

Use of Guided waves in difficult operational environments

A. Demma, D. Alleyne, B. Pavlakovic

Introduzione

La richiesta di maggiore sicurezza e le esigenze di mantenimento di impianti con una storia di servizio di alcuni decenni hanno focalizzato una grande attenzione a livello mondiale negli ultimi 20 anni. Le soluzioni cercate dagli organi di ispezione sono ora mirate al controllo diretto del 100% delle linee (anche basato su studi di RBI) con il minimo impatto economico possibile. I costi delle ispezioni sono la maggior parte delle volte una frazione dei costi relativi alla rimozione e sostituzione di strutture in servizio (che ad esempio da studi ingegneristici di tipo indiretto sono classificate come strutture a rischio). A differenza delle tecniche di ispezione standard, la tecnologia ad onde guidate permette di realizzare uno screening di una tubazione a partire da una posizione remota (accesso esterno). L'uso di questa tecnica causa un notevole abbattimento dei costi di manutenzione e dei tempi per effettuare il controllo. Questo metodo permette quindi di concentrare gli sforzi delle ispezioni e delle attività di manutenzione in maniera da effettuare interventi ben programmati ed efficaci. Inoltre nel caso nel quale si utilizzi questa tecnologia per effettuare un monitoraggio permanente della struttura, è possibile ottimizzare gli interventi di manutenzione monitorando aree difficili da accedere. Infatti con una tecnica di monitoraggio permanente è possibile stimare la velocità di una potenziale corrosione presente in una area difficile da accedere ritardando un intervento fino al momento nel quale questo diventi strettamente necessario.

Le onde guidate sono onde ultrasoniche a bassa frequenza (normalmente nell'ordine dei kHz). I tests ad ultrasuoni di tipo convenzionale permettono di ispezionare la regione di struttura immediatamente al di sotto dei trasduttori come mostrato in Figura 1(a). Le onde guidate invece rendono possibile lo screening di strutture di grandi dimensioni a partire da una singola posizione (con accesso remoto). Queste si propagano lungo la struttura invece che attraverso lo spessore come mostrato in Figura 1(b). La propagazione di onde di Lamb cilindriche è alla base del sistema qui di seguito descritto. La generazione di queste onde avviene per mezzo di speciali arrays di trasduttori, qui chiamati anelli, che sono messi a contatto con la tubazione per mezzo di pressione meccanica o pneumatica. Dopo che l'anello è stato posizionato intorno alla condotta, l'operatore esegue un test singolo a frequenze multiple che realizza uno screening in entrambe le

direzioni rispetto alla posizione dell'anello. La propagazione del segnale ultrasonico dipende dalle condizioni della tubazione in esame. Un range di 150 metri in entrambe le direzioni a partire dalla posizione nella quale si trova l'anello può essere ottenuto in tubazioni caratterizzate da poca corrosione. Il range si abbassa a 20 metri (o anche al di sotto di 20 metri) per condotte nelle quali è presente corrosione e/o ricoperte con materiale isolante. Il sistema è stato studiato per il rilevamento di difetti dell'ordine o maggiore del 5% dell'area di una sezione di condotta, ma ad oggi dimensioni di difetto al disopra del 1% possono essere individuati nei casi di tubazioni che siano in buone condizioni e con difetti isolati.

La continua richiesta di migliori performance della prova ad onde guidate in termini di sensitività e range del test, specialmente nei casi delle applicazioni più complesse ha portato alla necessità di nuovi sviluppi della strumentazione ad onde guidate. Il continuo sviluppo in questo campo di ricerca permette oggi l'utilizzazione delle onde guidate per lo screening di strutture in diverse condizioni operative in termini di temperatura e ambiente esterno (linee aeree, sotterranee o sottomarine).

In questo articolo introdurremo inizialmente le conoscenze di base delle onde guidate in tubazioni e la sensibilità ai difetti. Successivamente proporremo degli esempi che evidenziano le potenzialità tecniche delle onde guidate in tests su tuberie ricoperte con materiale altamente attenuativo, tuberie interrate, tuberie sottomarine e casi di ispezioni ad elevata temperatura. I limiti di questo tipo di ispezione sono inoltre evidenziati.

