

Sviluppo e sperimentazione di un nuovo sensore magnetostrittivo per diagnostica e monitoraggio a onde guidate di condutture non direttamente accessibili

*Francesco Bertoncini, Marco Raugi, Florin Turcu
Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione
Università di Pisa
Via Diotisalvi 2 – 56126 Pisa, Italia*

Sommario

L'applicazione della tecnica ad onde ultrasoniche guidate (UGW) a condutture di cui è difficile l'ispezione diretta (per la loro posizione o perchè rivestite) è fortemente innovativa ed ancora poco diffusa in Italia.

Le onde ultrasoniche possono essere generate sotto forma di impulsi da un sensore di tipo magnetostrittivo applicato localmente sul tratto di tubo ispezionato; la propagazione avviene utilizzando il tubo stesso come struttura guidante. In presenza di difetti dovuti a corrosione e/o imperfezioni si genera un'onda riflessa che il sensore stesso è in grado di rilevare.

La tecnica UGW permette di localizzare difetti eventualmente presenti lungo la conduttura fino a distanze dell'ordine di 60 metri dal punto di accesso della conduttura.

In questa memoria sono mostrate le potenzialità della tecnica UGW basata su sensori magnetostrittivi attraverso l'applicazione a condutture in esercizio. E' inoltre illustrata la possibilità di effettuare monitoraggio basandosi su tale tipo di sensori evidenziandone i costi contenuti e la facilità d'uso. Infine è presentato un nuovo sensore magnetostrittivo in grado di migliorare significativamente la capacità diagnostica della tecnica UGW consentendo di riconoscere i segnali riflessi generati da difetti e distinguerli da quelli dovuti a giunzioni, gomiti, ramificazioni e supporti normalmente presenti in una conduttura in esercizio.

1. Introduzione

La corrosione e la presenza di difetti nelle condutture è un problema rilevante negli impianti industriali ed in particolare nelle aziende petrolifere, chimiche e petrolchimiche. Molte condutture sono rivestite con materiali isolanti cosicché non è possibile valutare per ispezione visiva neanche la corrosione esterna a meno di non togliere il rivestimento, il che può essere notevolmente costoso. Anche laddove le condutture non fossero rivestite, l'ispezione con metodi non distruttivi convenzionali risulta in generale difficoltosa in quanto le condutture possono essere difficilmente accessibili [1]. Inoltre in impianti a ciclo continuo l'ispezione e la verifica delle condutture può comportare l'interruzione del normale ciclo di funzionamento dell'impianto con notevoli costi economici.

Il problema della corrosione è altrettanto importante per le aziende che distribuiscono acqua e gas perché in questo caso le condutture sono interrate e attraversano incroci stradali in ambito urbano: lo scavo della conduttura per una ispezione visiva o con metodi non distruttivi convenzionali può avere costi rilevanti e provocare notevoli disagi alla circolazione stradale.

E' pertanto forte la necessità dello sviluppo di tecniche semplici, affidabili e veloci che permettano, senza dover interrompere il normale funzionamento dell'impianto o il servizio erogato, non solo la diagnostica ma anche il monitoraggio di tratti di condutture non accessibili.

In questo ambito l'applicazione della tecnica ad onde ultrasoniche guidate (UGW, Ultrasonic Guided Wave) a condutture di cui è difficile l'ispezione diretta (per la loro posizione o perchè rivestite o interrate) è fortemente innovativa.

La tecnica, ancora poco diffusa in Italia, consente l'ispezione a distanza della condotta utilizzando la propagazione di onde elastiche ultrasoniche e la loro riflessione in corrispondenza della variazione della geometria della condotta stessa. La tecnica è volumetrica poiché l'intera sezione del tubo risente del passaggio dell'onda ultrasonica. E' così possibile individuare difetti sia interni che esterni eventualmente presenti lungo la condotta fino a distanze che possono raggiungere anche i 60 metri dal punto di accesso della condotta nel caso in cui questa sia posta in aria. Tenendo conto delle due direzioni in cui può propagarsi l'onda ultrasonica, la lunghezza del tratto ispezionabile a partire da un singolo punto di accesso della condotta può superare quindi i 120 metri, dipendendo tale lunghezza da molteplici fattori tra i quali il diametro del tubo, la presenza o meno di rivestimento, lo stato della condotta, la presenza o meno di giunzioni, gomiti, diramazioni. Nel caso di condutture interrate, a causa della maggiore attenuazione che subiscono le onde ultrasoniche durante la propagazione, la lunghezza del tratto ispezionabile è dell'ordine della decina di metri.

