

SVILUPPO DI UN APPROCCIO PROBABILISTICO PER LA VALUTAZIONE DELL'INTEGRITA' STRUTTURALE DEGLI OLEO/GASDOTTI

**Andenna, C., Gagliardi, R.V. Ludovisi, G.
Dipia, ISPEL, Via Urbana 167, Roma, 00184, Italia**

SOMMARIO

Il rilascio di sostanze pericolose da un oleo/gasdoto può determinare il verificarsi di un incidente rilevante, come dimostrato dalle analisi di dati incidentali riportate in letteratura. Da ciò consegue la necessità di investigare in maniera più approfondita le possibilità offerte dalle metodologie di analisi del rischio per la valutazione della sicurezza degli oleo/gasdotti adibiti al trasporto di sostanze pericolose, sia per gli aspetti relativi alla valutazione dell'integrità delle strutture, sia per gli aspetti relativi alla valutazione delle conseguenze di potenziali incidenti sull'uomo e sull'ambiente. Il lavoro proposto affronta la valutazione dell'integrità di un oleo/gasdoto danneggiato da graffi sulla superficie esterna, avendo assunto, sulla base delle risultanze delle analisi di dati incidentali, l'interferenza esterna, principalmente dovuta all'attività di terzi con l'utilizzo di macchine, tra le cause di danneggiamento più frequenti. Più precisamente viene sviluppata una metodologia per la valutazione della probabilità di rottura di un oleo/gasdoto in pressione danneggiato da un graffio orientato longitudinalmente, volta, in particolare, a determinare sia la probabilità di frattura (perdita o rottura) della condotta che la probabilità di propagazione della frattura stessa. Tale metodologia fa riferimento all'analisi affidabilistica per valutare l'integrità della struttura; essa implica la definizione e la valutazione delle condizioni di rottura e, conseguentemente, delle funzioni di stato limite. Nel lavoro proposto si assume un modello semiempirico di rottura, basato sulla meccanica della frattura, per caratterizzare il danneggiamento meccanico, e distribuzioni di probabilità per caratterizzare l'incertezza associata alle variabili casuali da cui dipendono le funzioni di stato limite. Tramite l'approccio metodologico sviluppato, applicato ad un caso studio, è possibile ricavare una stima della probabilità di rottura e del relativo indice di affidabilità, oltre ad una stima della probabilità di propagazione della frattura. I risultati ottenuti consentono di evidenziare spunti di riflessione significativi per la valutazione della integrità della struttura esaminata e, più in generale, per la prevenzione del rischio di incidente rilevante associato al trasporto in condotta di sostanze pericolose.

1.0 INTRODUZIONE

Nonostante il trasporto in condotta di sostanze pericolose sia generalmente considerato il mezzo di trasporto più sicuro ed economicamente conveniente, capace di movimentare ingenti quantitativi di sostanze pericolose (infiammabili, esplosive e/o tossiche), esso risulta potenzialmente in grado di determinare incidenti rilevanti, così come definiti dalla Direttiva Europea 96/82/EC "Seveso II". Infatti, l'analisi dei dati incidentali relativi agli oleo/gasdotti adibiti al trasporto di sostanze pericolose, effettuata dal Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea nel 1999 [1], ha evidenziato come le conseguenze di tali incidenti possano risultare paragonabili a quelle prodotte da incidenti negli impianti soggetti alla Direttiva Seveso II. Come esempio, si può citare l'incidente accaduto in Belgio nel 2004, in cui un'esplosione verificatasi in un gasdoto, probabilmente dovuta ad un danneggiamento meccanico causato da lavori edili in un impianto adiacente, ha determinato la morte di 20 persone e più di 100 feriti. Alcuni recenti consessi scientifici internazionali hanno riproposto il tema dell'incremento della sicurezza negli oleo/gasdotti a livello progettuale, costruttivo e gestionale, promuovendo la elaborazione e la diffusione di linee guida e/o di "best practices" al fine di armonizzare i diversi approcci esistenti alla gestione della sicurezza negli oleo/gasdotti. Si è così evidenziata la necessità di analizzare più approfonditamente le opportunità offerte dall'utilizzo delle metodologie di analisi di rischio sia per la valutazione dell'integrità strutturale degli oleo/gasdotti che per la valutazione delle possibili conseguenze sull'uomo e sull'ambiente di eventi incidentali ad essi associati. Come noto, la probabilità di rottura parziale o totale di un oleo/gasdoto in regime di esercizio, è uno degli input necessari per intraprendere l'analisi di rischio, oltre alla valutazione delle relative conseguenze. Per valutare la probabilità di rottura si può far riferimento all'analisi di affidabilità strutturale. Il presente lavoro è pertanto finalizzato allo sviluppo di un approccio probabilistico all'analisi di affidabilità strutturale per la valutazione dell'integrità di un oleo/gasdoto danneggiato da un graffio sulla superficie prodotta da

