

EFFETTO DI CONTENIMENTO DEL TERRENO SULLA PROPAGAZIONE DI FRATTURA DUTTILE IN TUBAZIONI PRESSURIZZATE

P.Di Filippo (*), G.Mannucci (*), P.Salvini (**)

(*), *Centro Sviluppo Materiali Via di Castel Romano n. 100/102 ROMA*

(**) *Dip. di Ingegneria Meccanica Università di Roma "Tor Vergata" 00199 - ROMA*

Sommario

Viene esaminato il problema della previsione del comportamento di gasdotti interrati interessati da propagazione di frattura duttile. Si dimostra come particolare attenzione va posta sull'effetto che la presenza del terreno ha sulle modalità di propagazione. E' proposta una metodologia, basata sull'analisi agli elementi finiti, in grado di simulare il fenomeno in dettaglio e fornire un criterio previsionale realistico.

Abstract

The prediction of the behaviour of buried gas pipe lines interested by ductile fracture propagation is examined. Particular emphasis is pointed on the effects related to the presence of the soil around the tube. A method is proposed, based on Finite Element Analysis, able to study in detail the phenomenon and to allow realistic predictions.

1. Introduzione

I gasdotti impiegati per il trasporto del gas naturale sono costituiti da tubazioni di grande diametro (fino a 56", pari a 1.422 m), generalmente interrati ad una profondità di pochi metri, in cui il gas viene pompato sotto pressione (dell'ordine dei 100 bar).

Per rendere questo sistema di trasporto economicamente sempre più conveniente, le compagnie del settore stanno attualmente cercando soluzioni che comportano l'uso di diametri e pressioni sempre maggiori, con conseguente necessità di valutare le caratteristiche di resistenza che le nuove condutture devono possedere per garantire il necessario grado di sicurezza.

In caso di danneggiamento della tubazione, dovuto a fenomeni di corrosione o ad urti accidentali da parte di escavatori, può causarsi la rottura della parete del condotto per tutto il suo spessore, e, se l'estensione della zona danneggiata è sufficientemente elevata, innescarsi una frattura che ha la tendenza a propagare in direzione longitudinale a causa dello stato di tensione presente, caratterizzato da una elevata componente principale in direzione circonferenziale.

La frattura così innescata è in grado di propagare fino a che la spinta del gas che fuoriesce la sostiene, e questo può avvenire per distanze considerevoli; al fine di evitare un tale critico scenario, o almeno di limitarne il più possibile le conseguenze, vi è l'esigenza di produrre tubazioni in grado di permettere l'arresto quasi immediato della eventuale frattura innescata.

Queste condotte vengono quindi realizzate in acciai che, accanto alla elevata resistenza meccanica, possiedono anche elevata tenacità, in modo tale che durante la propagazione della frattura l'energia assorbita dal materiale della condotta sia sufficiente a consentire un rapido arresto della frattura stessa. E' da sottolineare che le tubazioni vengono progettate per essere esercite in condizioni di temperatura tali da assicurare un regime di frattura duttile in caso di propagazione; la frattura fragile infatti, una volta innescata, si propaga con velocità elevatissima (dell'ordine della velocità del suono nel metallo) interessando una porzione molto estesa di linea risultando virtualmente inarrestabile.

Grandi sforzi quindi sono stati compiuti e sono tuttora rivolti da parte delle compagnie del settore per stabilire i livelli minimi di tenacità che una nuova condotta deve possedere in determinate condizioni di esercizio della linea. Da un punto di vista complementare, vanno individuate le massime condizioni di esercizio ammissibili per una tubatura già esistente.

Va sottolineato il fatto che la propagazione della frattura in una tubazione in pressione è un fenomeno di una certa complessità; in generale si può affermare che l'evoluzione della propagazione di una frattura duttile lungo un gasdotto interrato è il risultato dell'interazione di un insieme di fenomeni che intervengono durante la propagazione, generalmente suddivisi in due categorie distinte chiamate *Driving Force* e *Resistance Force*. Nel primo gruppo vengono considerate tutte le sollecitazioni e le interazioni con l'esterno che tendono ad influenzare la propagazione della frattura, intese come motore della propagazione stessa; di questo gruppo fanno parte lo stato tensionale presente, l'azione di contenimento del terreno circostante al tubo e le forze di inerzia. Il secondo è costituito essenzialmente dalla resistenza offerta all'avanzamento della frattura dalla tubazione stessa, valutabile mediante l'energia assorbita dalla porzione di tubo prossima alla linea di frattura sede di elevata deformazione plastica, e dall'energia necessaria alla formazione della due nuove superfici di frattura; queste energie sono entrambe legate alle caratteristiche meccaniche ed in particolare

alla tenacità dell'acciaio.