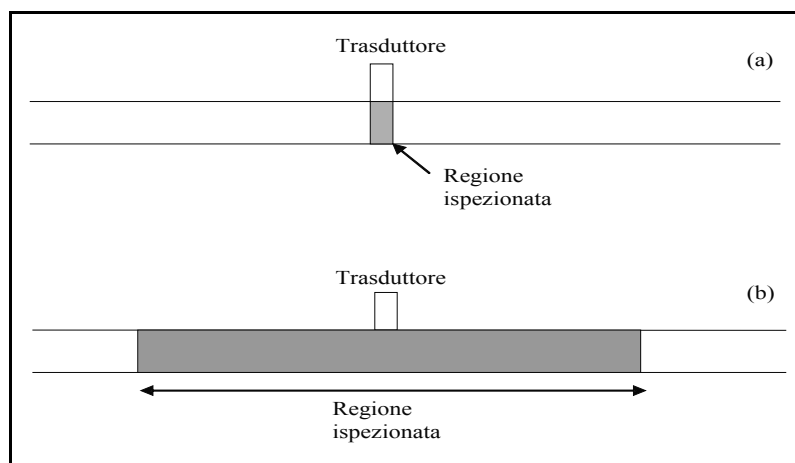


Figura 1 - Differenza tra tecniche ultrasoniche tradizionali (a) e tecniche che usano guided waves (b).

Onde guidate in tubi cilindrici.

Le caratteristiche di propagazione di onde che viaggiano attraverso strutture cilindriche dipende sia dalla geometria del sistema che dalle caratteristiche acustiche del materiale. Figura 2 mostra le curve di dispersione per un tubo di acciaio di diametro 2 pollici in un range di frequenze che va da 0 a 100 kHz. Queste curve sono state calcolate usando il software di modellazione di onde Disperse [1]. La velocità di gruppo è la velocità alla quale si propaga il pacchetto d'onde. Come evidente dalla Figura 2, molti modi sono presenti a questo range di frequenze ma solo alcuni modi sono effettivamente utilizzati per l'ispezione della tubazione.

La scelta dei modi da eccitare per tests pratici è fondamentale per l'ottenimento di un segnale che si propaghi ad elevata distanza dalla zona di eccitazione. Sebbene il sistema sia stato sviluppato nel 1997 per l'utilizzo del modo longitudinale (L(0,2)) il modo T(0,1) è stato successivamente studiato ed implementato nel 1999 a causa delle numerose caratteristiche di semplicità d'uso ed ottimizzazione della performance.