interferenza esterna. Tale circostanza viene presa in considerazione in base alle risultanze dell'analisi degli incidenti verificatisi nel passato, che hanno evidenziato come l'interferenza esterna, principalmente l'attività di terzi, risulti essere, insieme alla corrosione, la causa di danneggiamento più frequente per gli oleo/gasdotti [2]. Nel caso esaminato nel lavoro, il graffio determina l'inizio di una frattura, della quale si vuole pertanto valutare sia la probabilità di accadimento che la probabilità di propagazione lungo la condotta. A tal fine si rende necessaria la valutazione della tensione di frattura e della funzione stato limite, che definisce la condizione in cui la struttura non soddisfa più alcuni particolari requisiti di progetto, e quindi il criterio di rottura per la struttura esaminata. Nell'approccio metodologico sviluppato si assumono due modelli semiempirici, uno per la crescita della frattura attraverso lo spessore dell'oleo/gasdotta, l'altro per la propagazione della frattura lungo la condotta. Si perviene in tal modo ad una stima della probabilità di avere una perdita e della sua propagazione lungo la condotta stessa, assumendo una distribuzione normale delle principali proprietà meccaniche del materiale e differenti condizioni operative. Si determina inoltre una stima dell'indice di affidabilità (β), che rappresenta una misura della sicurezza dell'oleo/gasdotta. Tramite i risultati ottenuti è possibile evidenziare come l'approccio probabilistico all'analisi di affidabilità strutturale possa fornire informazioni significative a supporto del processo decisionale volto a determinare le condizioni di esercizio ottimali nel ridurre la frequenza di accadimento degli incidenti rilevanti. Inoltre, l'indice di affidabilità, può essere utilizzato per stabilire le priorità di intervento in un oleo/gasdotta danneggiato, ed ottimizzare un eventuale programma di gestione e/o di ispezione [3].

2.0 METODOLOGIA

Il lavoro presenta una analisi di affidabilità di una condotta nella quale un tubo è stato danneggiato da un'interferenza esterna con la formazione di un graffio longitudinale, cioè lungo l'asse del tubo. Questo tipo di difetto è rilevante in quanto è equiparabile alla formazione di una cricca nello spessore del tubo che, come noto, riduce la resistenza meccanica della struttura. L'orientamento della cricca lungo l'asse del tubo corrisponde alla condizione normalmente più severa, in cui le tensioni che tendono ad aprire la cricca risultano massime. L'analisi è stata suddivisa in due parti: la prima è relativa alla propagazione della cricca attraverso lo spessore del tubo, circostanza che implica la fuoriuscita di sostanze esplosive, infiammabili o tossiche, con potenziali danni alle persone, all'ambiente, ai beni materiali; la seconda è relativa alla propagazione della cricca lungo il gasdotto con evidente aggravamento delle possibili conseguenze sia per entità che per estensione, anche geografica, dei danni. La propagazione della frattura lungo la condotta è necessariamente originata dalla formazione di un difetto passante tuttavia tale condizione non è sufficiente, infatti si possono avere scenari in cui la perdita rimane circoscritta. Il presente lavoro non analizza le condizioni necessarie per cui un difetto passante comincia a propagarsi lungo la condotta, bensì la circostanza in cui è in già atto la propagazione stessa. In corrispondenza di ciascuna fase, i risultati vengono presentati sia come probabilità di accadimento del fenomeno sia in termini dell'indice di sicurezza o di affidabilità (β); tale indice viene calcolato utilizzando la funzione di distribuzione cumulativa normale Φ in base alla seguente espressione:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (1)$$

dove P_f è la probabilità di crescita del difetto. Per lo sviluppo del modello si sono definite due funzioni di stato limite (LSF), una per la crescita della cricca attraverso lo spessore del tubo e l'altra per la propagazione della frattura lungo la condotta. Le grandezze fisiche utilizzate nella descrizione dei fenomeni sono state assunte o esattamente determinate, o parametrizzate o, infine, statisticamente distribuite. I modelli sono stati sviluppati secondo un metodo Monte Carlo in ambiente matlab. L'approccio metodologico sviluppato è stato applicato ad un oleo/gasdotta costruito in acciaio di grado API X70, considerato rappresentativo dei moderni acciai impiegati nelle condotte sia per resistenza che per tenacità.

