

Analisi delle problematiche della frattura duttile su linee in pressione e confronto tra le teorie previsionali esistenti

G. Demofonti C.S.M. Roma

Nel presente articolo viene riportata una sintetica panoramica sulla problematica della frattura duttile di linee di tubi in pressione, un confronto tra le teorie previsionali esistenti e le linee di tendenza future. In particolare si approfondiscono i seguenti punti:

- Le nuove proposte di specifiche riguardo i valori minimi di tenacità per l'impiego degli acciai per linee in pressione dell'EPRG
- I risultati della verifica delle condizioni di arresto/propagazione della frattura in accordo ai nuovi parametri di tenacità proposti : Sc, CTOA ed energia DWTT.
- Indicazioni sullo sviluppo di future attività per definire la relazione tra la tenacità e la lunghezza massima ammissibile della frattura.

INTRODUZIONE

Nei primi anni '60 fu risolto dal Battelle Memorial Institute il problema della propagazione della frattura fragile su di una linea in pressione, ma fu posto in evidenza un nuovo fenomeno: la propagazione duttile di una cricca in direzione longitudinale con velocità minori della frattura fragile, ma comunque comprese tra 100 e 300 m/sec. Quest'ultimo fenomeno, sebbene meno grave del precedente (in base alle esperienze dei dati storici), tuttavia rappresentava un punto critico riguardo la sicurezza della linea. Le prove sperimentali di laboratorio ed in piena scala, affiancate da interpretazioni del fenomeno di tipo semi empirico, hanno portato alla definizione di formule previsionali (formula Battelle, British Gas, AISI ed altre) [1] che, per fissate condizioni di progetto (diametro della linea, spessore, pressione di esercizio) forniscono il valore minimo di energia Charpy V dell'acciaio necessario per arrestare la frattura. Sebbene tali formule presentassero delle zone di incertezza tuttavia hanno avuto il 'merito storico' di avere introdotto il concetto di energia Charpy V minima nelle specifiche di fornitura dei tubi, ed ancora rappresentano un riferimento valido nella definizione della tenacità di una linea.

Negli anni '70, sotto la spinta dell'evoluzione degli acciai per linee in pressione e con valori di tenacità sempre più elevati associati a gradi resistenziali sempre crescenti, furono avviate nel mondo una serie di attività intese a chiarire alcuni aspetti importanti del fenomeno :

- L'EPRG (European Pipeline Research Group), l'ILVA e CSM hanno realizzato numerose prove di propagazione della frattura su tubi in piena scala per verificare

la validità delle formulazioni esistenti in condizioni di geometria dei tubi e pressione di esercizio differenti da quelle già sperimentate.

- Un consorzio di acciaierie giapponesi ha portato a termine un articolato programma di prove, simili alle precedenti, al fine di studiare le condizioni di arresto della frattura non solo tenendo conto della tenacità dell'acciaio ma anche della massima estensione ammissibile della frattura sulla linea.
- Un gruppo italiano (costituito da ILVA, CSM, SNAM) parimenti alla British Steel hanno concentrato loro attenzione su parametri di tenacità differenti dall'energia Charpy V, che potessero evidenziare le capacità dell'acciaio ad arrestare la propagazione duttile della frattura: furono così introdotti i concetti di densità di energia specifica di volume Sc , l'angolo di propagazione della frattura CTOA (Crack Tip Opening Angle) e l'energia specifica di frattura misurata con una provetta tipo DWTT.

Agli inizi degli anni '80, l'EPRG ha pubblicato una raccomandazione, sintesi di tutte le attività fino ad allora svolte nel mondo, che definisce il valore minimo di energia Charpy V per arrestare fratture di tubi fino al grado API X70 (R_s minimo garantito fino a 490 MPa) e diametro $\phi \leq 48"$; successivamente inserita nelle normative europee di accettazione dei materiali per linee in pressione. Parallelamente, alla luce dei risultati sperimentali su tubi di grosso diametro ($\phi \geq 42"$) e grado resistenziale API maggiore di X70, risultò sufficientemente chiaro che in questi ultimi casi le condizioni di arresto si avevano con valori di energia Charpy V dell'acciaio 'sistematicamente' superiori delle formule previsionali disponibili [2].

