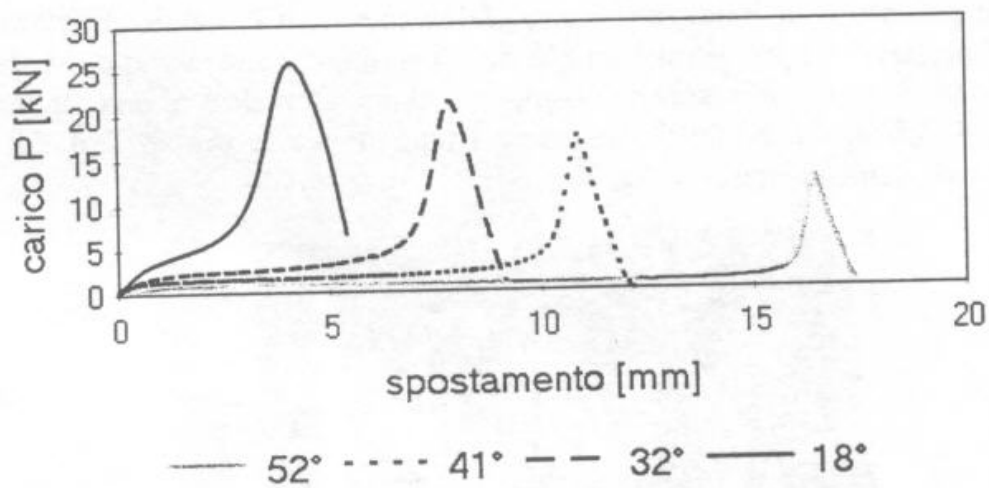


Figura 4 - Curve sperimentali dei provini in acciaio X65980LC sollecitati in trazione