2.1 Prima fase: probabilità di frattura attraverso lo spessore della condotta.

Il lavoro si basa sulla formulazione semiempirica della tensione di frattura per graffi orientati longitudinalmente in acciai ad alta tenacità, cioè caratterizzati da una tensione di Charpy-V, e cioè di resilienza del materiale, superiore a 60 J/cm^2 , sviluppata presso il Battelle Memorial Institute negli anni 60 e 70 [4]. In base alla formulazione Battelle, la tensione (σ_f) per la quale si ha l'avanzamento della cricca, e quindi la condizione di rottura, è data dalla seguente equazione:

$$\sigma_f = \sigma_0 \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{(t \cdot M)}} \right] \quad (2)$$

con M pari a:

$$M = \sqrt{1 + 0.40 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^2} \quad (3)$$

d e 2c rappresentano rispettivamente la profondità e la lunghezza della cricca; t ed R sono lo spessore e il raggio del tubo; $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ è la tensione di flusso; σ_y è la tensione di snervamento e σ_u la tensione di rottura. Il fattore M, detto fattore di Folias, è espresso nella equazione 3 che rende conto dell'intensificazioni degli sforzi nella zona del graffio. Dato l'orientamento longitudinale della cricca, la tensione di apertura (σ_a) che si esercita su di essa è data, con buona approssimazione e trascurando gli effetti dovuti alle tensioni residue, dalla legge di Mariotti per la tensione circonferenziale (σ_h):

$$\sigma_a = \sigma_h = \frac{pR}{t} \quad (4)$$

dove p indica la pressione di esercizio della condotta. Tale pressione può inoltre essere collegata alla cosiddetta frazione di utilizzo (UF), indice della pressione di esercizio della condotta, dalla relazione $UF = \sigma_h / SMYS$ dove SMYS indica la tensione nominale di snervamento. La funzione di stato limite (Z_c) nel caso della crescita della cricca attraverso lo spessore del tubo può quindi essere definita come:

$$Z_c = \sigma_f - \sigma_a \quad (5)$$

La stabilità del difetto è descritta da valori positivi di Z_c . mentre quelli negativi indicano la sua crescita. La probabilità di frattura viene espressa come rapporto tra gli eventi corrispondenti a valori di Z_c negativi ed il numero di eventi considerati.

2.2 Seconda fase: probabilità di propagazione della frattura lungo la condotta

Una volta che si è generata una frattura attraverso lo spessore del tubo si ha una certa probabilità che la rottura non si arresti ma anzi cominci a propagarsi lungo la condotta. Lo studio di questa fase è estremamente complesso ed esistono più formulazioni teoriche che tengono conto dei vari meccanismi che concorrono al fenomeno. Nel presente articolo viene utilizzato l'approccio noto come formulazione semplificata Battelle per valutare la resistenza strutturale di un tubo in pressione danneggiato da un graffio:

$$Cv_{aB} = 3.5766 \cdot 10^{-5} \sigma_h^2 (Rt)^{1/3} \quad (6)$$

dove Cv_{ab} rappresenta l'energia di Charpy-V necessaria per avere l'arresto della frattura e σ_h è la tensione circonferenziale agente sul tubo sopra definita. Questa relazione fornisce una risposta qualitativamente in linea con i dati sperimentali derivanti da prove di scoppio eseguite in piena scala [5], [6]. Tuttavia, nel caso di acciai di buona tenacità, i valori di tenacità che vengono predetti sono una sottostima di quelli realmente misurati. Tale formula è stata quindi corretta tramite un best fit lineare con i dati riportati in letteratura [5] e i valori di Charpy-V teorici per avere l'arresto di una frattura che si sta propagando sono stati correlati a quelli predetti dalla formula Battelle secondo la relazione:

$$Cv_a = a \cdot Cv_{aB} - b \quad (7)$$

dove $a = 1.738 (\pm 0.007)$ e $b = 43 (\pm 28)$.

Come nel caso precedente è stata introdotta una funzione di stato limite definita come:

$$Z = Cv_m - Cv_a \quad (8)$$

dove Cv_m sono i valori di Charpy-V del materiale. Valori di Z positivi indicano il verificarsi delle condizioni di arresto della frattura. La probabilità di propagazione viene espressa come rapporto tra gli eventi corrispondenti a valori di Z negativi ed il numero di eventi considerati.