Per giustificare questo comportamento furono formulate tre diverse ipotesi :

- Il parametro di tenacità Charpy V era da considerarsi valido ma le formule dovevano venire maggiorate, per essere applicate su linee con valori di tensione applicata ≥ 370 MPa, di circa il 30%; le formule risultavano, quindi, troppo semplificative del fenomeno.
- Il parametro di tenacità Charpy V non risultava univoco per tutte le classi di acciai utilizzati nelle linee in pressione quindi non univocamente rappresentativo del fenomeno della propagazione.
- Entrambe le ipotesi precedenti risultavano valide: il parametro Charpy V appariva troppo semplificato, le formulazioni previsionali risentivano troppo dell'approccio semi empirico e non erano supportate da una sufficiente descrizione fisica del fenomeno .

L'EPRG, in questi ultimi anni, ha continuato a lavorare sulla prima ipotesi emettendo raccomandazioni anche per tubi di acciaio di grado API X 80 ($R_s \geq 490$ MPa).

L'ILVA ed il CSM e la SNAM hanno continuato ad approfondire il secondo aspetto arrivando a definire meglio i parametri alternativi (Sc , CTOA ed energia DWTT) ricavabili con prove di laboratorio.

L'AGA (American Gas Association) ha impostato una specifica attività di ricerca basata sulla terza ipotesi, in cui il CSM e la SNAM sono impegnate essenzialmente nella caratterizzazione degli acciai e il SwRI (South West Research Institute - USA) ad approfondire la descrizione del fenomeno fisico attraverso l'impiego di codici ad elementi finiti [3]. Tutte e tre queste iniziative stanno dando i loro risultati. In tale

contesto risulta sempre più interessante studiare la correlazione tra composizione, parametri di produzione e caratteristiche di tenacità e la standardizzazione delle nuove prove.

Nel presente lavoro vengono illustrati, in modo sintetico rimandando alla bibliografia riportata tutte le formulazioni analitiche specifiche, i punti fondamentali illustrati nell'introduzione :

- Le nuove proposte di specifiche riguardo i valori minimi di tenacità per l'impiego degli acciai per linee in pressione dell'EPRG
- I risultati della verifica delle condizioni di arresto/propagazione della frattura in accordo ai nuovi parametri di tenacità proposti : Sc, CTOA ed energia DWTT
- Indicazioni sullo sviluppo di future attività per definire la relazione tra la tenacità e la lunghezza massima ammissibile della frattura.

Raccomandazioni EPRG per la tenacità per l'arresto di una frattura in linee in pressione di alto grado.

Nel 1993 l'EPRG ha proposto una raccomandazione per definire il valore minimo di energia Charpy V necessario per l'arresto della frattura duttile in linee in pressione, con diametro fino a 56", eserciti a valori di sollecitazioni \geq di 350 MPa [4]. I valori minimi di tenacità raccomandati sono riportati nella Tab.I riferita alla tensione di esercizio pari al 72% della tensione di snervamento dell'acciaio e alla Tab. II riferita al 62.5% delle stesse. I dati di energia riportati, espressi in Joule, sono riferiti a prove Charpy V eseguite utilizzando provini con sezione 10x10 mm .

Grado	Diametro Esterno dei tubi (mm)								
		> 510	> 610	> 720	> 820	> 920	> 1020	> 1120	
	≤ 510	≤ 610	≤ 720	≤ 820	≤ 920	≤ 1020	≤ 1120	≤ 1220	≤ 1430
L240	40	40	40	40	40	40	40	40	40
L290	40	40	40	40	40	40	40	40	40
L360	40	40	40	40	40	40	40	40	42
L415	40	40	40	40	40	40	40	40	42
L445	40	40	40	40	40	40	42	43	47
L480	40	41	45	48	51	53	56	58	63
L550	48	55	61	66	72	77	82	87	96

Tab. I. Valori di Energia Charpy V richiesti per arrestare la frattura duttile in linee in pressione operanti con fattore di sicurezza 1.6

Grado	Diametro Esterno dei tubi (mm)								
		> 510	> 610	> 720	> 8 20	> 920	> 1020	> 1120	
	≤510	≤610	≤720	≤820	≤920	≤1020	≤1120	≤1220	≤1430
L240	40	40	40	40	40	40	40	40	40
L290	40	40	40	40	40	40	40	40	42
L360	40	40	40	40	40	40	40	40	42
L415	40	40	40	40	41	44	46	48	51
L445	40	40	41	43	46	48	51	53	57
L480	46	50	55	58	62	65	68	71	77
L550	61	68	76	83	90	96	102	108	120