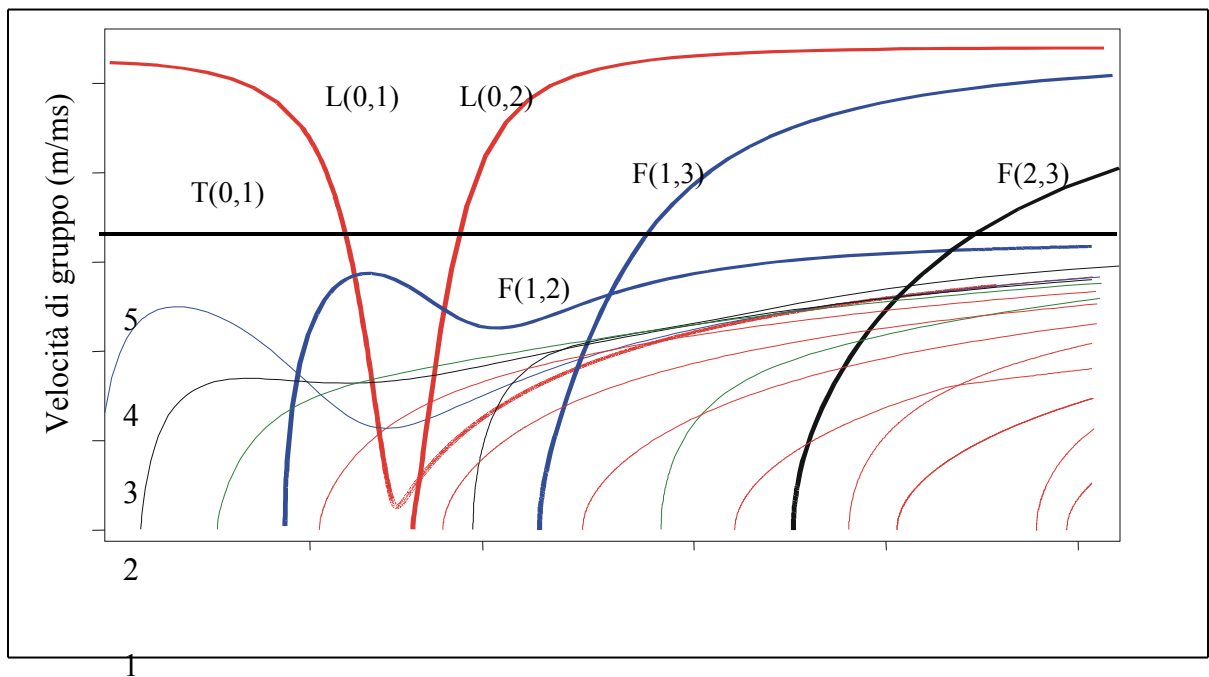


Figura 2 - Curve di dispersione per la velocità di gruppo di un tubo cilindrico di acciaio di due pollici e di spessore 4.5 mm posto sottovuoto. I modi di usuale interesse in guided wave testing sono mostrati in grassetto e classificati.

Generazione dei modi di onda guidata

In generale, eccitando un tubo con un trasduttore piezoelettrico, tutti i modi esistenti nel range di frequenza dell'eccitazione saranno eccitati. La generazione di singoli modi invece semplifica l'applicazione pratica del metodo (T(0,1) è il modo preferito nella maggior parte dei casi ma altre soluzioni sono disponibili). La tecnica sviluppata dalla GUL realizza la eccitazione dei modi di interesse per mezzo di un anello di trasduttori piezoelettrici a contatto.

La generazione del segnale, la ricezione ed il postprocessing sono ottenuti utilizzando una unità portatile costituita da un computer portatile, un Wavemaker (GUL) ed un anello di trasduttori come mostrato in Figura 3.

Riflessione e conversione di modo

In generale in una condotta possono essere presenti differenti parti che interrompono la continuità del tubo come saldature, flangie, supporti laterali e curve. Inoltre i tubi possono essere caratterizzati da difetti con differente distribuzione (generalizzata o localizzata) ed orientamento (circonferenziale, assiale, attraverso lo spessore). Lowe et al. [3] hanno trovato un metodo per l'identificazione dei difetti legato alle caratteristiche di riflessione e conversione di modo. Una interruzione assisimmetrica come una saldatura o una flangia provoca solamente una riflessione del modo generato a causa del fatto che sia il modo che la discontinuità sono assisimmetrici. Nel caso di discontinuità non assisimmetrica, vi sarà non solo riflessione del modo propagantesi fino al punto immediatamente a valle della discontinuità ma vi sarà una conversione dal modo trasmesso a tutti i modi presenti alla data frequenza di eccitazione. In pratica solo pochi dei modi presenti alle frequenze in esame danno un contributo non trascurabile in termini di conversione di modo. Così il modo torsionale T(0,1) tende a convertirsi nel modo flessionale F(1,2) a causa della similarità nella distribuzione dello spostamento e a causa della similarità in termini di velocità di gruppo [4].



Figura 3. Wavemaker kit usato in site-test nel caso di tuberia aerea (con penetrazione terreno).

Sensibilità ai difetti

Le guided waves usate per il controllo delle condotte sono sensibili ai cambiamenti della area di sezione di tubo. La riflettività delle guided waves è governata da leggi ben differenti da quelle tipiche delle bulk waves. Con le guided waves è possibile trovare difetti la dimensione dei quali è più piccola della lunghezza d'onda. I risultati di studi di sensibilità ai difetti sono stati presentati in pubblicazioni anteriori [3,4,5].