3.0 CASO STUDIO

Il modello descritto è stato applicato ipotizzando una condotta costruita con acciai di grado API X70. Nella Tabella 1 sono riassunte le caratteristiche meccaniche del materiale e nella Tabella 2 le grandezze geometriche del tubo e dei difetti considerati.

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche dell'acciaio

SMYS [MPa]	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	Cv_m [J/cm ²]
482	500 ± 10 [min 482, max 510]	590 ± 10 [min 570, max 620]	$120 \div 300 \pm 10$ (30)

Per le tensioni di snervamento e di rottura si è considerata una distribuzione normale troncata ai valori minimo e massimo riportati nella Tabella 1, mentre nella Figura 1 sono riportati gli istogrammi corrispondenti.

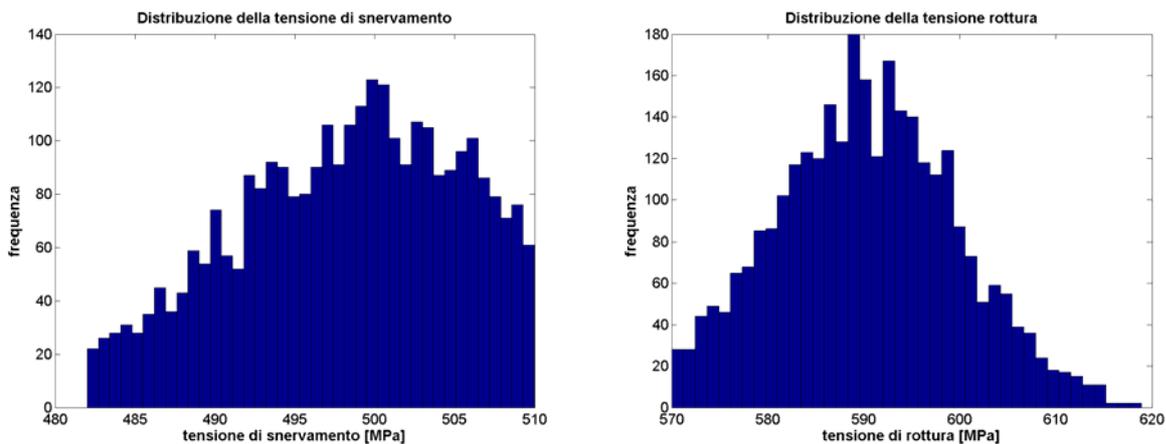


Figura 1. Istogrammi della tensione di snervamento e di quella di rottura

I valori di Charpy-V del materiale, utilizzati nel modello di propagazione della frattura, sono stati fatti variare nell'intervallo tra 120 e 300 J/cm² assumendo per ogni valore una distribuzione normale e distinguendo due casi caratterizzati rispettivamente da una deviazione standard pari a 10 e 30 J/cm².

Tabella 2. Caratteristiche geometriche del tubo e dei difetti considerati

R [mm]	t [mm]	d [mm]	2c [mm]	σ_i /SMYS [%]
457	25	10 ÷ 20	200 - 250 - 300	50 - 60 - 70 - 80

Il modello di crescita della cricca attraverso lo spessore è stato applicato in condizioni diverse, facendo variare la profondità iniziale e la lunghezza del graffio per varie pressioni di esercizio della condotta. In particolare la profondità del graffio è stata fatta variare tra 10 e 20 mm mentre per la lunghezza sono state considerate le tre dimensioni riportate nella Tabella 2. Le pressioni di esercizio considerate sono state quelle corrispondenti, secondo la legge di Mariotti, ad una percentuale di tensione circonferenziale pari al 50, 60, 70 e 80% della tensione nominale di snervamento.

4.0 RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Risultati ottenuti: propagazione della frattura attraverso lo spessore della condotta

L'analisi mostra, come atteso, che la probabilità di frattura aumenta all'aumentare delle dimensioni del graffio, come evidenziato in Figura 2. I valori ottenuti dimostrano in particolare che la transizione tra una crescita fortemente probabile ed una altamente improbabile avviene per una variazione minima della profondità iniziale del graffio, che, nel caso esaminato, è dell'ordine del millimetro. Sensibile appare anche la dipendenza della probabilità in esame dalla lunghezza del difetto; ad esempio, nella zona di transizione riportata nella figure, la probabilità di propagazione varia di circa 5 ordini di grandezza nel passare da un graffio di 200 a uno di 250 mm di lunghezza indipendentemente dal carico applicato alla struttura. Il carico invece, al suo aumentare, trasla le curve verso valori di profondità del graffio minori in maniera abbastanza sensibile.