Ad oggi la tecnica UGW consente quindi di rilevare e localizzare difetti significativamente distanti dal punto di misura ma, al pari di altre tecniche di ispezione delle condutture [2], richiede ulteriori sviluppi e ricerche sia per definire la tipologia di difetto che per determinarne le dimensioni. Si tratta in pratica di risolvere un problema inverso: dato il segnale misurato dovuto ad un certo difetto ricostruire la geometria del difetto che ha generato quel segnale. Il problema diventa particolarmente complesso quando nella condotta sono presenti numerose giunzioni, gomiti e diramazioni [3]. In questo caso, poiché tali discontinuità generano segnali riflessi, occorre prima di tutto estrarre dal segnale acquisito solo la parte associata ai difetti eventualmente presenti lungo la condotta. E' quindi necessario sviluppare adeguati metodi di identificazione del segnale misurato.

In questa memoria l'attenzione è rivolta alle potenzialità della tecnica UGW basata su sensori di tipo magnetostrittivo. Dopo aver illustrato le principali caratteristiche e peculiarità della tecnologia MsS (Magnetostrictive Sensor) sono mostrati i risultati di una campagna di test eseguiti utilizzando il sistema di diagnostica ad onde ultrasoniche guidate MsS2020®, sviluppato dal SWRI, SouthWest Research Institute, San Antonio, Texas, USA. E' quindi illustrata la possibilità di effettuare monitoraggio basandosi su sensori di tipo magnetostrittivo evidenziandone i costi contenuti e la facilità d'uso. Infine è presentato un nuovo sensore magnetostrittivo, sviluppato dal DSEA, Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa. Tale sensore è in grado di migliorare significativamente la capacità diagnostica della tecnica UGW in termini di discriminazione dei segnali riflessi generati da difetti da quelli riconducibili a giunzioni, gomiti, ramificazioni e supporti normalmente presenti in una condotta in esercizio.

2. La tecnologia ad onde guidate basata su sensori magnetostrittivi

La tecnologia ad onde guidate si basa sulla propagazione di onde elastiche di frequenza relativamente bassa (tipicamente inferiore a 300 kHz) attraverso strutture guidanti quali cavi, tubi e piastre.

Le onde ultrasoniche possono essere generate sotto forma di impulsi da trasduttori di tipo

magnetostrittivo (MsS) oppure piezoelettrico (PZT) oppure basati sulla forza di Lorentz (trasduttori EMAT, ElectroMagnetic Acoustic Transducer) [4].

I trasduttori di tipo MsS utilizzano l'effetto magnetostrittivo diretto e inverso che si verifica in materiali ferromagnetici quali l'acciaio ferroso, il nichel, il ferro-cobalto. Tale effetto consiste nella variazione delle dimensioni fisiche del materiale – dell'ordine di qualche parte su milione – causate da un campo magnetico esterno (effetto diretto) e nel cambiamento dell'induzione magnetica dovuto alla deformazione meccanica del materiale stesso (effetto inverso).

La Figura 1 mostra schematicamente gli elementi base della tecnologia MsS applicata all'ispezione di condutture [5].

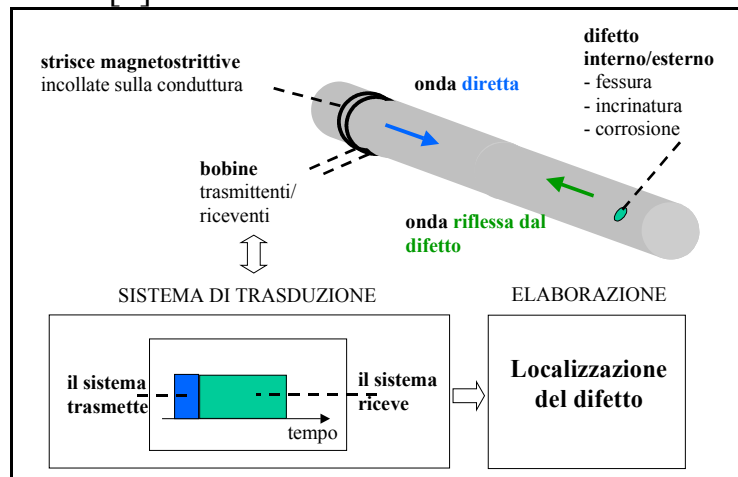


Figura 1 – Tecnologia UGW basata su sensori magnetostrittivi

Il sensore magnetostrittivo è applicato localmente sul tratto di tubo ispezionato, eventualmente rimuovendo il rivestimento esterno, ed è costituito da strisce di materiale magnetostrittivo come il nichel o il cobalto incollate sulla conduttura, così come mostrato in Figura 2, sulle quali sono avvolte le bobine collegate al sistema di trasduzione. Le strisce di materiale magnetostrittivo sono preliminarmente magnetizzate utilizzando un campo magnetico statico di polarizzazione.