Dal bilancio tra *Driving Force* e *Resistance Force* deriva la tendenza della frattura duttile alla propagazione stazionaria o all'arresto.

La complessità del fenomeno e la non facile quantificazione dei parametri che interagiscono tra loro durante la propagazione della frattura, come la decompressione del gas, l'azione di contenimento del terreno, la geometria di apertura del tubo e la dinamica della propagazione, rendono difficile schematizzare ed analizzare il processo stesso, e quindi la determinazione dei valori di tenacità limite in funzione delle condizioni effettive di esercizio e geometria della condotta.

Nel corso degli anni molti studi sono stati dedicati a questo problema, giungendo a formulare differenti ipotesi e modelli per cercare di interpretare il fenomeno: alcuni autori hanno proposto modelli teorici semplificati [1], altri hanno puntato su relazioni empiriche basate su dati sperimentali [2], altri ancora hanno sviluppato modelli numerici di calcolo [3]. Ognuna di queste strade ha permesso di raggiungere differenti gradi di approssimazione nella descrizione del fenomeno, senza però portare a formulazioni sufficientemente generali, capaci di descrivere la propagazione in ogni condizione di prova e per i differenti tipi di acciaio normalmente utilizzati nei gasdotti.

In questo lavoro si vuole porre l'accento sull'importanza e sull'influenza che l'azione di contenimento del terreno (*backfill*) ha sulla capacità del tubo di arrestare la frattura duttile; in particolare, si vuole mettere in risalto la differente azione che terreni diversi, o differenti condizioni climatiche, esercitano su questo fenomeno, contrariamente a quanto assunto fino ad oggi da molti modelli in cui il terreno viene portato in conto non come elemento fisico ma come costante determinata empiricamente, indipendentemente dalla natura e condizione in cui questo si può effettivamente trovare.

2. Modelli previsionali semiempirici

La necessità di definire dei parametri costruttivi di riferimento, con cui caratterizzare la resistenza delle linee di trasporto del gas, ha spinto numerosi centri di ricerca e aziende del settore ad impegnarsi nella determinazione di relazioni capaci di legare le caratteristiche meccaniche degli acciai da gasdotti con le condizioni di esercizio cui questi vengono sottoposti; così da garantire un adeguato livello di sicurezza delle linee nei confronti della propagazione di una eventuale frattura accidentalmente innescata.

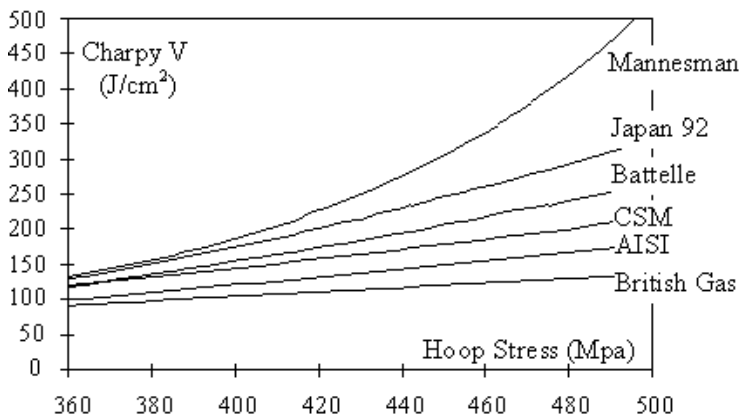


Figura 1 Curve previsionali per la propagazione / arresto della frattura duttile.

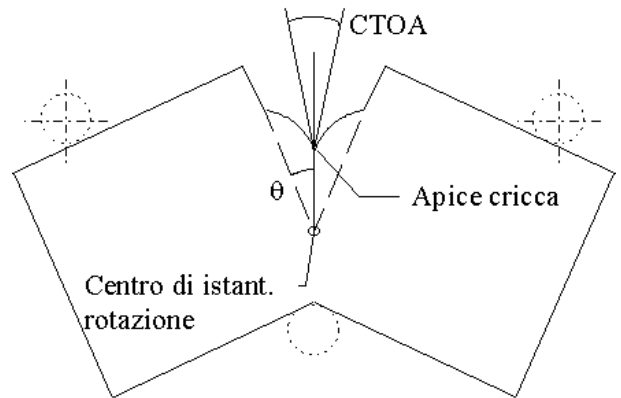


Fig. 2 Angolo di propagazione della frattura nella prova Drop Weight Tear Test.