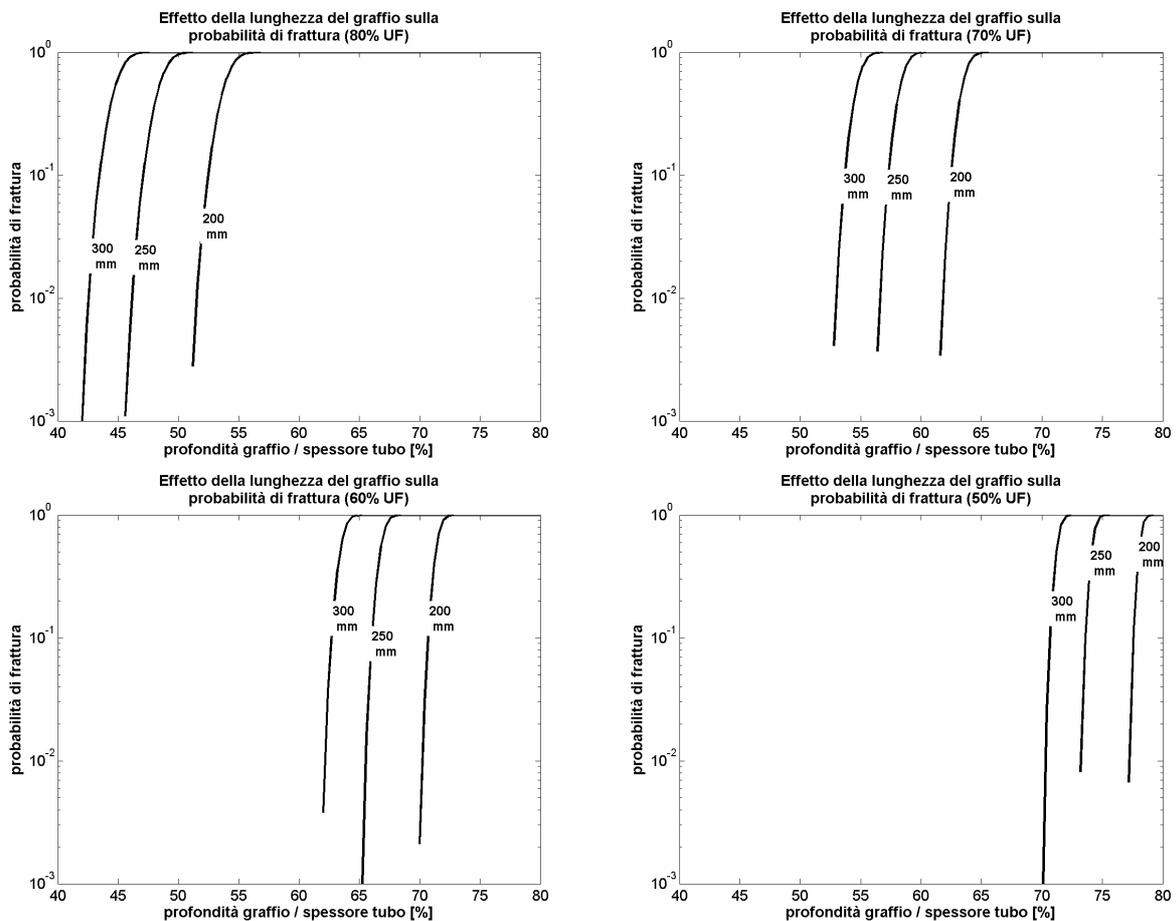


Figura 2. Andamento della probabilità di crescita della cricca attraverso lo spessore al variare della lunghezza del graffio e delle condizioni di esercizio

L'indice di affidabilità (β), riportato Figura 3, riflette le osservazioni sopra riportate relativamente alla probabilità di crescita del difetto. Si osserva che le curve, soprattutto nel caso dei carichi più elevati, mostrano un andamento non lineare, come invece atteso nel caso di distribuzioni normali, imputabile alle limitazioni imposte ai valori minimo e massimo delle curve di distribuzione utilizzate. I risultati mostrano quindi che la probabilità di crescita della cricca attraverso lo spessore del tubo, con la conseguente fuoriuscita delle sostanze trasportate, è fortemente influenzata dalle dimensioni iniziali del graffio e dalla pressione di esercizio della condotta. Questo fatto riflette la severità del difetto considerato, dal momento che il graffio è assimilabile ad una cricca, tipico difetto non tollerabile in una struttura che una volta individuato deve essere rimosso [7]. La ripidità mostrata dalle curve di probabilità evidenzia la difficoltà nel misurare la

profondità iniziale di un graffio corrispondente ad una probabilità prestabilita per la crescita della cricca. Infatti, nella zona di transizione, variazioni del decimo di millimetro possono influenzare significativamente tale probabilità mentre precisioni di misura inferiori al millimetro sono estremamente difficili da raggiungere. Inoltre la presenza di un graffio, che potrebbe essere ritenuto trascurabile sulla base delle analisi qui riportate, deve essere valutata anche alla luce della sua crescita a causa di altri effetti come, principalmente, la corrosione.