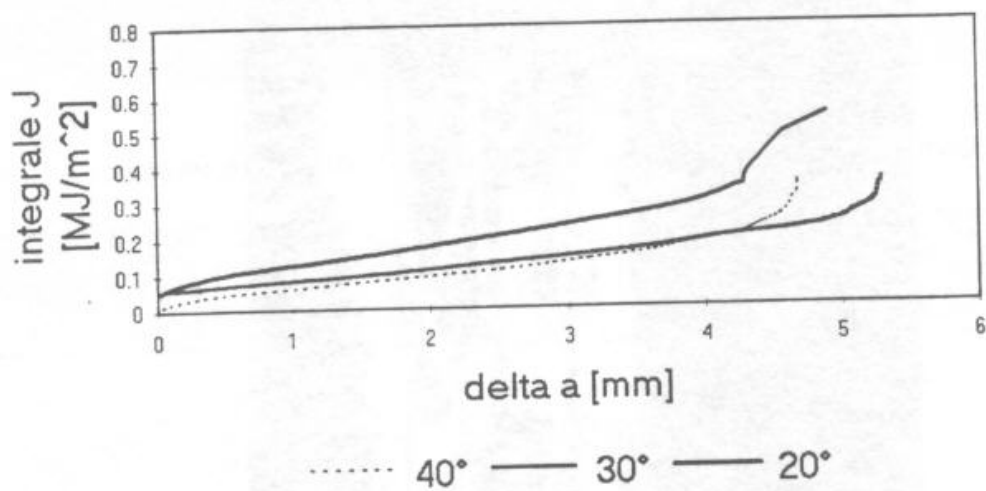


Figura 5 - Curve J-R per i campioni predeformati tipo CT in acciaio X60970LC

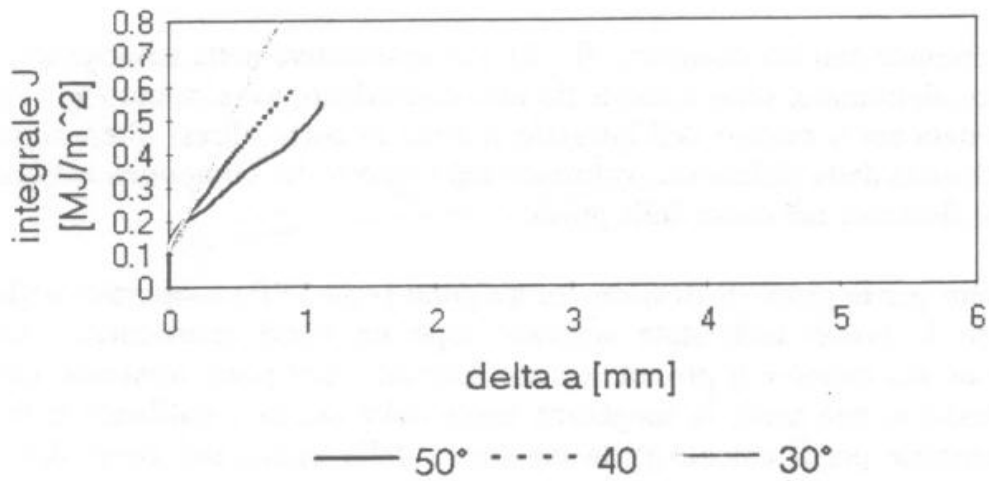


Figura 6 - Curve J-R per i campioni predeformati tipo CT in acciaio X65980LC

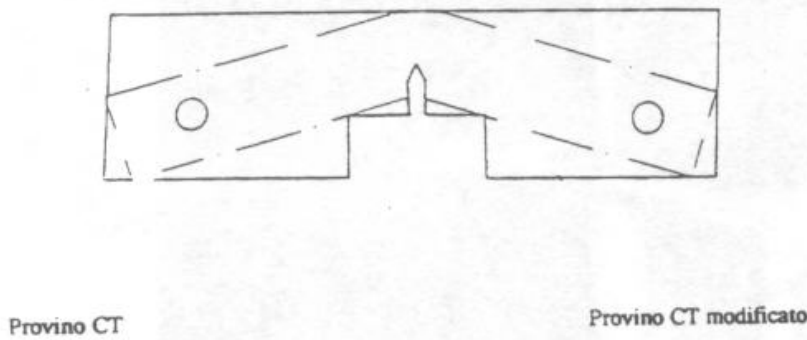


Figura 7 - Geometria dei campioni non predeformati, ottenuti per lavorazione meccanica

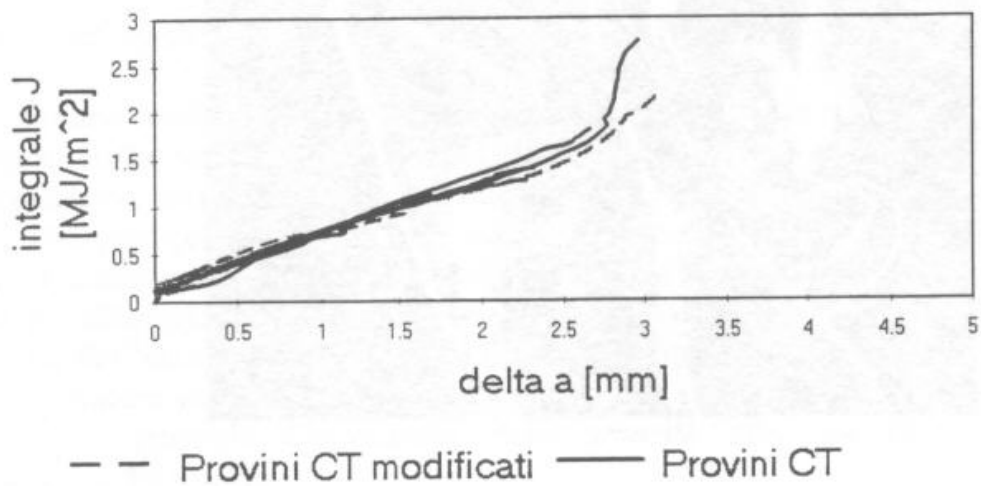


Figura 8 - Confronto tra le curve J-R ottenute con i campioni di figura 7

Le curve J-R ottenute con tali campioni (fig. 8), rappresentative della tenacità alla frattura dell'acciaio non deformato, sono risultate fra loro coincidenti, avvalorando in tal modo la procedura adottata per il calcolo dell'integrale J. Sono in corso altresì ulteriori prove per accertare l'influenza della differente evoluzione del rapporto fra componente di trazione e componente di flessione nel corso della prova.