Le relazioni cui si è giunti, ancora oggi utilizzate come standard di riferimento, sono essenzialmente delle formulazioni di tipo empirico o statistico, basate sull'interpolazione di dati sperimentali raccolti nel tempo con prove di scoppio condotte su tubazioni per gasdotti.

Tali modelli, tra i quali si ricordano quello AISI, Battelle, Mannesman, British Gas e CSM, legano le caratteristiche geometriche delle condotte e lo stato di sollecitazione indotto dal gas, con la tenacità dell'acciaio impiegato espressa in termini di energia specifica Charpy V. In particolare forniscono delle curve che esprimono la tenacità minima richiesta per garantire l'arresto della frattura in funzione della tensione circonfrenziale presente (*Hoop-Stress*) come mostrato in Fig. 1.

La forte dipendenza di tali relazioni dalle condizioni sperimentali impiegate per la loro taratura costituisce il loro limite più evidente; una loro estrapolazione al di fuori degli intervalli in cui sono state validate (acciaio con snervamento inferiore a 480 MPa, *Hoop-Stress* inferiore a 350÷400 MPa, spessore delle condotte inferiore a 20 mm, condizioni di interrimento uguali a quelle delle prove) risulta infatti puramente arbitraria e spesso, come dimostrato dall'esperienza, dà luogo a previsioni non conservative.

Questo limite è fortemente avvertito a causa della continua evoluzione delle linee di trasporto di gas naturale, che tendono ad essere esercite con pressioni maggiori rispetto al passato, con spessori maggiori del tubo e realizzate con acciai sempre più resistenti e tenaci; si noti, ad esempio, come le diverse curve previsionali riportate in Fig. 1 mostrino forte disaccordo per valori di *Hoop-Stress* più elevati di 400 MPa, con cui oggi si tende ad esercire le linee di distribuzione del gas.

Un ulteriore importante limite di tali relazioni risiede nel carattere locale della tenacità, determinata per mezzo delle prove CharpyV, che non rispecchia pienamente il comportamento della lamiera durante la propagazione della frattura. Infatti, a causa alle dimensioni ridotte dei provini utilizzati nelle prove di resilienza, non è praticamente possibile valutare l'azione del legamento plasticizzato che precede la frattura, che nel caso dei gasdotti risulta molto esteso (fino diverse decine di centimetri); così come risulta fortemente locale la tenacità di un provino di sezione 10x10 mm² estratto da un lamiera che presenta spessori fino a 30 mm.

Da tutto ciò emerge la necessità di individuare un parametro, per prevedere il comportamento della frattura duttile, diverso da quelli finora utilizzati.

Tra i vari parametri recentemente proposti per la valutazione delle condizioni di arresto/propagazione della frattura duttile [5], l'angolo di propagazione della frattura (*Crack Tip Opening Angle*), in pratica l'angolo con cui le due nuove superfici di frattura emergono dall'apice, appare essere quello più promettente. L'adozione di un simile parametro, prettamente geometrico, deriva dalla considerazione che per materiali molto tenaci ci si può attendere uno stretto legame tra condizioni di propagazione e grado di deformazione plastica raggiunta [6,7]. La validità del CTOA è oramai riconosciuta ed accreditata sia in campo elastico che plastico sulla base del legame esistente tra questo ed i più classici parametri di meccanica della frattura come il fattore di intensità degli sforzi K [4] e l'integrale di Rice [8].

La determinazione del CTOA critico (*Resistance Force*) può essere ottenuta tramite misure di energia di propagazione della frattura durante prove di rottura per flessione su tre punti (Fig. 2) (*Drop Weight Tear Test*), realizzate su provini estratti in pieno spessore dalla lamiera delle tubazioni [8,9], mentre il valore di angolo rappresentativo della *Driving Force* può essere determinato tramite un calcolo di simulazione agli elementi finiti.

Attualmente è in fase di sviluppo un codice di calcolo, frutto della collaborazione fra il Centro Sviluppo Materiali e l'Università di "Tor Vergata" per la valutazione del CTOA risultante dalle condizioni di esercizio della condotta, in grado di riprodurre tutte le possibili condizioni di: pressione del gas, geometria della condotta e stato del terreno.