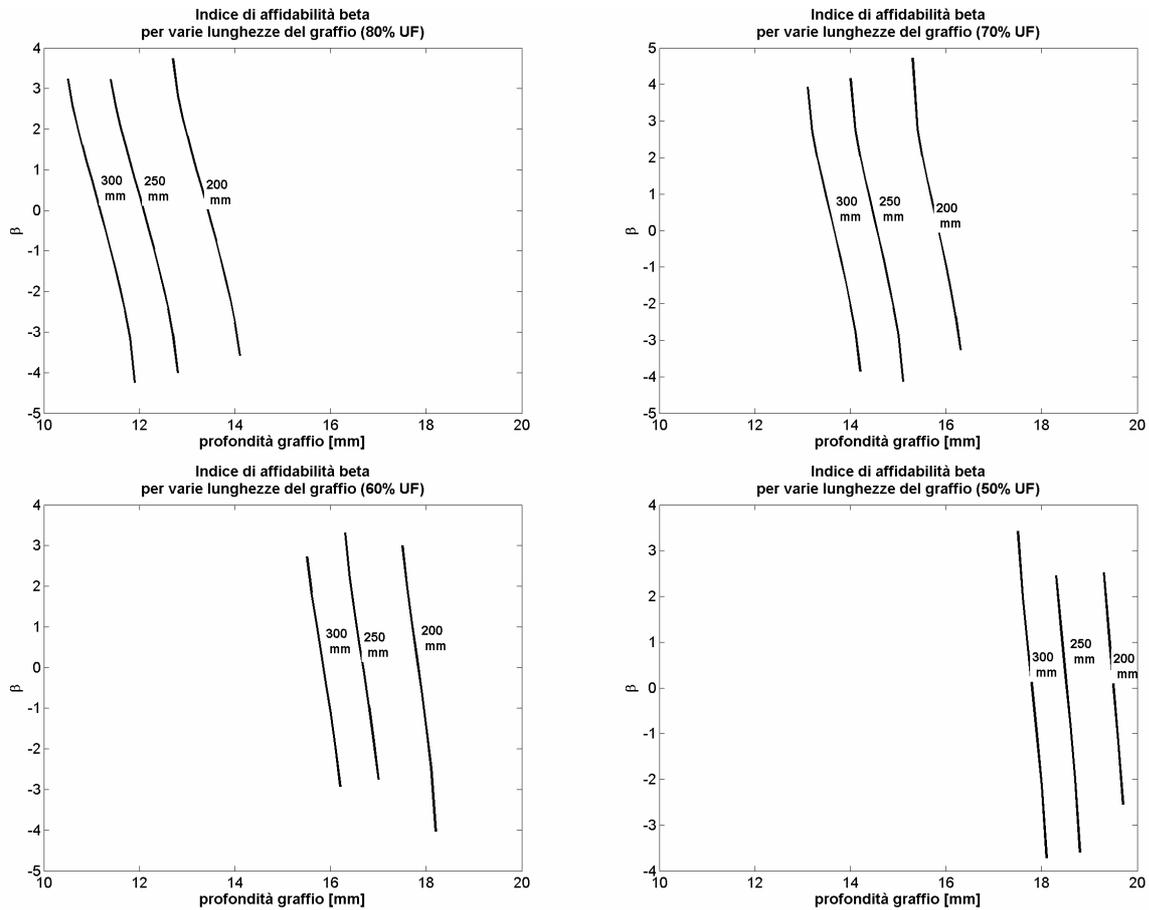


Figura 3. Andamento dell'indice di affidabilità (β) al variare della lunghezza del graffio e delle condizioni di esercizio

4.2 Risultati ottenuti: propagazione della frattura lungo la condotta

In Figura 4 sono riassunti i risultati ottenuti sulla probabilità di propagazione della frattura. I grafici mostrano in parte un andamento spezzato a causa del numero ridotto di eventi che sono stati elaborati ai valori di probabilità più bassi; ciononostante si possono trarre alcune considerazioni generali.

