

## Interazione tubazione-terreno in pendii instabili

Maurizio Spinazzè\*, Roberto Bruschi\*,  
Giovanni Giusti\*\*

### Sommario

Il monitoraggio di pendii e di tubazioni è spesso necessario per conoscere in anticipo la formazione di tensioni o deformazioni, inaccettabili per una condotta che attraversa aree collinari instabili. Recentemente lo strumento della modellazione numerica si è affiancato alle misure in campo fornendo una base razionale al progetto dei sistemi di monitoraggio, utili a controllare lo sviluppo di inammissibili deformazioni della tubazione e l'efficacia di interventi di salvaguardia.

Lo scopo di questa memoria è discutere l'uso di modelli strutturali nella gestione della rete gas della SNAM e, in particolare, un'applicazione per ottimizzare la posizione di sezioni estensimetriche a corda vibrante su una condotta in esercizio.

### 1. Introduzione

Frequentemente, in Italia le tubazioni attraversano aree collinari dove pendii poco acclivi si muovono lentamente, causando, in dipendenza della geometria della tubazione interrata, lo sviluppo di deformazioni inammissibili ed innescando modi diversi di rottura [BRUSCHI *et al.*, 1995].

La gestione di una rete complessa di metanodotti, lunga più di 25000 Km, richiede il passaggio da un criterio di manutenzione basato sul monitoraggio e sugli interventi dedicati ad un preventivo con sistemi di diagnostica avanzata. In particolare, i sistemi predittivi sono necessari sia per una razionale progettazione del monitoraggio sia per la pianificazione di soluzioni alternative. In particolare, tentativi sono stati fatti allo scopo di sviluppare modelli di analisi dei processi deformativi dei pendii [PICARELLI *et al.*, 1995; SAKELLARIADI *et al.*, 1996]. La mancanza di conoscenza del comportamento meccanico delle frane e l'incertezza della scelta dei parametri da inserire nel modello numerico inducono all'attenzione nell'uso di tali strumenti [BUGHI *et al.*, 1996].

BRUSCHI *et al.* [1995] riportano i risultati di una serie di simulazioni elaborate con l'ausilio degli ele-

menti finiti che evidenziano l'influenza dei parametri geometrici della frana sugli stati tensionali nella tubazione.

D'altra parte, la simulazione numerica dei movimenti dei terreni è stata condotta assieme alla caratterizzazione accurata del pendio ed al monitoraggio dei fattori attivi [GIUSTI *et al.*, 1996].

Una sistematica supervisione dell'andamento della deformazione nella tubazione e dei movimenti del pendio consente razionali decisioni sulla criticità d'ogni situazione e talvolta porta ad interventi di scarico come lo scavo intorno ad essa o interventi di stabilizzazione del pendio [ad esempio, OLCESE *et al.*, 1991], mentre in casi estremi si opera il taglio della condotta o la sostituzione di una o più barre [BRUSCHI *et al.*, 1996]. I pochi imprevedibili incidenti si verificano sempre nelle aree dove è molto difficile anticipare il trend negativo. Questa è la motivazione alla base delle attività di ricerca.

Quest'articolo discute l'uso della modellazione strutturale per localizzare le sezioni estensimetriche in una tubazione, allo scopo di controllare l'insorgenza e lo sviluppo di deformazioni causate dal movimento del pendio.

### 2. Modellazione strutturale

Le tensioni aggiuntive nella tubazione, create da movimenti del terreno, sono funzione del tipo di terreno, della geometria del movimento, delle caratteristiche della tubazione e della sua configurazione e dei suoi carichi funzionali. Un modello ad elementi finiti può essere impostato per studiare il comportamento strutturale e i meccanismi di rottura della tubazione per spostamenti laterali e longitudinali imposti dal terreno [BRUSCHI *et al.*, 1995].

Il terreno intorno alla tubazione è modellato come una terna di molle, con comportamento elastico non lineare-plastico, agenti nelle tre direzioni ortogonali in ogni nodo (Fig. 1). La molla assiale è parallela all'asse della tubazione e dà la forza longitudinale totale come funzione dello scorrimento differenziale.

Le molle verticale ed orizzontale sono perpendicolari all'asse della tubazione e danno, rispettivamente, la forza verticale e trasversale come funzione dei movimenti differenziali verticale ed orizzontale. Le molle sono collegate ad una estremità di ogni nodo ed all'altra al terreno.