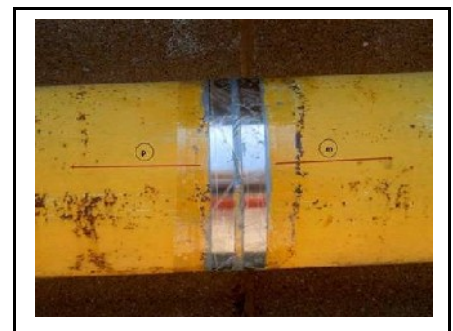


Figura 2 – Strisce di Nichel

Il sistema di trasduzione gestisce la fase di innesco dell'onda nella conduttura eccitando le bobine con impulsi di corrente. Il campo magnetico variabile che ne deriva provoca la deformazione della striscia magnetostrittiva, deformazione che a sua volta è trasmessa localmente al tubo al quale le strisce sono incollate.

La propagazione dell'onda elastica innescata avviene quindi utilizzando il tubo stesso come struttura guidante; polarizzando opportunamente le strisce magnetostrittive è possibile far propagare lungo la conduttura i modi fondamentali torsionale $T(0,1)$ oppure longitudinale $L(0,1)$. Inoltre eccitando opportunamente le due bobine è possibile ottenere la propagazione dell'onda lungo una direzione rendendo trascurabile la propagazione nell'altra direzione. La presenza di difetti dovuti a corrosione e/o imperfezioni lungo la conduttura genera un'onda riflessa che lo stesso sensore utilizzato in trasmissione è in grado di rilevare sfruttando l'effetto magnetostrittivo inverso.

In questa fase il sistema di trasduzione acquisisce il segnale riflesso che inviato al sistema di elaborazione permette di localizzare il difetto.

Le prestazioni che possono essere ottenute da un sistema di diagnostica basato su sensori magnetostrittivi sono illustrate in Tabella 1 facendo riferimento allo strumento di diagnostica MsS2020D®, sviluppato dal SWRI, SouthWest Research Institute, San Antonio, Texas, USA.

Tabella 1 – Caratteristiche dello strumento di diagnostica MsS2020D® [6]

<i>sensibilità</i>	2% del cambiamento della “ <i>cross-sectional area</i> ”
<i>frequenza</i>	5 + 250 kHz
<i>modi innescati</i>	torsionale, longitudinale e flessurale in strutture cilindriche
<i>diametro e spessore del tubo ispezionabile</i>	diametri fino a 40 pollici e spessori fino a 1,5 pollici
<i>lunghezza del tratto di conduttura che può essere ispezionato</i>	varia in funzione della forma della conduttura e del suo stato ossia se rivestita e/o interrata; 10m + 120m
<i>tempo richiesto per l’ispezione</i>	una volta incollate le strisce magnetostrittive pochi minuti
<i>massima temperatura della superficie sulla quale è applicato il sensore MsS</i>	ad oggi 65 °C; allo studio sensori per elevate temperature (fino a 400 °C)

Il sistema ha una buona sensibilità, un *range* di ispezione confrontabile con quelli di altri sistemi e può essere facilmente utilizzato su condutture di differente diametro.

Il punto di forza della tecnologia MsS sta proprio nella semplicità del sensore in termini di installazione e di adattabilità a differenti tipi di condutture. Inoltre un sensore magnetostrittivo ha un costo relativamente basso se confrontato con altri tipi di sensori.

3. Diagnostica e monitoraggio a lunga distanza su condutture in esercizio con sensori magnetostrittivi

Per mostrare le potenzialità della tecnologia MsS sono di seguito riportate una serie di test eseguiti utilizzando lo strumento di diagnostica MsS2020D® sopra descritto. I test riguardano la diagnostica ed il monitoraggio di una conduttura di distribuzione di gas in bassa pressione le cui caratteristiche sono elencate in Tabella 2.

Il set up di misura è mostrato in Figura 3: la configurazione è quella standard con sonda trasmittente e ricevente coincidenti (modalità *pulse/echo*). La frequenza utilizzata è di 32 kHz ed il modo trasmesso è quello torsionale fondamentale T(0,1).