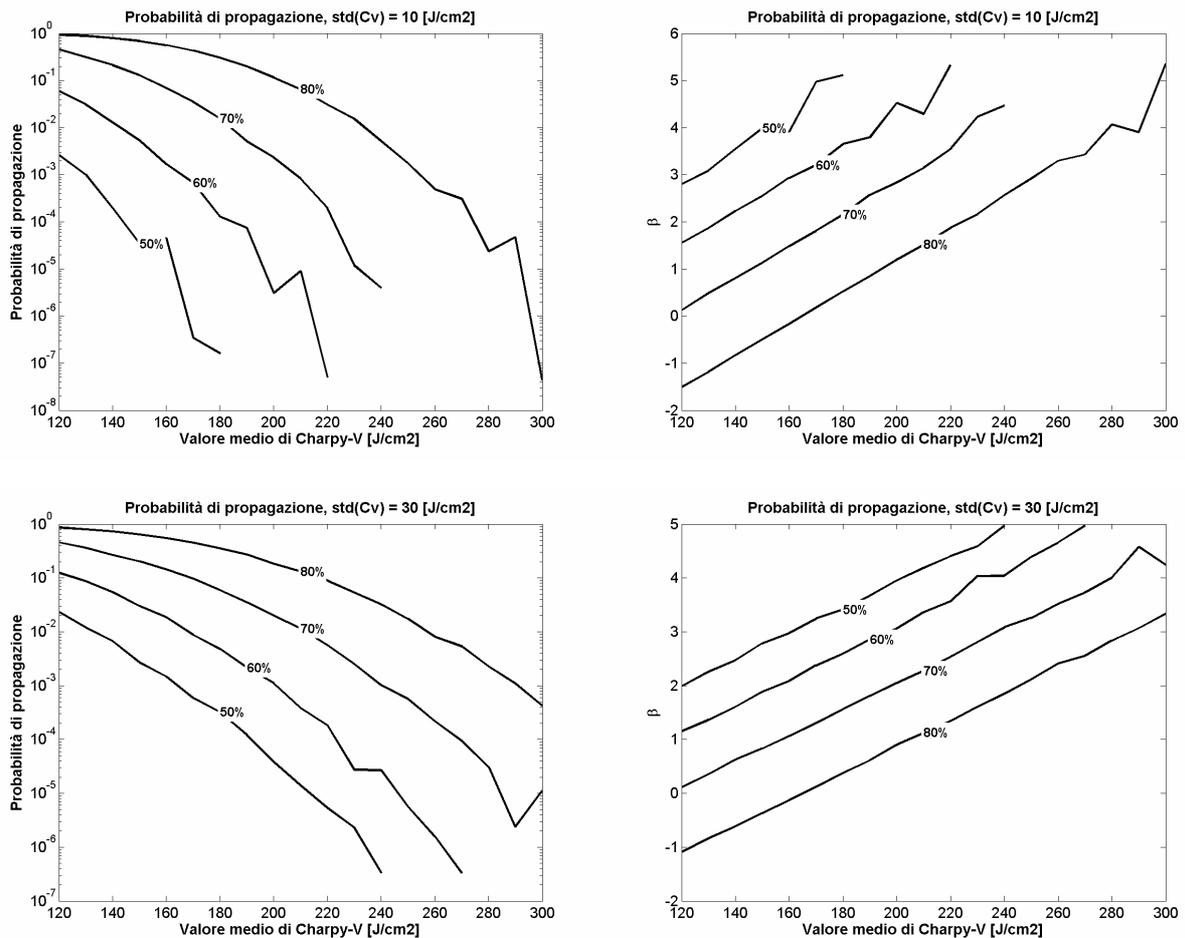


Figura 4. Andamento della probabilità di propagazione della frattura lungo la condotta e del corrispondente indice di affidabilità (β) al variare della deviazione standard della tenacità del materiale e delle condizioni di esercizio