L'azione del movimento del terreno è così trasferita alla tubazione, applicando gli spostamenti valutati con l'analisi geotecnica dei movimenti del pendio all'estremità della molla legata ad esso. Al crescere degli spostamenti relativi terreno-tubazione, cresce il carico trasferito dal terreno alla tubazione fino al valore della resistenza ultima, quando essa

\* Snamprogetti S.p.A..

\*\* Snam S.p.A.

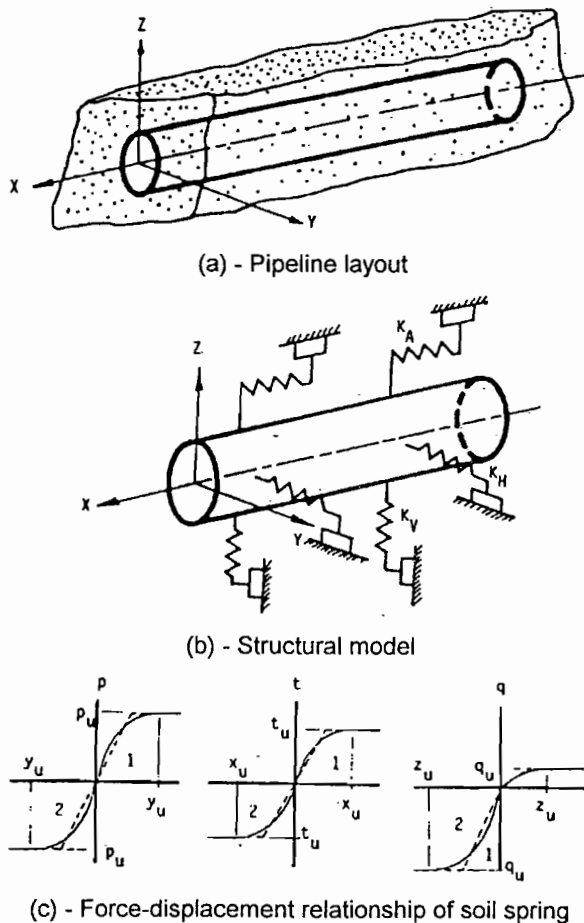


Fig. 1 – Modellazione dell'interazione tubo-terreno.  
Fig. 1 – Structural modelling of soil-pipe interaction.

è interamente mobilitata ed il terreno intorno alla tubazione si deforma plasticamente.

La resistenza ultima del terreno dipende dalla sua natura: in terreni coesivi, dalla resistenza non drenata, in quelli non coesivi dall'angolo d'attrito e dal coefficiente di pressione a riposo. Per valutare la resistenza ultima si possono usare i modelli sviluppati da BEA [1985] per terreni argillosi e da TRAUTMANN e O'ROURKE [1985] per terreni non coesivi.

Lo stato tensionale nella tubazione dipende dalla distribuzione dei carichi trasferiti dai movimenti del terreno. Nelle argille, la resistenza longitudinale ultima è proporzionale alla coesione non drenata mediante un coefficiente di adesione  $\alpha = 0.5 (\sigma'_v / C_u)^{0.45}$  [SLADEN, 1992].

KENNEDY *et al.* [1977]; RIZKALLA e MCINTYRE [1991]; RIZKALLA *et al.* [1992]; PAULIN *et al.* [1995] suggeriscono metodi di valutazione dei carichi attritivi, che sono legati al rapporto altezza del ricoprimento/ diametro.

ALTAEE e BOIVIN [1995] dimostrano la dipendenza della forza ultima dalla velocità di carico. Infine, la variazione delle condizioni di saturazione del terreno intorno alla tubazione e la variazione stagionale della temperatura della tubazione e del terreno

possono comportare effetti addizionali considerevoli, come dimostrato da recenti esperienze.

Nel caso in esame, il terreno è coesivo: la coesione non drenata è 22kPa, l'altezza del ricoprimento è 1.2m, la resistenza assiale ultima è 42kN/m. Si assume lo spostamento ultimo delle molle pari a 5mm.

### 3. Applicazione

Il ruolo della modellazione strutturale di tratti di tubazione posati in aree caratterizzate da movimenti lenti del terreno è:

- uno strumento che consente di studiare ogni layout;
- una base razionale per determinare l'opportuna collocazione delle sezioni estensimetriche;
- uno strumento di integrazione e di collegamento dei dati degli estensimetri e degli inclinometri allo scopo di definire il modello strutturale che interpreta meglio il processo deformativo e il suo andamento.