Effetto di rivestimenti bituminosi

L'effetto di rivestimenti bituminosi è stato affrontato in numerosi studi teorici [6]. L'effetto principale dei rivestimenti di tipo bituminoso è quello di provocare una attenuazione della onda ultrasonica guidata. Questo causa una riduzione del range di propagazione del segnale.

Screening di tuberie interrate utilizzando onde guidate

Le tuberie interrate sono tra le applicazioni più complesse della tecnologia ad onde guidate. In questa applicazione, tutte le soluzioni alternative al test con onde guidate hanno impatto economico notevole (pig intelligente, test diretto con tecnologie standard o sostituzione della linea). Il test ad onde guidate permette di testare una porzione di alcuni metri di tuberia interrata a partire da posizioni remote.

Le limitazioni del test su tuberie interrate utilizzando onde guidate sono legate alla presenza di materiale fortemente attenuativo dell'onda ultrasonica (come ad esempio un rivestimento bituminoso di grosso spessore), la

presenza di geometrie complesse ed il contatto con il terreno. Nella applicazione della tecnologia ad onde guidate su tuberie interrata l'effetto del contatto con il terreno complica notevolmente l'analisi dei risultati, ragione per la quale solamente operatori con elevato grado di esperienza possono effettuare il test su tuberie interrata con successo.

La Figura 4 mostra una tuberia interrata al momento del test con la tecnologia Wavemaker G3 della GUL. Il test è stato effettuato a partire da una posizione di accesso vicino ad una valvola. Alla destra dell'anello di trasduttori è possibile vedere una flangia che rappresenta la fine del test. La zona a sinistra dell'anello era ricoperta con materiale bituminoso e interrata.

Il risultato della ispezione è presentato in Figura 5. In questo caso all'incirca 30m di tubazione sono stati testati a partire da una posizione singola. Due saldature sono chiaramente visibili nella zona interrata. Una terza saldatura appare a circa 30 metri dalla posizione dell'anello, anche se la identificazione di questa saldatura richiede un elevato livello di esperienza pratica. In tutto il tratto ispezionato non vi è presenza di echi dovuti a corrosione. Sulla base dei risultati ottenuti il cliente finale ha escluso la linea specifica da un costoso programma di mantenimento delle linee interrata che comporta lo scavo di tutta la linea per test ultrasuoni standard e studi statistici. Le onde guidate hanno permesso un controllo diretto della linea sul 100 del volume per 30 metri range evitando così l'uso di studi statistici che comunque presentano un forte fattore di rischio.

Sfortunatamente non in tutti casi di tuberie interrata è possibile ottenere 30 metri di range. La tecnologia G3 ha migliorato le performances per il test ad onde guidate su tuberie interrata ma le limitazioni menzionate sopra a volte riducono il range del test a 5 metri di range del test.



Figura 4. Wavemaker G3 in azione. Test su tuberia interrata a partire da una sezione di tubazione accessibile.