Lo schema usato per le prove di flessione su tre punti (tipo TPB) è riportato nella fig. 9. In questo caso le prove sono state arrestate dopo un certo spostamento del punto dell'applicazione del carico e il provino è stato scaricato, per poter misurare, dopo aver separato lo stesso in due metà, la lunghezza finale della cricca e calibrare le misure di caduta di potenziale per il calcolo della lunghezza della cricca nel corso della prova. Nelle figg. 10 e 11 sono riportate le curve J-R ottenute per i due acciai sperimentati.

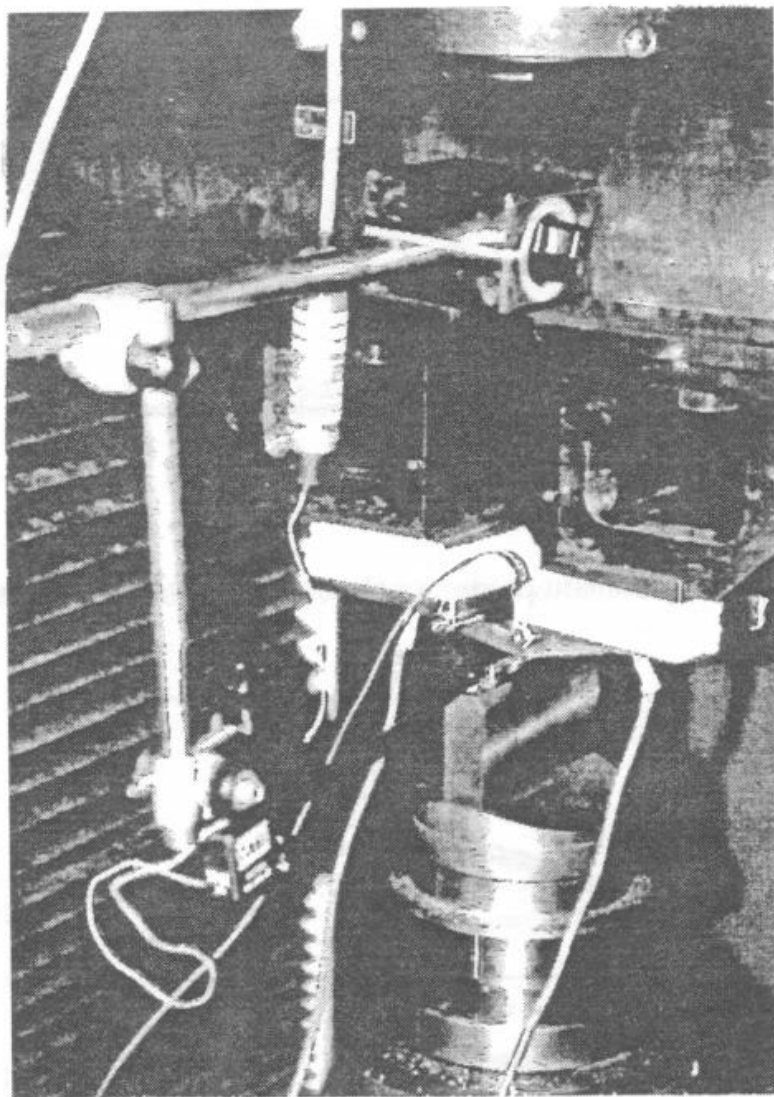


Figura 9 - Schema di prova in flessione su tre punti per i campioni predeformati

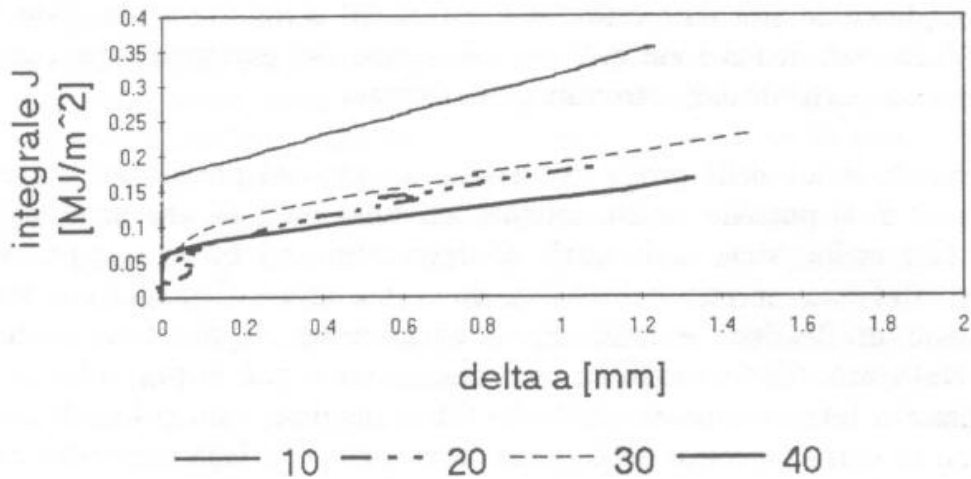


Figura 10 - Curve J-R per i provini predeformati tipo TPB in acciaio X60970LC

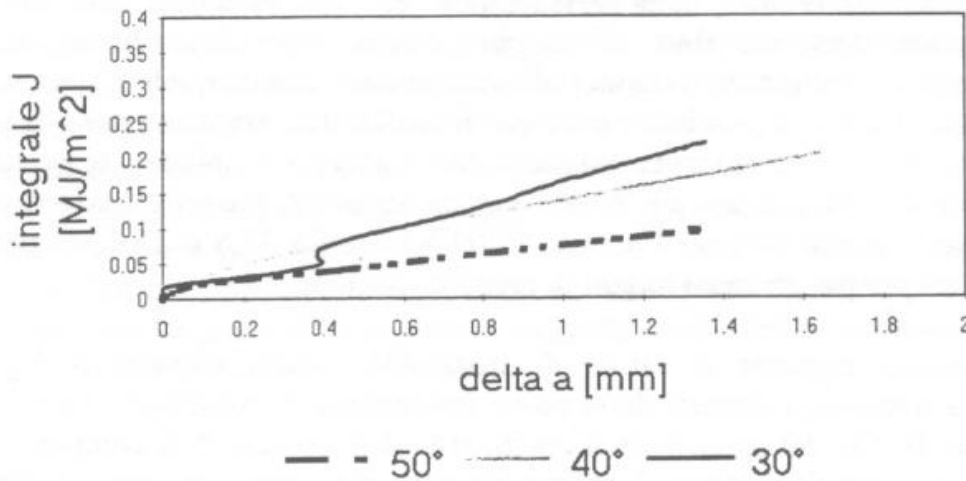


Figura 11 - Curve J-R per i provini predeformati tipo TPB in acciaio X65980LC

Discussione dei risultati

Un primo risultato, del tutto in linea con le attese, è rappresentato dalla progressiva diminuzione della resistenza alla propagazione della frattura al crescere del grado di predeformazione, così come messo in evidenza dalle curve J-R ottenute sia per i campioni tipo CT che per quelli TPB. Mano mano che cresce l'angolo di predeformazione, l'acciaio in corrispondenza del legamento viene sempre più incrudito e progressivamente diminuisce l'allungamento massimo a frattura che può essere sostenuto all'apice della cricca prima dell'innesco della frattura. Lo stesso si può presumere accada anche al fondo delle ammaccature con graffio e pertanto per quelle di maggiore profondità ci si può aspettare una sensibile diminuzione della tenacità alla frattura dell'acciaio in corrispondenza del graffio.

Più complessa ed articolata è invece l'analisi del comportamento sotto carico dei campioni predeformati in funzione dell'individuazione dei parametri che controllano il massimo carico sopportabile dalla struttura predeformata.