3. Effetto di contenimento del terreno

Come posto in evidenza nel paragrafo precedente, una delle principali limitazioni delle relazioni previsionali utilizzate risiede proprio nella loro forte base empirica, che non consente di valutare esplicitamente e singolarmente l'azione delle entità fisiche in gioco. Questo fa sì che, ad esempio, l'azione di contenimento del mezzo che circonda le condotte non sia definita fisicamente ma solo portata in conto con dei semplici coefficienti numerici, che sono rappresentativi delle sole particolari condizioni di prova adottate come riferimento. Risulta pertanto impossibile valutare l'azione di un terreno diverso da quello delle prove di scoppio. Questo tipo di approccio è il frutto di una convinzione abbastanza diffusa che considera significativa soltanto la presenza o la assenza del mezzo attorno alla condotta e la sua natura (terreno, acqua o aria), ma non la sua specificità. L'esperienza di alcune prove di scoppio condotte dal CSM ha però dimostrato che terreni differenti, con diversa consistenza o in diverse condizioni (sabbiosi, asciutti, bagnati o congelati) possono influire in maniera rilevante sulla *Driving Force* applicata, modificando le condizioni richieste per l'arresto della frattura.

In passato sono stati studiati modelli teorici semplificati, basati sul bilancio energetico, per valutare le modalità di propagazione della frattura nei gasdotti interrati, valutando in maniera fisica tutte le grandezze coinvolte; tra questi si cita il lavoro svolto dalla Università di Genova su commissione del Centro Sviluppo Materiali [1]. La complessità del processo ha imposto forti semplificazioni circa la geometria di apertura del tubo, assunta a priori con i lembi della frattura caratterizzati da un profilo lungo l'asse lineare e stazionario (Fig. 3), ed il comportamento del terreno, considerato come un mezzo omogeneo incoerente capace di dissipare energia per effetto dell'attrito interno (Fig. 3).

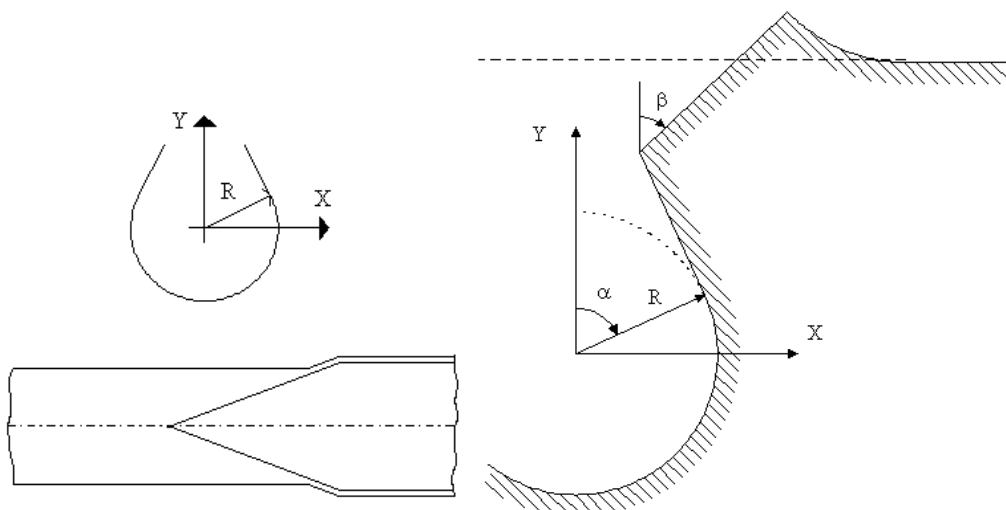


Figura 3 Geometria di apertura e deformazione del terreno circostante secondo [1].

Il bilancio energetico, considerato nell'unità di tempo, può essere espresso come:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dU}{dt} + \frac{dK}{dt} + \frac{dD_p}{dt} + \frac{dD_f}{dt} + \frac{dD_b}{dt}$$

in cui L è il lavoro del gas in espansione, U l'energia potenziale elastica della condotta, K l'energia cinetica delle pareti del tubo, D_p il lavoro di plasticizzazione delle pareti del tubo, D_f l'energia dissipata per effetto delle nuove superfici di frattura e D_b l'energia dissipata dal terreno (effetto backfill).