Esempi di applicazioni del primo e del terzo tipo sono descritti da BRUSCHI *et al.* [1995; 1996], mentre di seguito si discute una applicazione del secondo tipo.

Il controllo dell'andamento dello stato tensionale di un tratto di gasdotto (tubazione DN24in. - 606.9mm, spessore 10.3mm, 12.3 mm nelle curve) collocato lungo il versante destro del Torrente Miscano è stato deciso sulla base di una modellazione ad elementi finiti, sviluppata su una serie di dati rilevati a tubi inclinometrici dalla SNAM nel periodo 1993-1995 (Figg. 2, 3).

Una serie di calcoli è stata effettuata per simulare il possibile sviluppo delle tensioni generate nella tubazione dai movimenti relativi del terreno.

I dati disponibili non consentivano la definizione esaustiva del fenomeno sicché è stato necessario formulare alcune ipotesi.

#### 3.1. Descrizione del sito e modello interpretativo dei movimenti del terreno.

La frana che coinvolge il versante destro del Torrente Miscano (Fig. 2) si estende per circa 500 metri e include una zona attiva centrale di circa 200 metri.

Sono disponibili i dati di sei inclinometri, la collocazione dei quali è indicata nelle figure 3 e 4, che, però, non consentono di definire completamente la distribuzione e l'evoluzione del movimento in atto.

Comunque essi permettono di fare osservazioni significative:

- il pendio si muove in direzione parallela all'asse della tubazione e le ultime misure mostrano due

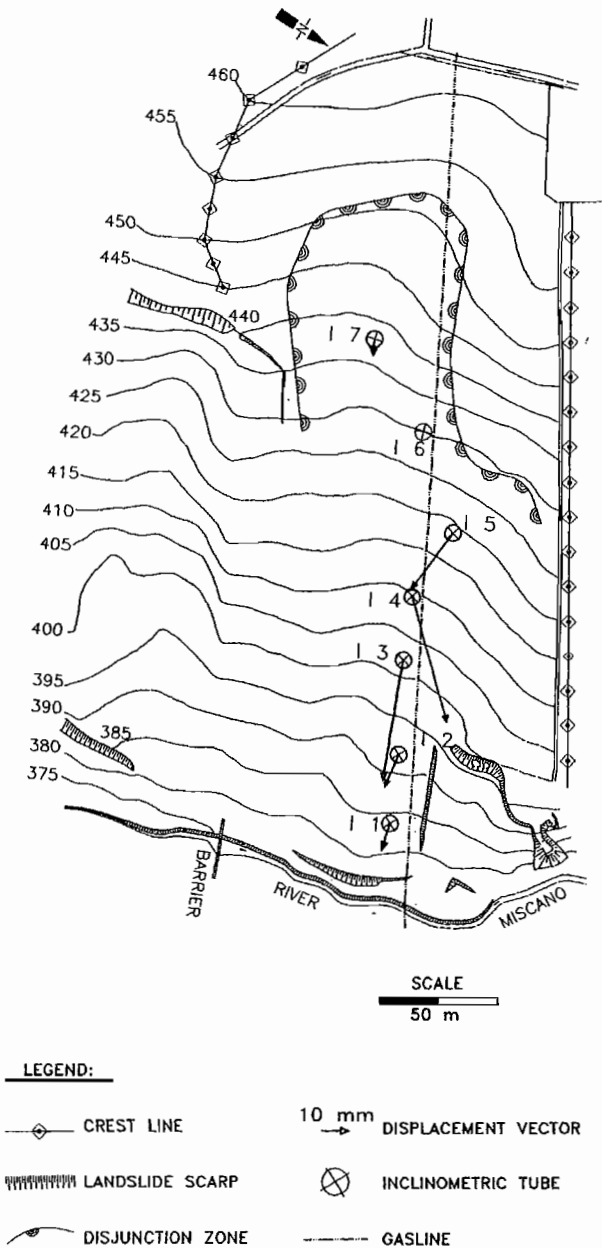


Fig. 2 - Frana di Miscano.  
Fig. 2 - Miscano landslide.

superfici di scorrimento, una a 2.5m, l'altra più profonda a 15m;

- nel periodo 93/95, la zona centrale attiva è stata interessata da movimenti di circa 3-4cm (Fig. 3); si osserva una accelerazione nel periodo dicembre '95-gennaio '96;
- nella zona di accumulo, i movimenti decrescono via via che ci si allontana dalla zona centrale della frana.