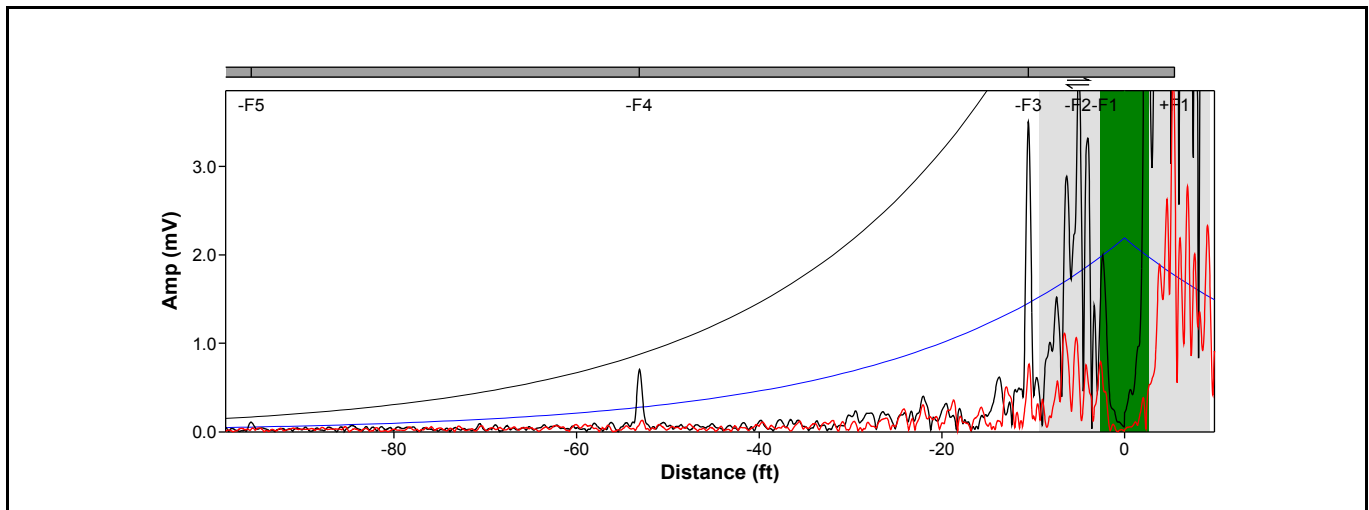


Figura 5. Risultato Wavemaker G3 nel caso di tubazione interrata. Trenta metri di range sono stati ottenuti nella porzione di tubazione interrata.

Monitoraggio di tuberie interrate utilizzando onde guidate

In Figura 6 è mostrato un risultato ottenuto su una tuberia interrata utilizzando un sistema di monitoraggio permanente.

Inizialmente la tuberia aveva un difetto artificiale di circa 0.6% (Perdita di sezione trasversale o PST), successivamente incrementato a 0.78%, fino ad un valore finale di 0.86%. La parte superiore in Figura 6 mostra i risultati relativi al difetto originale e agli incrementi successivi. Questi difetti si presentano ben al di sopra del livello di rumore per cui è possibile stimare una sensibilità assoluta del sistema di monitoraggio nell'ordine dello 0.5%.

Inoltre variazioni della sezione trasversale (dovuta alla azione corrosiva) nell'ordine dello 0.1% sono facilmente identificabili.

Nella parte inferiore della Figura 6 è possibile verificare la performance dell' algoritmo 'Enhanced Focusing'. Il difetto si presentava nella posizione ore 12 che nello schema di identificazione dell'angolo del difetto in Figura 6 corrisponde con 0 gradi. L' algoritmo 'Enhanced Focusing' è utilizzato in questo caso per incrementare la sensibilità al difetto e permettere la identificazione della posizione angolare del difetto