Tab. II. Valori di energia Charpy V richiesti per arrestare la frattura duttile in linee in pressione operanti con fattore di sicurezza 1.4

I valori di tenacità riportati nelle Tabb. I e II scaturiscono dall'elaborazione, in termini di arresto e propagazione, dei risultati ottenuti da prove in piena scala eseguite pressurizzando la linea con aria o con metano, per un totale di 137 tubi. Da questa rielaborazione è emerso che la formula proposta dal Battelle risulta essere statisticamente la più corretta riguardo alla previsione dell'arresto della frattura, sebbene in 30 casi la frattura abbia propagato in zone di previsto arresto.

$$C_v = 4.5573 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_H^2 \cdot (R \cdot t)^{\frac{1}{3}}$$

C_v = energia specifica Charpy V (Kgm/cm²)
 σ_H = sollecitazione di hoop stress (N/mm²)
 t = spessore della parete del tubo
 R = raggio esterno del tubo

Alla base della scelta della formula Battelle vi sono, inoltre, da fare le seguenti considerazioni :

- > L'EPRG pur riconoscendo limitativo l'approccio basato sui valori dell'energia Charpy V individua che la prova di resilienza risulta, attualmente, la più consolidata sia per quanto riguarda le normative in uso sia per il suo impiego negli stabilimenti di produzione. Non è possibile affermare quanto detto per la determinazione degli altri parametri proposti quali Sc e CTOA ed energia DWTT.
- > La raccomandazione si riferisce al minimo valore di tenacità; pertanto il valore medio dell'energia Charpy V della linea è maggiore; ciò compensa la dispersione dei risultati sperimentali rispetto alle previsioni riscontrate nel caso degli alti gradi; a riguardo le informazioni disponibili confermano che per un grado di acciaio API X80 il valore medio dell'energia Charpy V di una produzione con specifica 140J è di circa 180 J con una deviazione standard di ± 30J.

Risultati della verifica delle condizioni di arresto/propagazione della frattura in accordo ai nuovi parametri di tenacità proposti : Sc, CTOA ed energia DWTT

La British Steel (già agli inizi degli anni '80) [5] mediante una estesa attività sperimentale ha evidenziato l'influenza del 'ligament' residuo (W-a) di un provino intagliato sull'energia specifica media di frattura (Et/A). La relazione che lega i due parametri è lineare, e pari a :

$$\frac{E_t}{A} = R_c + S_c (W - a)$$

Ai due parametri Rs e Sc è stato dato il seguente significato fisico :

- Rc rappresenta energia di formazione delle nuove superfici di frattura, ed ha le dimensioni Energia/Area
- Sc rappresenta l'energia specifica volumetrica necessaria per deformare plasticamente le zone adiacenti alla frattura. Ha le dimensioni di Energia/Volume.

A parità di valore di Rc, maggiore è il valore del gradiente Sc maggiore è la capacità del materiale di estendere le deformazioni plastiche 'lontano' dalla zona di processo della frattura, quindi in ultima analisi, ad assorbire energia durante il processo di frattura. Esso è stato preso come parametro per valutare la tenacità del materiale nei riguardi del fenomeno in studi. Appare evidente, ed è stato provato sperimentalmente, che la misura del parametro Sc è possibile utilizzando due provini aventi differenti 'ligament', oppure, in modo approssimato, utilizzando i dati di energia specifica ricavate da provini Charpy V e DWTT, dati, quest'ultimi, spesso disponibili nelle banche dati delle prove di propagazione eseguite in piena scala.