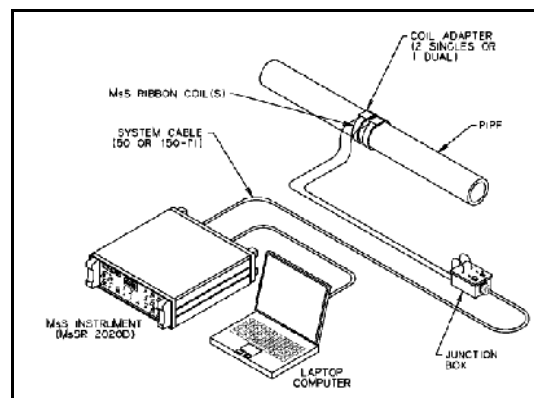


Figura 3 – Set up di misura [6]

Tabella 2 – Caratteristiche della conduttura ispezionata

<i>diametro nominale e spessore</i>	6 pollici, 5 mm
<i>posizione</i>	in aria e parzialmente interrata
<i>rivestimento</i>	assente nel tratto in aria, presente nel tratto interrato
<i>fluido trasportato</i>	gas in bassa pressione
<i>livello di corrosione visibile</i>	basso

Test 1 – Ispezione del tratto in aria e del tratto parzialmente interrato

Il tratto di condotta ispezionato ha una lunghezza complessiva di 120 m dei quali 12 m sono interrati. Si hanno saldature tra i tubi che compongono la condotta e gomiti in corrispondenza del passaggio tra tratto in aria e tratto parzialmente interrato. Tutte queste discontinuità geometriche sono identificabili nel segnale misurato così come mostrato in Figura 4. Come atteso il segnale riflesso dalle saldature, riferite nella figura come discontinuità simmetriche o giunzioni, decresce al crescere della distanza dal sensore trasmittente/ricevente (TX/RX). Inoltre tale segnale risulta significativamente diverso da quello riflesso dalle giunzioni doppie che si hanno in corrispondenza del gomito. L'ispezione eseguita evidenzia un basso livello di corrosione diffusa e l'assenza di difetti.

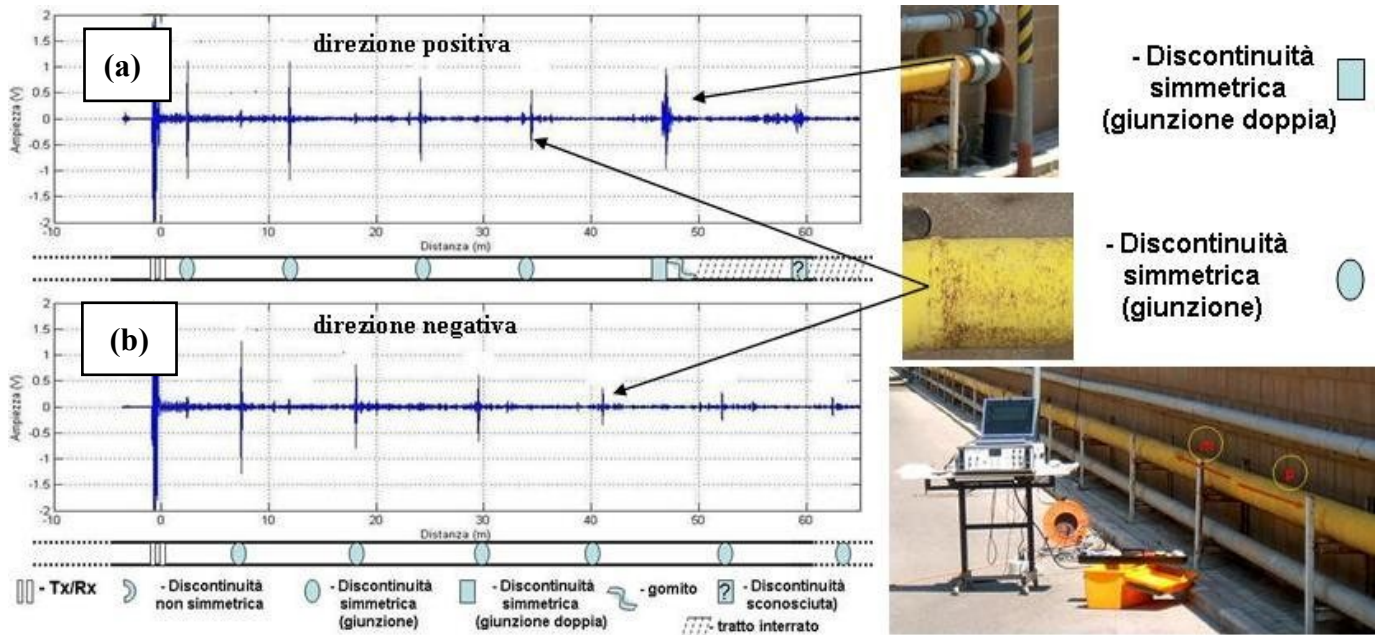


Figura 4 – Segnale misurato: (a) tratto in aria e parzialmente interrato; (b) tratto in aria

Test 2 – Monitoraggio della condotta

Il primo test sulla condotta fu eseguito nel luglio del 2005 su un tratto di 70 m interamente posto in aria. Strisce magnetostrittive di nichel furono incollate, magnetizzate e lasciate per futuri test. La prima ispezione rivelò come principali caratteristiche le saldature tra i tubi componenti la condotta stessa fornendo risultati simili a quelli descritti nel Test 1.