### 3.2. Analisi di sensitività

Sono state sviluppate le analisi di sensitività dei parametri principali che controllano l'interazione terreno-tubazione:

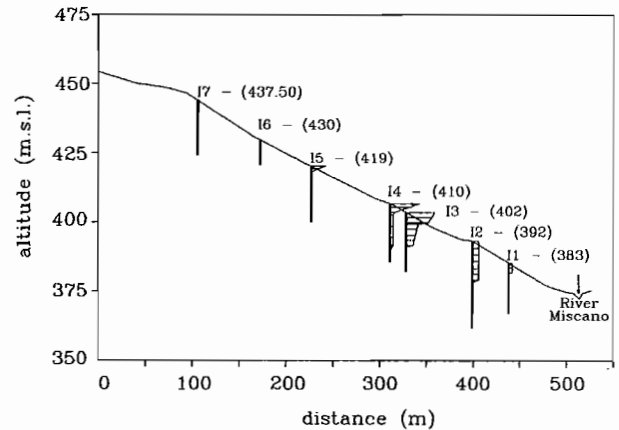


Fig. 3 - Profilo longitudinale e strumentazione.  
Fig. 3 - Longitudinal profile and monitoring layout.

- sui profili di spostamento del terreno (casi da 4 a 9) (Figg. 4 e 5). Si è tenuto conto dei differenti profili degli spostamenti possibili sulla base delle misure disponibili; in particolare, un'area centrale dove viene imposto lo spostamento massimo e due aree di transizione con un profilo lineare e un profilo di spostamento discontinuo (Fig. 5);
- sulla resistenza ultima del terreno (casi 2 e 3). La resistenza ultima del terreno assunta come base è stata prima moltiplicata (caso 2) e poi divisa (caso 3) per un fattore 2 (Fig. 4);
- sul massimo spostamento della frana (casi da 10 a 12). Il massimo spostamento della zona attiva è stato moltiplicato per un fattore 2,4,8, rispettivamente, con un massimo di circa 30.4 cm (Fig. 4).

Una comparazione tra il profilo di spostamento imposto e quelli della tubazione ottenuti dalle analisi è mostrata per i casi 1,2,3 e 10,11,12 in Fig. 4.

### 3.3. Risultati

I risultati delle analisi sono riassunti e raffigurati in Fig. 6 e mostrano che:

- nel caso 1, il profilo degli spostamenti assiali della tubazione (Fig. 4) è simile al profilo degli spostamenti del terreno per piccoli spostamenti relativi e che le forze trasmesse dal terreno circostante alla tubazione sono piccole. Quindi, il diagramma delle tensioni assiali mostra un andamento graduale, privo di discontinuità repentine e con un massimo valore posto approssimativamente intorno alla mezzera delle due aree di transizione;
- la resistenza ultima del terreno (casi 2 e 3) incide scarsamente sia in termini di spostamenti (Fig. 4) che di tensioni assiali perché gli spostamenti relativi tra terreno e tubazione sono più bassi del limite di mobilitazione della molla non