Parallelamente la British Steel ha definito una formulazione previsionale, sempre del tipo semi empirico, basata sul parametro SC. Sulla base di un bilancio energetico tra il lavoro fatto E_a sulle pareti del tubo dal gas che si decomprime e l'energia assorbita E_r dal tubo come deformazione plastica in zone adiacenti alla frattura (funzione del valore di Sc), la British Steel propone un criterio previsionale in cui le condizioni di propagazione sono determinate dalla disuguaglianza :

$$E_a (\text{diametro, spessore, tipo di gas, pressione}) > E_r (S_c, \text{diametro})$$

La SNAM con il CSM, nello stesso periodo, hanno accentrato la loro attenzione sull'angolo di propagazione della frattura CTOA come parametro di tenacità del materiale. Tale parametro, già oggetto di studi, risulta infatti costante durante la fase di propagazione della frattura sia nel caso di provino intagliato di ridotte dimensioni sia su tubi, come lavori del Prof. Kobayashi [6] hanno mostrato. Inoltre esso è associabile a parametri ampiamente utilizzati nella meccanica della frattura quali 'modulo di strappo' o, più in generale, la pendenza della curva R (dJ/da).

Una schematizzazione geometrica del fenomeno, basata sulla teoria delle linee di scorrimento, suffragata da numerosi dati sperimentali, ha permesso di esprimere, formalmente, il CTOA medio relativo alla frattura di un provino intagliato mediante il parametro Sc [7]:

$$Sc = A \sigma_0 \frac{CTOA}{2}$$

con A costante adimensionale dipendente dalla geometria del provino e σ_0 la tensione di scorrimento (flow stress) rendendo così più semplice, al livello di laboratorio, la misura del CTOA.

L'applicazione del CTOA come parametro di frattura ha portato a 2 criteri per valutare le condizioni di arresto-propagazione della frattura, differenti tra loro non nel concetto base che rimane comunque: $CTOA_{applicato} > CTOA_{materiale}$, quanto nel livello di 'raffinatezza' raggiunto nel schematizzare il fenomeno fisico e quindi nel determinare il $CTOA_{applicato}$. Così il modello proposto dalla SNAM risulta estremamente semplificato, mentre il modello del SouthWest Research Institute si basa su una 'impegnativa' simulazione, ad elementi finiti, del problema in esame ed arrivando a definire la dipendenza del $CTOA_{applicato}$ dalla velocità di frattura.

E' stata eseguita una validazione dei due modelli mediante le banche dati dei risultati delle prove di propagazione in piena scala disponibili. Infatti, come indicato, una valutazione approssimata dei valori del parametro Sc , e quindi anche del CTOA medio, può essere fatta utilizzando i valori di energia specifica Charpy V, DWTT e σ_0 . Dati, questi, che nella maggior parte sono disponibili per le prove in piena scala già eseguite (unica attenzione fondamentale è che l'energia DWTT sia associata a frattura completamente duttile). Per detta validazione sono state utilizzate le banche dati del CSM e dell'EPRG : la prima più ampia, ingloba la seconda, che è limitata a prove con tensione di esercizio della linea ≥ 350 MPa. Il numero dei tubi di cui si conoscevano i valori di energia DWTT, Charpy V e σ_0 sono rispettivamente di : 236 per la banca dati CSM e 94 per quella dell'EPRG. I risultati dell'applicazione dei criteri previsionali SNAM , SouthWest Research Institute e British Steel, ha messo in evidenza una superiorità di questi criteri rispetto a quelli basati sulla sola energia Charpy V. In tabella sono sintetizzati i risultati ottenuti in termini percentuali di corrette propagazioni, corretti arresti, errate propagazioni (errore grave non conservativo) errato arresto, confrontati con quelli ottenibili dal modello classico Battelle.

BANCA DATI EPRG

	Corretto Arresto	Corretta propagazione	Errato Arresto	Errata Propagazione
SNAM	14.9	55.4	22.3	7.4
SwRI	16.0	54.3	21.3	8.4
BritishSteel	14.9	58.6	22.3	4.3
Battelle	29.5	35.4	7.4	27.7

BANCA DATI CSM

	Corretto Arresto	Corretta propagazione	Errato Arresto	Errata Propagazione
SNAM	11.0	65.3	17.8	5.9
SwRI	12.3	63.1	16.5	8.1
BritishSteel	16.9	58.5	11.9	12.7
Battelle	22.5	46.1	6.4	25.0

Criteria per la definizione della tenacità dei materiali in termini di arresto e lunghezza massima della frattura.