Questo modello globale, sebbene tenti di dare una base interpretativa fisica al fenomeno, ha in se delle semplificazioni troppo vistose sia nella cinematica imposta che nella stima delle forze agenti. Inoltre esso permette di valutare solamente le condizioni asintotiche di propagazione o arresto. Tutto ciò ne limita il pratico impiego come strumento previsionale, pur consentendo di trarre utili indicazioni sulla geometria di deformazione e scorrimento del terreno condizionata prevalentemente dalle forze di attrito interno.

Ulteriori informazioni sul comportamento del terreno si possono dedurre dalle prove di scoppio eseguite in piena scala su condotte interrato dal CSM, nelle quali viene studiata la propagazione di una frattura innescata lungo la generatrice superiore della condotta. Quest'ultima è interrata in una trincea a un metro di profondità e ricoperta da terra di riporto. Dall'analisi delle prove è stato possibile evincere alcune particolarità qui di seguito esposte. i) La porzione di terra sovrastante la condotta viene espulsa dal gas che fuoriesce, senza andare ad interagire con i lembi di tubo in apertura. ii) L'azione del terreno sulla condotta si esplica essenzialmente in un contenimento laterale, che fa assumere al tubo aperto una caratteristica forma ad 'U'; questo contenimento sembra dovuto in gran parte alla presenza delle pareti di terreno compatto che limita lo scavo della condotta, ed in parte dall'attrito interno del terreno di riporto, che viene in parte proiettato lontano. iii) Il terreno di riporto posto al di sotto ed a fianco della tubazione subisce una limitata deformazione di assestamento e viene compattato tra le pareti più rigide della trincea e la condotta stessa.

4. Modello numerico del backfill

Come detto, uno dei possibili modi per studiare il fenomeno in oggetto è basato sull'impiego di modelli di simulazione agli elementi finiti. E' possibile così utilizzare grandezze con chiaro significato fisico e che siano quindi facilmente definibili. Il modello che si ottiene va ovviamente tarato per mezzo dei dati sperimentali disponibili, ma, dopo tale procedura si può cercare di valutare il comportamento della condotta in qualsivoglia condizione di prova. Il calcolo restituisce il valore del CTOA applicato nelle condizioni scelte, fornendo così una stima della *Driving Force*.

Il codice agli elementi finiti sviluppato ha formulazione esplicita; in esso sono stati introdotti, oltre agli elementi shell non lineari che permettono la discretizzazione del tubo, elementi non lineari a parametri concentrati in grado di rappresentare gli effetti dissipativi ed inerziali propri del terreno circostante ciascun elemento della tubazione. Gli elementi di terreno consentono di modellare un ampio volume di terra attorno al tubo senza appesantire eccessivamente l'intero processo di calcolo.

Discretizzazione del volume di terra. Il volume di terreno discretizzato comprende soltanto quello che va ad interagire significativamente col tubo in apertura. In particolare, per riprodurre il comportamento delle prove di scoppio si è considerato il solo volume di terra compreso tra il tubo e la trincea di prova supposta rigida (rispetto alla deformabilità del terreno di riporto). Nel caso invece in cui il terreno attorno alla tubazione sia da ritenere ben compattato, si può valutare un adeguato volume cilindrico al di fuori del quale la deformabilità del terreno sia irrilevante e restringere la modellazione a tale cilindro. Dal volume del terreno considerato va escluso quello sovrastante la condotta ed espulso dal gas, racchiuso da piani inclinati secondo un angolo proporzionale a quello di attrito interno.

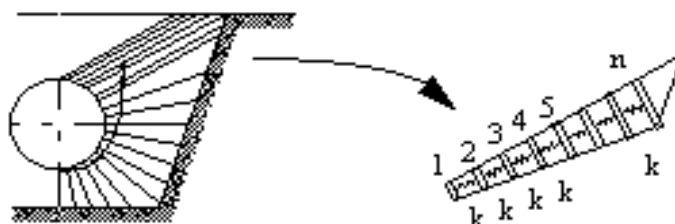


Figura 4 Schema di modellazione del terreno secondo elementi a parametri concentrati

Il terreno viene simulato utilizzando elementi non lineari a parametri concentrati disposti in serie; essi si sviluppano su di un piano ortogonale all'asse del tubo (vedi Fig. 4). Ad una delle estremità della serie, si ha l'interazione con gli elementi shell della condotta corrispondenti mediante forze di

contatto valutate con l'utilizzo di coefficienti di penalità. I nodi del terreno che così si generano hanno un solo grado di libertà definito, essendo imposta la direzione di eventuale spostamento lungo l'asse dei singoli volumi. Gli elementi terra sono pertanto non solidali al tubo, ma capaci di opporre un'azione di contenimento fintantoché persiste il contatto con la tubazione; alcuni di questi elementi (terreno sovrastante la condotta non delimitato dalla trincea rigida) sono espulsi una volta terminata la fase di contatto.