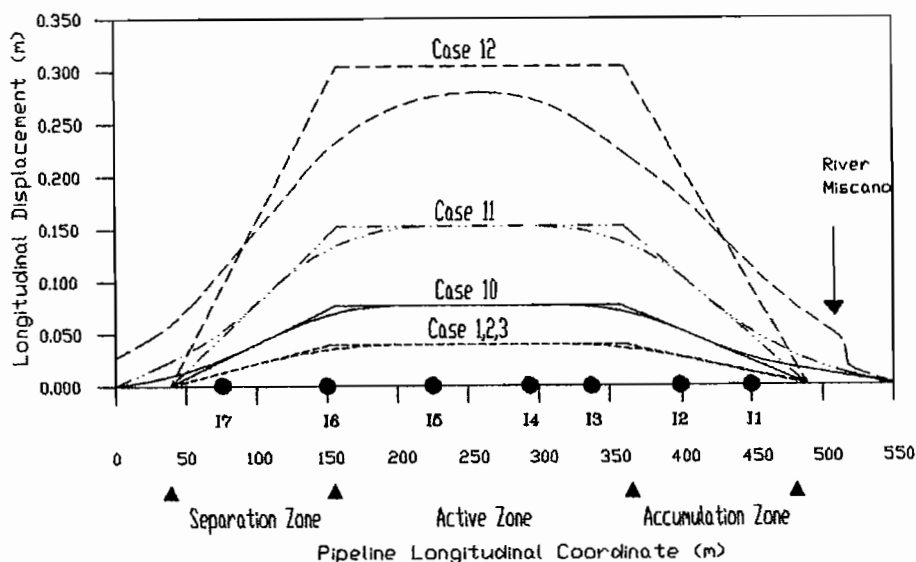


Fig. 4 - Distribuzione degli spostamenti lungo la tubazione.

Fig. 4 - Displacement distribution along the pipeline.

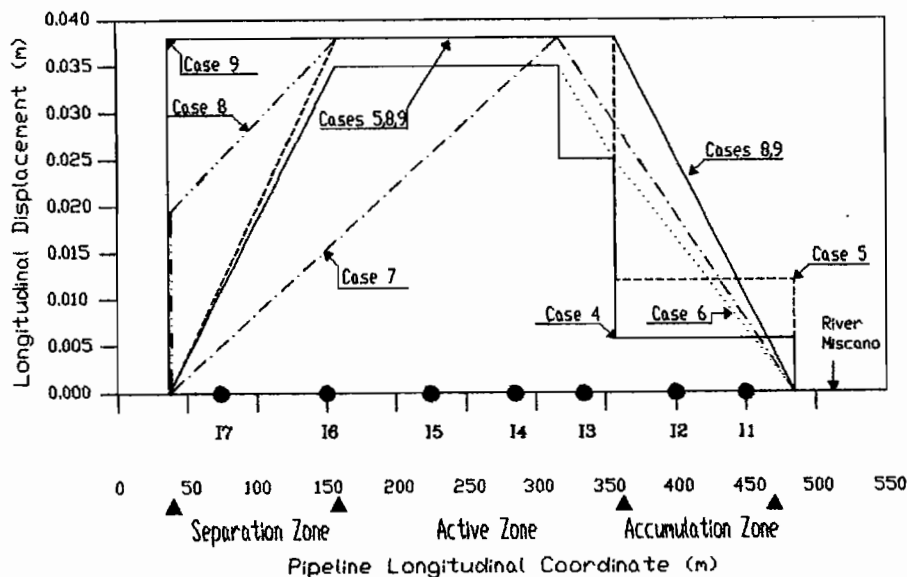


Fig. 5 - Distribuzione degli spostamenti lungo la tubazione.

Fig. 5 - Displacement distribution along the pipeline.

lineare che simula il comportamento del terreno;

- nel caso di un profilo discontinuo degli spostamenti (casi 4,5,8 e 9), le tensioni assiali presentano un andamento differente e discontinuo con discontinuità ad angolo acuto. Questo comportamento è riflesso nel profilo degli spostamenti del terreno comparato con quello della tubazione e caratterizzato da variazioni ad angolo acuto degli spostamenti relativi;
- al crescere dei movimenti del terreno (casi 10, 11 e 12), gli spostamenti relativi tra terreno e tubazione crescono e, conseguentemente, le forze trasmesse alla tubazione: gli spostamenti relativi terreno-tubazione superano il limite di mobili-

tazione della molla assiale non lineare. Il caso 12 può essere interpretato come il risultato della somma di una sequenza monotonica di piccoli movimenti del terreno;

- nel caso 12 (spostamento della frana di 30.4 cm) le deformazioni assiali sono in accordo col classico profilo lineare. La pendenza costante è eguale alla resistenza ultima del terreno per unità di lunghezza della tubazione e lo stato di compressione della tubazione è strettamente correlato con la resistenza ultima del terreno.