La probabilità di propagazione della frattura lungo la condotta, per valori fissati di tenacità, aumenta, come atteso, all'aumentare della pressione di esercizio, mentre tenacità sempre più elevate sono necessarie per avere la stessa probabilità di arrestarne l'avanzamento, Figura 4. L'effetto della pressione di esercizio risulta alquanto rilevante; infatti, fissando per esempio una probabilità di propagazione pari a 10^{-3} , passare da una sollecitazione corrispondente al 50% ad una pari all'80% della SMYS richiede un corrispondente incremento della tenacità media del materiale di circa 130 J/cm^2 . Anche il valore della deviazione standard attribuito ai singoli valori medi di tenacità, che vuole descrivere l'andamento sperimentale che si osserva nelle prove di resilienza [8], incide direttamente sul calcolo delle probabilità. In particolare la probabilità di propagazione aumenta all'aumentare dell'incertezza mentre l'indice di affidabilità diminuisce. La dipendenza, alquanto significativa, della probabilità di propagazione dalla tenacità del materiale e dalla pressione di esercizio indica che livelli di affidabilità 'accettabili' possono essere ricercati sia attraverso l'impiego di acciai moderni con alti valori di tenacità all'impatto sia attraverso una riduzione delle pressioni di esercizio. Il primo metodo è chiaramente utilizzabile in fase di progettazione e/o ammodernamento di una condotta e giustifica ancora di più la necessità di sviluppare acciai con elevate caratteristiche di tenacità. Una indicazione interessante deriva inoltre dalla sensibilità allo sparpagliamento dei valori medi di resilienza. In particolare si osserva come materiali con minore dispersione risultino migliori. Questo fatto di nuovo richiede la necessità di sviluppare acciai aventi caratteristiche meccaniche spazialmente uniformi e con processi di fabbricazione in grado di garantire una loro buona costanza da un tubo all'altro. L'obiettivo di riuscire ad arrestare la propagazione della frattura nel primo o nei primissimi tubi appare quindi perseguibile tramite l'impiego di tubi di acciaio di alta qualità. Studi approfonditi sembrano comunque ancora necessari perché se da una parte l'impiego di acciai tenaci può essere motivato da problemi di sicurezza, dall'altro il loro impiego potrebbe essere desiderabile per aumentare le pressioni di esercizio e quindi i vantaggi

economici della gestione delle condotte. In questa direzione si ha anche lo sviluppo di acciai di più alto grado (API X100 ed oltre) che tuttavia possono aprire tematiche nuove come ad esempio è stato il caso della 'correzione' che nel presente lavoro si è scelto di apportare alla formula Battelle semplificata.

5.0 CONCLUSIONI

Il lavoro presenta un modello per l'analisi di affidabilità di una condotta sia dal punto di vista della formazione di possibili perdite a seguito di una interferenza esterna sia della possibilità di contenimento di una frattura che si sta propagando lungo la condotta stessa. Il secondo fenomeno può, evidentemente, essere generato dal primo ma potrebbe anche essere dovuto ad altre cause, come la corrosione. Un caso studio è stato preso in esame per verificare l'efficacia del modello. Esso evidenzia alcuni aspetti già noti, ad esempio l'influenza della pressione di esercizio sull'affidabilità della condotta, ma ha anche evidenziato la significatività di alcuni parametri rispetto ad altri. Infine la propagazione della frattura è risultata sensibile alla disomogeneità nelle caratteristiche di tenacità dell'acciaio che, oltre a poter evidentemente influenzare l'insorgere di difetti locali di varia natura, agisce anche direttamente sui valori di probabilità. L'analisi proposta può consentire la individuazione di elementi di riflessione da utilizzare a supporto del processo decisionale connesso alla scelta delle condizioni operative ottimali ai fini della sicurezza.

RIFERIMENTI.

1. Papadakis G.A., Review of transmission pipeline accidents involving hazardous substances, Report EUR 18122, Institute for Systems, Informatics and Safety, JRC ISPRA, 1999.
2. 6th EGIG-Report Gas pipeline incidents, Doc. Number EGIG 05.R.0002, December 2005.
3. Santosh, Gopika, V., Shrivastava, O.P, Saraf, R.K., Ghosh, A.K., Kushawaha, H.S., Reliability analysis of pipelines carrying H₂S for risk based inspection of heavy water plants, Reliability Engineering and System safety, 2006, pp. 163-170.
4. Kiefner, J.F., Maxey, W.A., Eiber, R.J., Duffy, A.R, The failure stress levels of flaws in pressurised cylinders, ASTM STP 536, Philadelphia, 1973.
5. Mannucci, G., Demofonti, G., Hillenbrand, H.G., Fracture properties of API X 100 gas pipeline steel, Europipe, EP-TP, 2001.
6. Buzzichelli, G. Scopesi, L., Fracture propagation control in very high strength gas pipelines, La Revue de Métallurgie-CIT Novembre 2000, pp. 1409-1416
7. API Specification 5L, Forty-first edition, April 1, 1995
8. Graf, M., Vogt, G., Experiences with thick walled offshore pipelines, 9th International Conference and Exhibition, Europipe, 3-5 november, 1997.