Nel gennaio 2007 le stesse strisce magnetostrittive (senza essere nuovamente magnetizzate) furono utilizzate per l'ispezione dello stesso tratto di condotta.

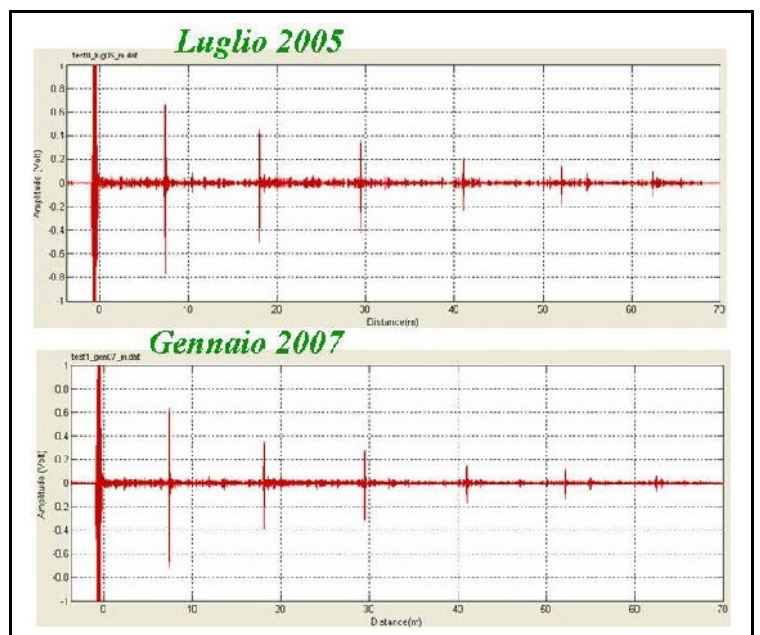


Figura 5 – Monitoraggio della condotta di gas

I segnali acquisiti risultarono, così come mostrato in Figura 5, sostanzialmente identici a quelli misurati 18 mesi prima. Il risultato mostra la stabilità nel tempo del sensore magnetostrittivo permettendo l'uso di procedure come la sottrazione tra i segnali per rilevare piccoli cambiamenti nella geometria della condotta. E' importante sottolineare da una parte la possibilità di lasciare il sensore esposto agli agenti atmosferici senza che si deteriori apprezzabilmente; dall'altra il costo contenuto del sensore stesso quantificabile in circa 11 euro per due strisce di nichel per un tubo da 6".

4. Sviluppo e sperimentazione di un nuovo sensore magnetostrittivo

La maggior parte dei difetti delle condutture dovuti a corrosione, fratture, crepe hanno una forma non simmetrica rispetto all'asse della condotta. Per contro giunzioni, saldature, gomiti risultano simmetrici rispetto all'asse del tubo. Perciò un importante passo avanti per migliorare le capacità di identificazione e classificazione della tecnica MsS è il riconoscimento del segnale riflesso da discontinuità simmetriche e non simmetriche.

Un sensore MsS standard acquisisce il segnale riflesso lungo l'intera circonferenza della condotta ispezionata. Di fatto il segnale ottenuto è la risposta mediata sui differenti punti della circonferenza.

Un esempio delle difficoltà che si incontrano nell'analisi dei segnali riflessi utilizzando questo tipo di sensore è mostrato in Figura 6.

Su un tubo da 8 pollici sono state incollate due strisce di materiale metallico con la stessa larghezza, ma con un differente spessore e una differente apertura angolare. In particolare l'apertura angolare della striscia non simmetrica è di 90°. La risposta delle due discontinuità ad un'onda torsionale incidente a 32 kHz valutata a 1,6 m di distanza con un sensore MsS standard risulta simile; di fatto nel segnale riflesso le strisce sono indistinguibili.

Con l'obiettivo di discriminare i due tipi di discontinuità è stato sviluppato e sperimentato un nuovo sensore magnetostrittivo in grado di acquisire ed elaborare segnali associati a differenti settori angolari della condotta ispezionata.