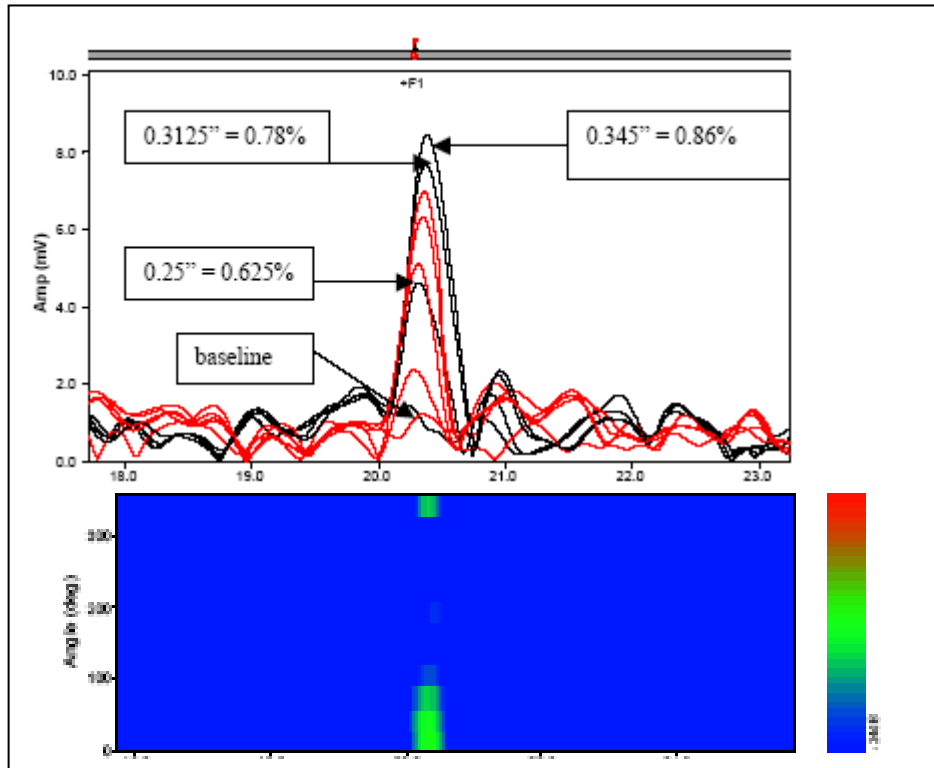


Figura 6. Risultato test onde guidate con sistema PIMS della GUL.

In Figura 7 è possibile notare la performance del sistema di monitoraggio nel caso di una tuberia interrata. In questo caso l'anello di trasduttori è interrato ed è accessibile attraverso un cavo posizionato esternamente. L'anello è in questo caso protetto da agenti esterni e la performance è indipendente dalla presenza di eventuali resine (che potrebbero degradare con il tempo a causa di cicli di temperatura e stagionali).

Nel lato interrato il range è di circa 20 metri, nel lato della tuberia aerea il range è limitato dalla seconda curva. Notare che nel lato interrato le saldature erano disallineate.

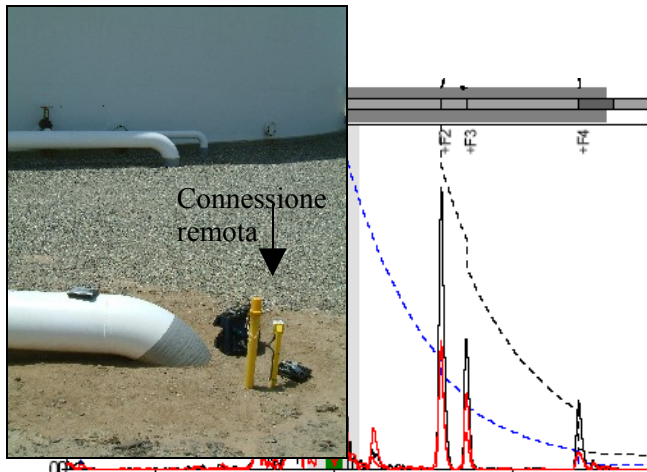


Figura 7. Performance PIMS (GUL) nel caso di una tuberia interrata.

L'utilizzo delle onde guidate in condizioni ambientali di tipo estremo.

Le onde guidate sono generalmente utilizzate per ispezionare tubazioni in servizio. Il limite di temperatura di utilizzo delle onde guidate è legato al potenziale danneggiamento del mezzo di trasduzione più che a variazioni della struttura metallica del tubo che sono facilmente compensabili utilizzando apposito software. Utilizzando adeguate procedure applicative è possibile ispezionare tubazioni fino a 180C. In figura 8 è mostrato un esempio applicativo del sistema ad onde guidate su tubazione a 150C. Inoltre è stato dimostrato da Cegla [7] che le onde guidate possono essere utilizzate fino a temperature di 800C ed una applicazione industriale è al momento in fase di sviluppo all'Imperial College di Londra.

Utilizzo delle onde guidate in ambiente sottomarino

La tecnologia Sub-sea della Guided Ultrasonics è stata utilizzata a partire dal 2004 e, malgrado tentativi di copia della stessa, questo sistema è l'unico al mondo che possa utilizzare onde guidate in ambiente sottomarino.