Le curve di carico delle prove di trazione sui provini precriccati e predeformati tipo CT (figg. 3 e 4) possono essere interpretate sulla base di una suddivisione delle stesse in tre fasi, nella prima delle quali sul legamento del provino è prevalente una componente di flessione, mentre nell'ultima, dopo una fase intermedia con tensioni sul legamento miste di flessione e trazione, la componente di flessione è da ritenersi trascurabile. Nel confronto fra i risultati per i due acciai si può in primo luogo osservare che per l'acciaio a minore tenacità (X60970LC) si raggiunge un primo massimo nella curva di carico in corrispondenza della prima fase, quando il legamento del campione è assoggettato prevalentemente ad una componente di flessione, il cui valore è superiore, o al più dello stesso livello, a quello del secondo massimo raggiunto nel prosieguo della prova quando si registra un nuovo incremento del carico nella fase in cui la componente di tensione sul legamento diviene essenzialmente di trazione. Al contrario per i provini tipo CT in acciaio X65980LC, nella parte iniziale della fase di carico, il carico è risultato progressivamente crescente fino al raggiungimento della fase finale della prova (legamento prevalentemente in trazione) in corrispondenza della quale è stato registrato il carico massimo. Inoltre, è possibile notare che il livello del carico massimo raggiunto nel corso della prova è notevolmente inferiore per l'acciaio a minore tenacità; si sono registrati infatti carichi massimi fra 7,5 kN (per un angolo di predeformazione pari a 20°) e 1,2 kN (angolo pari a 50°) per l'acciaio X60970LC e fra 25,8 e 12,4 kN per l'acciaio X65980LC, sempre per gli stessi angoli di predeformazione.

Per quanto riguarda il carico di instabilità finale, quando il legamento è assoggettato a trazione, i risultati delle prove consentono di osservare che esso dipende fortemente dal livello del precedente incrudimento dell'acciaio. Nei campioni in acciaio X60970LC, in particolare, dopo il raggiungimento del primo massimo nella curva di carico (legamento prevalentemente in flessione) si ha un rapido avanzamento della frattura, cui corrisponde, in controllo di spostamento, una diminuzione del carico tanto maggiore quanto minore è il legamento residuo. Il legamento finale, pertanto, risulta tanto più piccolo quanto maggiore è stato il grado di predeformazione, e conseguentemente risulta progressivamente più basso il carico di instabilità finale. Nei campioni in acciaio X65980LC, invece, nella prima fase della prova (legamento prevalentemente in flessione) si ha l'innescò e la propagazione della frattura duttile sotto l'effetto di un carico progressivamente crescente; anche in questo caso, tuttavia, la diminuita resistenza alla propagazione della frattura messa in evidenza dall'influenza della predeformazione sulla curva J-R, determina un legamento residuo più piccolo nel momento in cui il campione per effetto della rotazione risulta assoggettato a trazione. Nei campioni a maggiore angolo di predeformazione, inoltre, la maggiore rotazione necessaria per giungere alla fase finale con il legamento residuo in trazione è ottenuta con un maggiore spostamento del punto di applicazione del carico, per effetto del quale la propagazione di frattura è maggiore per i campioni a più elevato livello di predeformazione.

Potendo ritenere che, almeno in prima approssimazione, la prova sui campioni tipo CT predeformati possa simulare a livello bidimensionale la parziale riespulsione, per

effetto della pressione interna, di una ammacatura in un tubo danneggiato, il differente comportamento dei due acciai sottoposti a prova porta a concludere che la situazione si presenta particolarmente complessa ai fini della valutazione del comportamento di un tubo in esercizio e dell'influenza su di esso dei vari parametri in gioco. Per gli acciai a bassa tenacità, infatti, sembrerebbe di poter concludere che le condizioni di innesco della frattura (prossime al raggiungimento del primo massimo nella curva di carico) sono anche quelle per le quali, in condizioni di controllo di carico, si verifica l'instabilità alla frattura del tubo. Per gli acciai a media o alta tenacità alla frattura, invece, la riserva di carico è ben superiore al livello di carico che determina l'innesco della frattura; le condizioni di instabilità alla frattura sono in questo caso dipendenti dalla resistenza alla frattura dell'acciaio incrudito in corrispondenza del legamento e dal grado di espulsione della ammacatura da parte della pressione interna.