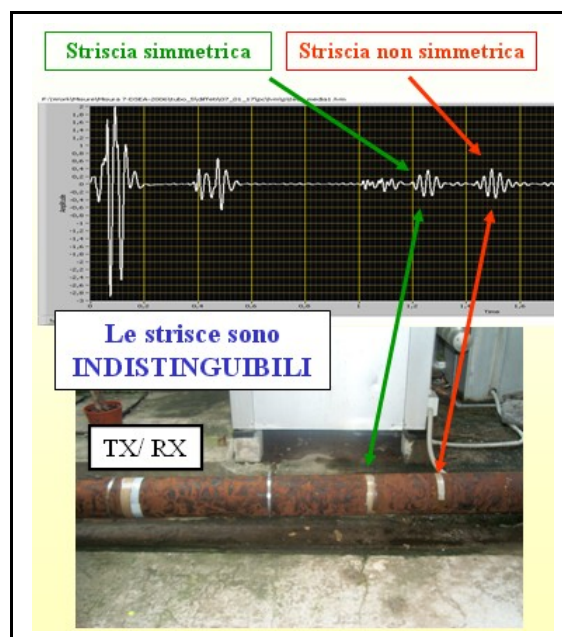


Figura 6 – Discontinuità indistinguibili

Il nuovo sensore magnetostrittivo

Il progetto e lo sviluppo del nuovo sensore è basato sia su dati simulati che su dati sperimentali. L'ispezione della condotta avviene utilizzando il modo torsionale di propagazione ed in modalità pitch/catch ovvero con trasmettitore e ricevitore posti in punti differenti lungo l'asse della condotta. La procedura per generare l'onda diretta è quella standard, mentre diversa è la modalità di acquisizione e di elaborazione del segnale riflesso.

Utilizzando il nuovo sensore locale mostrato in Figura 7 l'acquisizione del segnale riflesso avviene infatti settore angolare per settore angolare. Una scansione completa della circonferenza lungo la striscia magnetostrittiva fornisce così un insieme di dati che contengono informazioni aggiuntive sulla geometria della discontinuità esaminata.

In presenza di una discontinuità non simmetrica il segnale misurato cambia infatti in funzione del settore in cui avviene la misura. La Figura 8 mostra il diagramma polare della risposta di una striscia metallica non simmetrica incollata su un tubo di 6". La striscia, che ha una apertura angolare di 90°, è posta ad una distanza di 12 m dal punto in cui si effettua la misura.

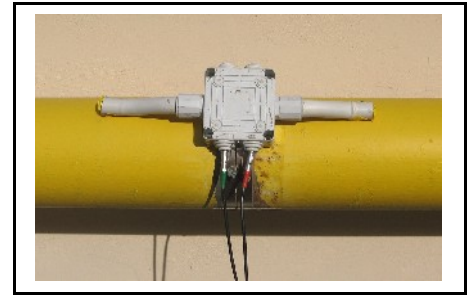


Figura 7 – Il nuovo sensore locale

I risultati ottenuti mostrano un sufficiente accordo tra i dati simulati con un modello agli elementi finiti e quelli misurati ottenuti con il nuovo sensore locale.

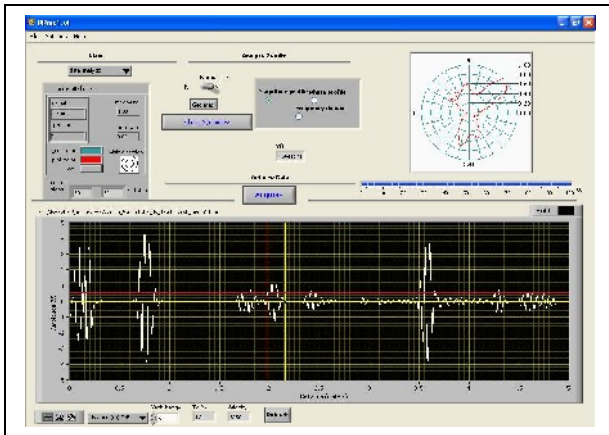


Figura 8 – Profili di ampiezza

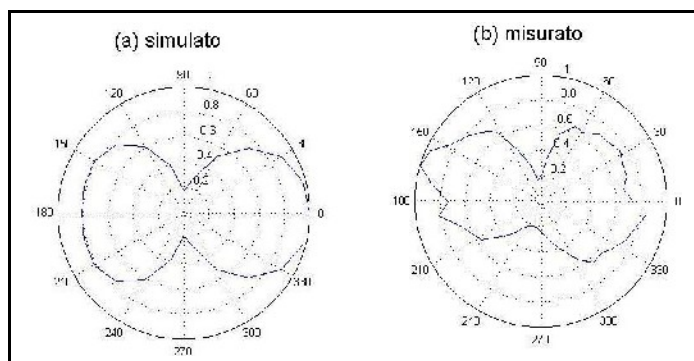


Figura 9 – Interfaccia utente

L'elaborazione dei segnali misurati sui differenti settori angolari consente di valutare un opportuno coefficiente di non simmetria per ciascuna delle discontinuità esaminate. Il coefficiente vale 0 se la discontinuità è simmetrica ed assume valori crescenti al crescere del grado di non simmetria della discontinuità misurato

dal parametro $v = 1 - \Delta\phi/360$ essendo $\Delta\phi$ l'apertura angolare della discontinuità.