Questi risultati indicano che una configurazione basata su 15 sezioni estensimetriche consentirebbe di registrare l'andamento delle deformazioni nella tubazione, particolarmente in quelle più critiche al

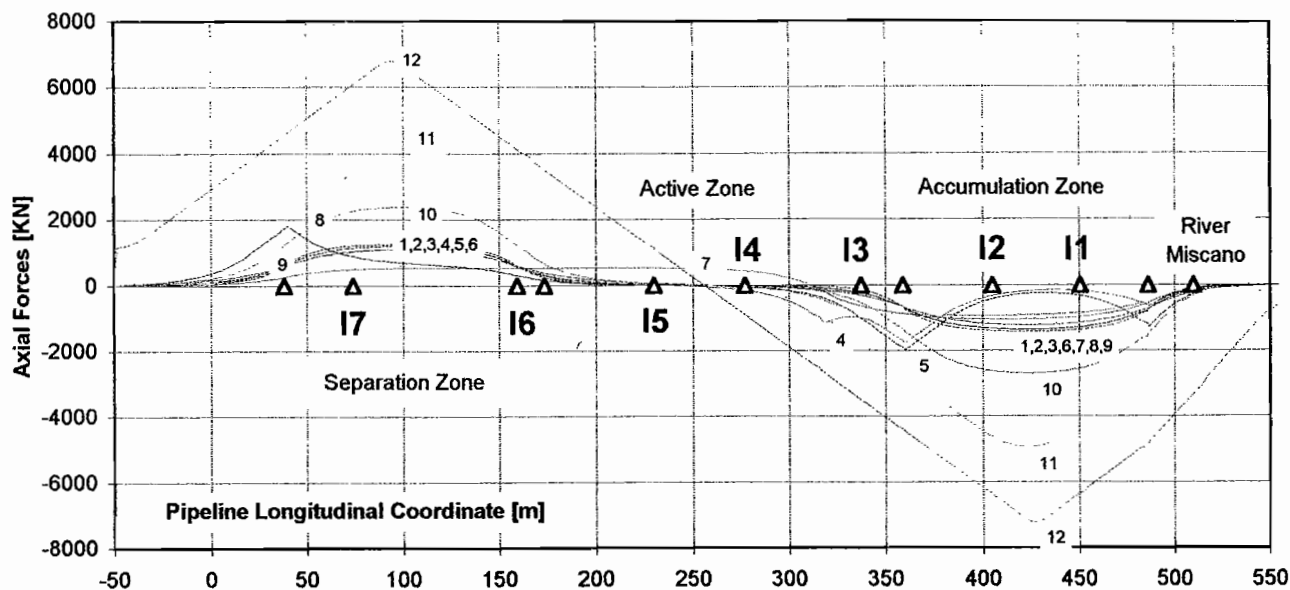


Fig. 6 – Distribuzione degli sforzi lungo la tubazione.

Fig. 6 – Stress distribution along the pipeline.

piede del pendio in frana, e di correlare l'andamento delle tensioni a quello degli spostamenti.

È opportuno focalizzare l'attenzione sulle sezioni comprese tra gli inclinometri I2 e I3.

#### 4. Conclusioni

I risultati delle analisi mostrano che la modellazione strutturale aiuta a progettare il sistema di monitoraggio, fornisce una base per l'interpretazione dei dati di campo e, di conseguenza, del meccanismo di carico della tubazione e consente di delineare scenari razionali in situazioni caratterizzate da significative incertezze.

I risultati ottenuti dipendono dai valori dei parametri meccanici del terreno e dalla configurazione della frana (forma, estensione, direzione), cosicché la modellazione strutturale non integrata con misurazioni non può sostituire completamente il monitoraggio.

L'analisi descritta sarà completata con la calibrazione del modello strutturale sui dati di campo che verranno raccolti durante il 1996 ed il 1997.

#### Bibliografia

- ALTAEE A. and BOIVIN R. (1995) – *Laterally Displaced Pipelines: Finite Element Analysis*. 14th OMAE Conf., Pipeline Technology, Copenhagen, ASME.
- BEA R. (1985) – *Modelling subgrade reaction*. in: "Advances of Oil and Gas Pipelines", edited by de la Mare, Oyez.

- BRUSCHI R., SPINAZZÈ M., TOMASSINI D., CUSCUNÀ S. and VENZI S. (1995) – *Failure modes for pipelines in landslide areas*. Int. OMAE Conf., Pipeline Technology, Copenhagen, ASME.

- BRUSCHI R., GLAVINA S., SPINAZZÈ M., TOMASSINI D., BONANNI S., CUSCUNÀ S. (1996) – *Modelling of pipelines subject to slow landslide movements: analysis of result consistency with monitoring information*. 15th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, ASME.