Caratterizzazione meccanica del modello di terreno. Il punto più delicato del modello di terreno introdotto riguarda la valutazione della rigidità a compressione equivalente del terreno. Da studi svolti nell'ambito della Geotecnica [10,11] è noto che un volume di terra sottoposto a compressione presenta un iniziale comportamento elastico lineare, fino al raggiungimento del limite di resistenza a taglio oltre il quale il materiale comincia a cedere scorrendo lungo i piani di massimo sforzo di taglio. Il valore del limite di resistenza dipende dalle caratteristiche del terreno, in termini di coesione ed angolo di attrito, nonché dalla tensione idrostatica presente. Avvenuto il primo cedimento, se non vi sono impedimenti al movimento, il terreno tende a subire forti deformazioni opponendo una resistenza dovuta essenzialmente all'attrito interno; al contrario, se esistono vincoli laterali del tipo di quelli sperimentati dal terreno al di sotto della condotta, si osserva una maggiore resistenza alla compressione che causa limitate deformazioni per assestamento con l'applicazione di carichi elevati.

Per simulare un simile comportamento è stato realizzato un elemento fortemente non lineare per riprodurre il più fedelmente possibile il caso reale (vedi Fig. 5). Tale elemento presenta una rigidità variabile e reagisce alla sola compressione senza ritorno elastico.

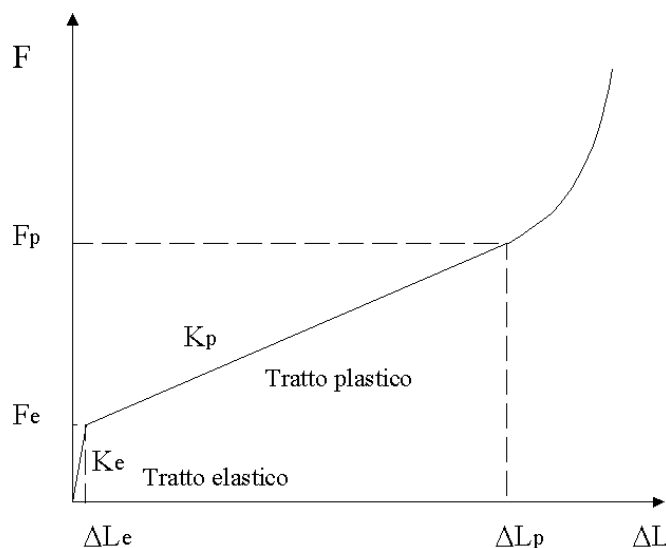


Figura 5 Rigidità caratteristica degli elementi di terreno nel modello di backfill.

La rigidità presenta un valore iniziale costante che riproduce il comportamento del terreno prima del collasso; questo valore K_e risulta proporzionale al modulo elastico del terreno (dato reperibile in letteratura per diversi tipi di terreni [9]) ed è valido fino ad una forza applicata F_e cui corrisponde il valore della tensione di collasso, determinata per un terreno non coesivo (effetto dell'attrito prevalente sulla coesione). Dopo tale valore, raggiunta una compressione pari a ΔL_e , la rigidità assume il nuovo valore K_p , considerevolmente minore, che rappresenta la resistenza opposta dal terreno durante lo scorrimento a seguito del collasso. In questo ultimo caso, il valore della rigidità ed il valore limite della forza applicabile F_p non sono definibili su basi teoriche o da tabelle esistenti, a causa della mancanza di studi adeguati in presenza di elevate sollecitazioni dinamiche associate a forti deformazioni di scorrimento. Per ottenere tali valori si è fatto uso dei dati sperimentali ottenuti dalle prove di scoppio in piena scala, sfruttando le misure di pressione nel terreno durante l'apertura delle pareti del tubo. Dalla valutazione della pressione sia sulla superficie esterna del tubo che ad una certa distanza da esso, si è potuto calcolare la velocità di propagazione delle deformazioni permanenti nel terreno. Con l'uso di tale dato, in aggiunta ad altre considerazioni, si è potuto stimare i valori di K_p e F_p . Per compressioni maggiori di ΔL_p la rigidità aumenta repentinamente, con andamento parabolico, evitando l'irrealistica compenetrazione tra masse di terra consecutive.