La misura dei segnali riflessi con il nuovo sensore locale e la successiva elaborazione sono gestiti attraverso un software dedicato sviluppato dal DSEA del quale la Figura 9 mostra l'interfaccia utente.

Test su condotta di gas in esercizio

La condotta di gas descritta in Tabella 2 è stata utilizzata per verificare le prestazioni del nuovo sensore magnetostrittivo. Lungo la condotta sono state incollate una serie di strisce metalliche di differente spessore e apertura angolare. Le strisce, simmetriche e non simmetriche, modellano una serie di difetti presenti lungo la condotta, caratterizzata peraltro dalla presenza di giunzioni simmetriche in corrispondenza delle saldature tra i tubi che costituiscono la condotta. La Figura 10a rappresenta il set up sperimentale utilizzato mentre la Figura 10b mostra la distribuzione delle discontinuità geometriche (artefatte e

non) lungo la condotta. In particolare le discontinuità identificate con i numeri 3 e 10 sono poste ad una distanza dal ricevitore RX, rispettivamente, di 2 m e di 28 m. L'obiettivo del test è riconoscere le discontinuità simmetriche da quelle non simmetriche.

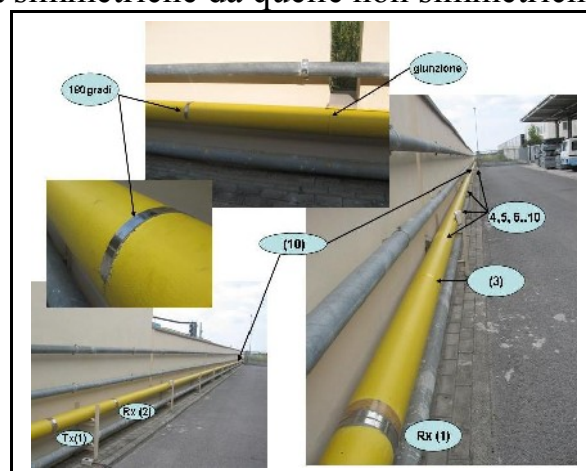
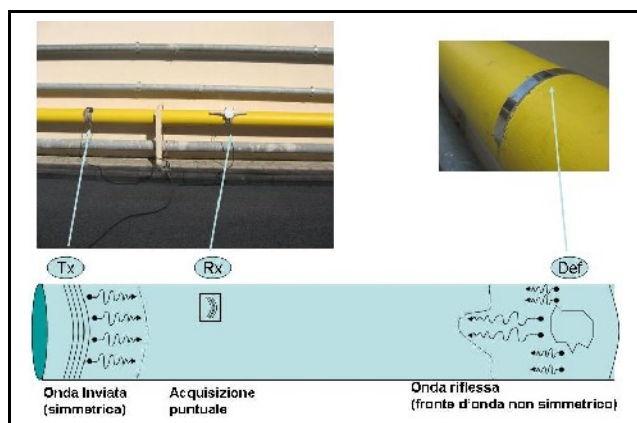


Figura 10 – (a) set up sperimentale; (b) posizione delle discontinuità geometriche

Risultati

La misura è stata effettuata con il nuovo sensore magnetostrittivo acquisendo 40 segnali riflessi associati ad altrettanti settori angolari distribuiti uniformemente lungo la circonferenza della condotta. Elaborando i segnali ottenuti risultano identificate e localizzate 8 discontinuità geometriche. Valutato per ciascuna discontinuità identificata il relativo coefficiente di non simmetria e stabilita euristicamente la soglia del 50% al di sopra della quale la discontinuità è classificata come non simmetrica si ottengono i risultati mostrati in Tabella 3. Nella Tabella 3, II indica l'impulso iniziale, OD l'onda diretta mentre S ed NS indicano rispettivamente una discontinuità classificata come simmetrica o non simmetrica. Risultano presenti lungo la condotta 4 discontinuità di tipo simmetrico e 4 discontinuità di tipo non simmetrico.

Tabella 3 – Classificazione delle discontinuità geometriche rilevate

Discontinuità	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distanza da RX [m]	0	1	2.2	5.3	7.3	12.7	14.8	26	27	28.9
Coefficiente di Non Simmetria (%)	-	-	19.0	3.4	91.2	91.5	24.5	77.4	6.6	77.0
Classificazione	II	OD	S	S	NS	NS	S	NS	S	NS

Verifica

La Figura 11 mostra i risultati intermedi del test con associata l'effettiva geometria del tratto di condotta ispezionato. Con riferimento alla figura 10 nel tratto ispezionato si hanno 3 giunzioni simmetriche in corrispondenza di altrettante saldature (discontinuità 4, 7, 9); sono state inoltre incollate sulla condotta 1 striscia simmetrica e 4 strisce non simmetriche. Il totale delle discontinuità simmetriche e non simmetriche nonché la loro distanza dal ricevitore corrisponde ai risultati del test mostrati in Tabella 3.