- BUGHI S., ALEOTTI P., BRUSCHI R., ANDREI G., MILANI G., SCARPELLI G. and E. SAKELLARIADI (1996) – *Slow movements of slopes interfering with pipelines: Modelling and Monitoring*. Int. OMAE Conf., Pipeline Technology, ASME.

- CUSCUNÀ S., GIUSTI G. and GRAMOLA C. (1984) – *Real time control and numerical simulation of pipelines subjected to landslide*. Pressure Vessel and Piping Conference and Exhibit, S. Antonio, Texas.

- CUSCUNÀ S., RE G., BECCHI R., SCARPELLI G., TOMASSINI D. (1994) – *Safety and serviceability analysis of pipelines in unstable slopes*. 13th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, ASME.

- EGIG (1993) – *European Gas Pipeline Incident Data - 1993 Update*. European Gas Pipeline Incident Data Group comprising: British Gas, Dansk Gasteknisk Center, Enagas, Gas de France, N. V. Nederlandse Gasunie, Ruhrgas AG, Distrigas, Snam.

- GIUSTI G., IACCARINO G., PELLEGRINO A., PICARELLI L., RUSSO C., URCIUOLI G. (1996) – *Kinematics features of earthflows in southern Appennines, Italy*. 7th Int. Symp. on Landslides, Trondheim.

- GRIVAS D. A., CAMERON SHULTZ B., MCGUFFY V. C., O'NEIL G. and RITZKALLA M. (1995) – *Landslides Hazard Analysis for Pipelines: the Case of Simonette*

- River Crossing*. 14th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, ASME.
- KENNEDY R. P., CHOW A. W. and WILLIAMSON R. A. (1977) – *Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline*. Transportation Engineering Journal of ASCE, vol. CIII, n. TE5, Sept.
- OLCESE A., VESCOVO C., CUSCUNÀ S., POLLONI G., BADALINI M. and STELLUTI S. (1991) – *Remedial Work and Monitoring for a Large Sliding*. Landslide, Bell (ed.), Balkema.
- PAULIN M. J., PHILLIPS R. and BOIVIN R. (1995) – *Centrifuge Modelling of Lateral Pipeline/Soil Interaction - Phase II*. 14th OMAE Conf., Pipeline Technology, Copenhagen, ASME.
- PICARELLI L., RUSSO C., URCIUOLI G. (1995) – *Modelling earth flow movements: some ideas based on experiences in the basento Valley (Italy)*. Paper n. 163 in the Proceedings XI ECSMFE, Copenhagen, Balkema.
- RIZKALLA M. and MCINTYRE M.B. (1991) – *A Special Pipeline Design for Unstable Slopes*. PD, Pipeline Engineering, vol. XXXIV, ASME.
- RIZKALLA M., POOROOSHASB F. and CLARK J. (1992) – *Centrifuge Modelling of Lateral Pipeline/Soil Interaction*. 11th OMAE Conf., Pipeline Technology, Calgary, ASME.
- SAKELLARIADI E., SCARPELLI G., PIGLIAPOCO M. (1996) – *Earth movements caused by rain infiltration along slope in overconsolidated clayey soils*. 7th Int. Symp. on Landslides, Trondheim.
- SCARPELLI G., ALEOTTI P., BALDELLI P., MILANI G., BRAMBATI E. (1995) – *Field experiences of pipelines in geologically unstable areas*. 14th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, ASME.
- SLADEN J. A. (1992) – *The Adhesion Factor: Applications and Limitations*. Can. Geotech. J., 29.
- TRIGG A. and RIZKALLA M. (1995) – *Development and Application of a Close Form Technique for the Preliminary Assessment of Pipeline Integrity in Unstable Slope*. Int. OMAE Conf., Pipeline Technology, ASME.

## Soil-pipe interaction for pipelines crossing areas affected by soil movements

### Summary

*Slope and pipeline monitoring is often required to anticipate the development of unacceptable conditions for pipelines crossing hilly areas affected by soil movements. In recent years numerical modelling has provided a rational basis for design of monitoring systems to measure strains in the pipe wall over time and, where needed, to help in selection of mitigation measures.*

*The scope of this paper is to discuss the use of dedicated structural modelling in the SNAM network maintenance operations with particular reference to the definition of the optimum location of vibrating wire strain gages stations.*