5. Simulazione di differenti tipi di terreno.

La modellazione del terreno viene pertanto realizzata mediante una serie di grandezze geometriche e meccaniche. Le prime comprendono la geometria della eventuale trincea, la profondità di interrimento del tubo, il numero di elementi a parametri concentrati in direzione radiale, secondo le modalità già descritte a seconda di presenza o meno di trincea. Le seconde comprendono la densità del terreno, il modulo elastico iniziale, il limite elastico, il modulo plastico, il limite plastico, ed infine l'angolo di attrito interno del terreno. Il significato fisico di tali parametri rende possibile la definizione delle grandezze meccaniche attraverso dati reperibili nella bibliografia scientifica, potendo così estendere l'analisi a terreni differenti,

anche se per alcune di queste, come detto, bisogna ricorrere a dati sperimentali.

Per quanto riguarda il numero degli elementi di terra che compongono ogni volume radiale, ad un maggior valore corrisponde una più realistica simulazione. Tuttavia, oltre un certo limite, l'uso di un numero dei elementi troppo elevato si ripercuote nel tempo di calcolo complessivo. Inoltre va rimarcato che se il singolo elemento diventa troppo corto questo può causare l'instabilità dell'algoritmo esplicito di calcolo con conseguente necessità di riduzione dello step di calcolo Δt . Una scelta orientativa della lunghezza del singolo elemento si ottiene imponendo che i tempi critici caratteristici tra elementi terra e shell siano in rapporto 1/100.

Tab.1: Caratteristiche meccaniche dei due terreni considerati.

	Terreno cedevole	Terreno compatto
Densità (kg/m ³)	1500	2100
Modulo elastico (MPa)	25.0	50.0
Limite elastico (MPa)	0.1	0.2
Modulo plastico (MPa)	1.5	4.2
Limite plastico (MPa)	0.4	1.4
Angolo di attrito interno	30°	45°

Per evidenziare l'influenza che differenti terreni possono avere sulla propagazione della frattura, sono stati approntati due modelli relativi a terreni sostanzialmente diversi. I due terreni sono l'uno molto compatto, per simulare il caso di una condotta in esercizio da anni, circondata da un terreno oramai consolidato; l'altro un terreno più cedevole, come essere quello di riporto utilizzato nelle prove di scoppio, prevalentemente sabbioso e poco compattato. Uno schema delle loro caratteristiche meccaniche è riportato in Tab.1.

Partendo dal modello tarato sui dati sperimentali sono state effettuate simulazioni relative ai due differenti terreni considerati. La frattura propaga con una velocità imposta pari a 150 m/s, la condotta ha diametro di 1422 mm (56") e spessore di 20 mm, è lunga 10 m ed è pressurizzata con aria alla pressione di 10 MPa. Tale condotta è posta ad un metro di profondità in una trincea larga 5 m in superficie, 3 m sul fondo e profonda in totale 2.8 m.

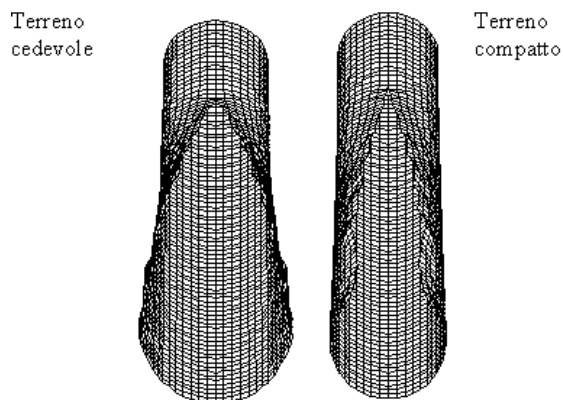


Figura 6 Effetto di terreni diversi sulla deformazione stazionaria del tubo.

Le simulazioni hanno fornito risultati molto distanti nei due casi analizzati, confermando l'importanza dell'effetto che il terreno, nelle diverse condizioni in cui può presentarsi, ha sulla dinamica della rottura nei gasdotti. In particolare il minor contenimento esercitato dal terreno 'cedevole' risulta chiaramente visibile nelle ricostruzioni dei tubi deformati (vedi Figg. 6 relative agli stessi istanti di tempo). Il terreno cedevole comporta un più alto valore di *Driving Force*, espresso in termini di CTOA, pari a circa 8 gradi contro i 6,5 del terreno compatto.