Per avere un quadro più completo e per valutare l'effetto della componente di flessione durante la riespulsione si sono anche condotte prove di flessione su tre punti sui campioni predeformati. I diagrammi di carico in questo caso mostrano un solo massimo che, in situazioni di controllo di carico, risulterebbe quello che controlla le condizioni di instabilità alla frattura duttile; il valore del carico massimo raggiunto nel corso della prova di flessione è risultato decrescente al crescere dell'angolo di predeformazione. Inoltre, si è potuto constatare che l'innesco della frattura avviene approssimativamente in corrispondenza del carico massimo; infatti l'avanzamento Δa a tale carico è di circa 0,2 mm ed il corrispondente valore di J applicato è quindi pari a $J_{0,2}$, uno dei valori ingegneristici proposti per individuare condizioni di carico molto prossime all'innesco della frattura. Pertanto, per entrambi gli acciai sottoposti a prova, le condizioni di innesco della frattura sono in grado di segnalare il raggiungimento delle condizioni di instabilità nel caso di flessione in controllo di carico.

Conclusioni

Le prove condotte nel presente lavoro avevano lo scopo di fornire alcune indicazioni preliminari circa il comportamento sotto carico di tubazioni per trasporto gas nelle quali sia presente uno dei danneggiamenti più gravi che si può verificare, e cioè l'ammaccatura con graffio. Il comportamento di una ammacatura durante la parziale riespulsione ad opera della pressione interna è stato simulato mediante provini precriccati e predeformati, sollecitando gli stessi sia in trazione che in flessione.

Dalle prove realizzate si è potuto concludere che:

- la tenacità alla frattura iniziale dell'acciaio ha una rilevante influenza sul comportamento in condizioni di carico con componenti sia di flessione che di trazione sul legamento; per gli acciai con bassa tenacità l'instabilità alla frattura duttile (carico massimo in condizioni di controllo di carico) si raggiungerebbe infatti nella prima fase di carico, approssimativamente al momento dell'innesco della frattura, mentre per quelli a media o alta tenacità, prima di arrivare al carico massimo, si osserva una certa propagazione stabile della frattura in condizioni di carico applicato crescente; nel caso delle tubazioni questo potrebbe corrispondere a condizioni di instabilità, per gli acciai a bassa tenacità, già nella fase di riespulsione della ammacatura;

- nel caso di legamento assoggettato a flessione, per entrambi gli acciai a bassa e media tenacità, i campioni predeformati hanno evidenziato l'innesco della frattura duttile approssimativamente in corrispondenza del carico massimo raggiunto nel corso della prova;

- l'incrudimento conseguente alla formazione della ammaccatura ha un notevole effetto peggiorativo nei confronti della resistenza a frattura dell'acciaio; al crescere dell'angolo di predeformazione dei provini, infatti, si sono registrati una diminuzione della resistenza all'innesco ed alla propagazione della frattura duttile.

Sono attualmente in corso calcoli agli elementi finiti per analizzare lo stato di tensione presente in corrispondenza di un graffio al fondo di una ammaccatura al fine di verificare l'eventuale necessità di modifica alle condizioni di prova su campioni predeformati, così da poter simulare in modo più accurato possibile il comportamento dell'acciaio in presenza di un difetto in un tubo danneggiato.

Bibliografia

- 1- G.D.Fearneough, D.J.Jones "An Approach to Defect Tolerance in Pipelines" Conference on Tolerance of Flaws in Pressurised Components, I.Mech.E., May 1978, Paper.C97/78
- 2- T.G.Muntinga, C.Koning "Verification of External Damage Models by Burst Tests on Pipe Sections", 7th Symposium on Line Pipe Research Report, AGA, Houston, Texas, October 1986