Tutti i modelli presentati sia quelli basati sull'energia Charpy V sia quelli sui parametri CTOA e Sc , sono fondati sull'ipotesi di una condizione stabile di propagazione della frattura che non risente della zona di innesco e che il suo arresto avvenga all'interno di un singolo tubo (da 10 a 15 metri). Come miglioramento dei modelli previsionali esistenti è stato avviato lo studio di modelli capaci di descrivere tutto il fenomeno della propagazione, dal momento in cui la cricca diventa instabile a quando, eventualmente, si arresta, prevedendo l'andamento nel tempo e nello spazio delle velocità della frattura.

Allo stato attuale tre sono i modelli proposti che tuttavia necessitano di ampie verifiche e messe a punto sulla base dei dati sperimentali di prove in piena scala: il modello CSM (inizio anni '80 ancora basato sul valore dell'energia Charpy V), modello SNAM e modello proposto da ricercatori della Nippon Steel (questi ultimi due proposti alla fine dell'80 e basati sul valore del CTOA).

Punto chiave dello sviluppo di questi modelli è la conoscenza e la corretta schematizzazione del fenomeno della decompressione del gas, che nella fase transitoria (tra innesco e propagazione stabile a velocità costante) risente della distanza dalla zona di innesco stessa. Così l'ipotesi è che all'apice della frattura la pressione durante il transiente sia associata non alla velocità istantanea della cricca ma, in qualche modo (oggetto di studio) ad una sua velocità media.

Parallelamente esistono proposte di lavoro riguardanti l'estensione del modello SwRI per arrivare a simulare tutta una prove in piena scala con i codici ad elementi finiti, anche questo basato sul parametro di tenacità CTOA.

CONCLUSIONI

A conclusione di questa sintetica panoramica sulla problematica riguardante la propagazione della frattura su linee in pressione si possono trarre le seguenti indicazioni .

- Esistono normative o proposte di normative basate su esperienza decennali che permettono di eseguire una valida scelta della tenacità degli acciai per ridurre al minimo il pericolo della propagazione della frattura duttile. Tale proposte si basano su parametri ricavabili da prove standardizzate come il valore dell'energia Charpy V.
- Parametri di tenacità alla frattura, quali il CTOA, più vicini al fenomeno in studio forniscono un quadro più completo delle reali condizioni di arresto/propagazione che si possono avere su di una linea. A riguardo è fondamentale un sforzo di standardizzarne la sua misura con prove di laboratorio, e conoscere le correlazione parametri di produzione-caratteristiche di tenacità.
- La possibilità di schematizzare e quindi simulare tutto il fenomeno della frattura (dall'innescò all'arresto) risulta concreta grazie ai modelli ad elementi finiti ed alla potenza dei mezzi di calcolo. A riguardo è fondamentale eseguire una rilettura dei risultati delle prove in piena scala con l'intento di approfondire la fluidodinamica del fenomeno nella fase transitoria.

Infine lo sforzo fatto per ottenere parametri di tenacità aventi una validità ed una trasferibilità agli elementi finiti è la parte più qualificante di questo articolo. Le formule che utilizzano il CTOA non vanno considerate come un superamento di quelle che usano il parametro Charpy V, infatti quest'ultime, dal punto di vista pratico, soddisfano ampiamente condizioni di sicurezza delle condutture in pressione, ma solo come sperimentazione di parametri coerenti con la meccanica della frattura e trasferibili ad elementi finiti. Tutto questo, in vista del passaggio da formule empiriche ad una progettazione consistente dal punto di vista teorico e compatibile con la meccanica della frattura, che utilizza i sofisticati strumenti di calcolo solo oggi disponibili, capaci di risolvere la complessità del problema della propagazione duttile in condizioni particolarmente severe.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Vogt G. et al., EPRG Report 3R International March 1983
- [2] Demofonti G. et al., Pipeline Tech. Conf., Ostend Belgium Part B, pp 16-21 1990
- [3] Kanninen M. F. , G. Demofonti et al., Joint Final Report AGA Contract No. PR15-527 and No PR 182-526 July 1992
- [4] Vogt G. et al. 9th PRC/EPRG Biennial Joint Technical Meeting On Line Pipe Research May 11-14, 1993
- [5] Priest A. H. and Holmes B., Int. J. of Fract. Vol 17, No 3, pp 277-299, 1981
- [6] Kobayashi A. S. et al., University of Washington report N. UWA/DEM/IR-86-1, Sept. 1986
- [7] Demofonti G. et al. ECF, Fract. Behav. and Design of Material and Structures, 1990