L'utilizzo di questa tecnologia è stato riportato in numerose conferenze internazionali [8,9]. Questa tecnologia è stata sviluppata per acque profonde (ROV) per aree marine a profondità limitata (sistema manuale per subacquei) ed inoltre è utilizzata per il monitoraggio di strutture sottomarine. Informazione sul sistema sub-sea della GUL è disponibile sul sito www.genesis-sig.com.

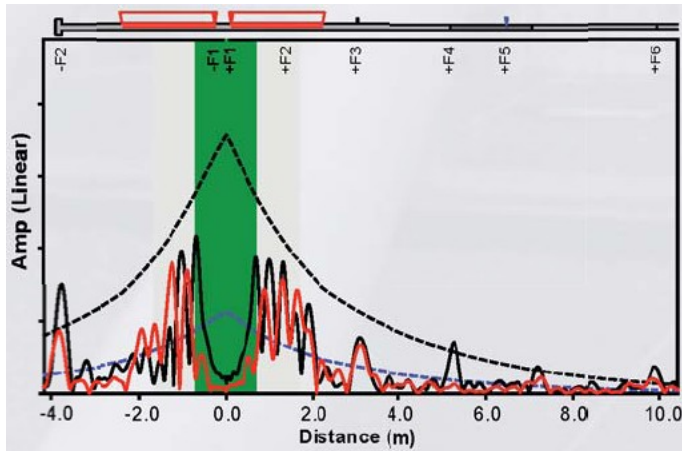


Figura 8. Risultato Wavemaker su tubazione coibentata a temperatura di 150C. Questa tubazione presentava corrosione di tipo severo.

Conclusioni

La tecnologia ad onde guidate è stata utilizzata con successo per ispezionare tubazioni in condizioni operative complesse. Ad oggi è possibile utilizzare onde guidate per la ispezione di tubazioni in condizioni di basse ed elevate temperature e in ambienti sotterranei o sottomarini. Inoltre la capacità del sistema di monitorare strutture permette di utilizzare soluzioni innovative per il controllo e la manutenzione delle strutture.

In tutti i casi nei quali la tecnologia ad onde guidate e' utilizzata in operazioni complesse, un elevato grado di esperienza dell'operatore diventa condizione necessario per il successo della ispezione.

REFERENZE

1. Pavlakovic B., Lowe M., Alleyne D. and Cawley P., "Disperse: a general purpose program for creating dispersion curves", *Review of Progress in QNDE*, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Plenum Press, New York, 1997), p. 185.
2. Alleyne D.N. and Cawley P., "Optimization of Lamb wave inspection techniques", *NDT & International* 25, 11 (1992)
3. Lowe M.J.S., Alleyne D.N. and Cawley P., "The mode conversion of guided waves by a part-circumferential notch in a pipe", *Journal of Applied mechanics* 65, 649 (1998)
4. Demma, A., Cawley, P. and Lowe, M.J.S. ' The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes', *J Acoust Soc Am*, 114, 611, 2003.

5. Alleyne D.N., Lowe M.J.S. and Cawley P. , “The reflection of guided waves by a part-circumferential notch in a pipe”, *Journal of Applied mechanics* 65, 635 (1998)
6. Simonetti, F., Cawley, P. and M. J. S. Lowe. 'Long range inspection of lossy bilayers', in D. O. Thompson and D. E. Chimenti, editors, *Review of Progress in Quantitative NDE*, 23A, 222, 2004
7. Cegla, F., ‘Ultrasonics Waveguide Sensors for fluid characterization and remote sensing’, PhD Thesis, Imperial College, London
8. Demma, A., Vogt T., Pavlakovic, B., Banks, S. ‘Usò delle onde guidate per applicazioni offshore’, Conferenza AIPND, Oct 2005
9. Demma, A., Pavlakovic, B., Alleyne, B., ‘Guided waves: offshore applications’, CONAEND Conference, Oct. 2006