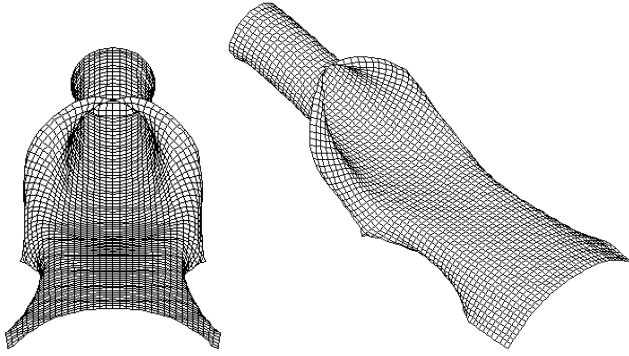


Figura 7 Deformazione del tubo in assenza di effetto backfill.

Una differenza della *Driving Force* di circa 1.5 gradi non è un valore trascurabile in simili fenomeni e può modificare completamente l'esito della propagazione della frattura duttile in un gasdotto interrato. Va rimarcato che nelle due simulazioni descritte si è utilizzata la medesima trincea, considerata rigida, di dimensioni piuttosto contenute, che ha pesantemente influito sulla deformazione complessiva attenuando le differenze nei due casi.

Può essere motivo di ulteriore interesse il confronto con un caso limite, relativo al medesimo tubo ora non interrato, nel quale pertanto l'effetto *backfill* è totalmente assente. In Fig. 7 viene riportato l'andamento della deformata in tali condizioni, relativa sempre al medesimo istante di tempo considerato in precedenza.

6. Conclusioni

Nel lavoro è stata descritta una metodologia per la simulazione del terreno circostante le tubazioni interrate durante la propagazione longitudinale di una frattura duttile. Si può ottenere un modello sufficientemente approssimato mediante l'uso di elementi a parametri concentrati che non appesantiscono eccessivamente il calcolo. Il modello prevede l'utilizzo di dati sui terreni parzialmente reperibili nella letteratura tecnica.

Dall'analisi comparata su prove condotte su terreni tra loro differenti si è potuto evidenziare la necessità di una corretta modellazione del terreno nei modelli previsionali che comportano l'uso di elementi finiti.

Bibliografia

- [1] *Modello meccanico per la determinazione delle condizioni di arresto o propagazione della frattura nei gasdotti interrati*, Contratto di ricerca N° 004838 4/4/1978, Voll. N° 1,2,3, Università degli studi di Genova, Istituto di Scienza delle Costruzioni, 1979.
- [2] P. Di Filippo, *Effetto di contenimento del terreno sulla propagazione della frattura duttile in gasdotti: simulazione e prove sperimentali*, Tesi di Laurea, Univ. di Roma "Tor Vergata, a.a. 1996-97.
- [3] M. F. Kanninen, T. Morrow, T. Grant, G. Demofonti, *The development and validation of a ductile fracture analysis model*, Southwest Research Institute final report, Maggio 1994.
- [4] D. Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff, Boston, 1983.
- [5] M.F. Kanninen, C.H. Popelar, *Advanced Fracture Mechanics*, Oxford Univ Press, June 1985.
- [6] A. A. Wells, *Unstable crack propagation in metals - cleavage and fast fracture*, Crack propagation Symposium, Cranfield, 1961.
- [7] A. A. Wells, *Application of fracture mechanics at and beyond general yielding*, British Welding Research Ass. Rep. M13, 1963.

[8] A. Martinelli, S. Venzi, *Tearing modulus, J-integral, CTOA and crack profile shape obtained from the load-displacement curve only*, Eng. Fract. Mech. Vol 53, N° 2, pp. 263-277, 1996.

[9] G. Demofonti, G. Buzzichelli, S. Venzi, M. Kanninen, *Step by step procedure for the two specimen CTOA test*, Proceedings of the 2nd International Pipeline Technology Conference, Vol. 2, Ostend, Belgium, 11-14 September, 1995.

[10] J. Bowles, *Fondazioni, progetto e analisi*, Mc Graw-Hill Libri Italia, Milano, 1994.

[11] K. Terzaghi, R. Peck, *Soil mechanics in engineering practice*, New York, John Wiley & Son Inc., 1948.

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

Versione HTML realizzata da