Ancora con riferimento alla Figura 11, il segnale mostrato corrisponde a quello che si otterrebbe eseguendo l'ispezione con un sensore MsS standard. Da notare come tale segnale permetta di individuare e localizzare le discontinuità presenti lungo la condotta fornendo la corretta distanza dal ricevitore. Tuttavia il segnale ottenuto non permette di valutare il tipo di discontinuità. Mentre le discontinuità 4 e 7 possono essere associate, vista la loro ampiezza ed il profilo di attenuazione, alla riflessione dalle giunzioni presenti

lungo la condotta altrettanto non può farsi per la discontinuità 9. In questo caso il segnale riflesso dalla saldatura risulta fortemente attenuato per la presenza della striscia non simmetrica 8.

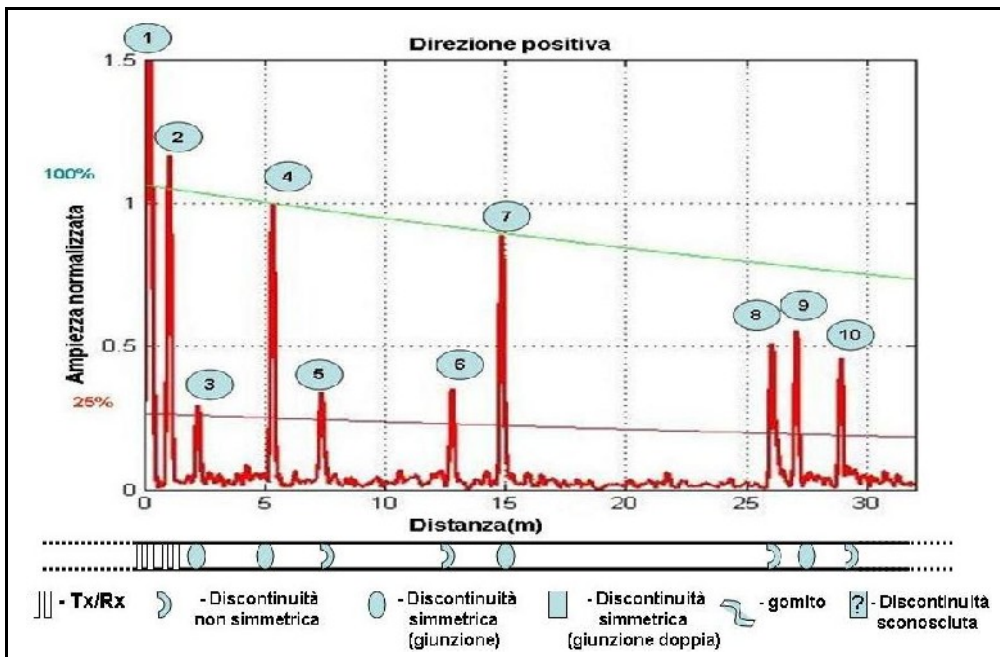


Figura 11 – Ampiezza del segnale riflesso e geometria della condotta

5. Conclusioni

La classificazione delle discontinuità presenti lungo una condotta può risultare difficile se basata unicamente sulle ampiezze dei segnali riflessi mediati sull'intera circonferenza. L'acquisizione locale possibile con il nuovo sensore locale presentato in questa memoria e la successiva elaborazione dei segnali riflessi ottenuti permette di migliorare la diagnostica di condotte rispetto al sensore usato dallo strumento MsS2020®.

6. Ringraziamento

Si ringrazia Valdarno s.r.l., Pisa per aver dato la disponibilità ad eseguire i test su condotte in esercizio.

7. Bibliografia

1. D.N. Alleyne, B. Pavlakovic, "Rapid Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework using Guided Waves", 15th WCNDT, Roma, 2000.
2. Jan Heerings, Norbert Trimborn, Adriaan den Herder – "Inspection Effectiveness and its Effect on the Integrity of Pipework", Proceedings, ECNDT 2006.
3. Francesco Bertoncini, Marco Raugi – "Analysis of Torsional Guided Waves for Inspection of Pipes", WSEAS Transactions on systems, vo.4, n.11, pp.2001-2009, year 2005.
4. M. S. Choi, S.Y. Kim, H. Kwun – "An equivalent circuit model of magnetostrictive transducers for guided wave applications", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 47, No. 3, September 2005, pp. 454-462.
5. H. Kwun, S.Y. Kim, G. M. Light – "The magnetostrictive sensor technology for long-range guided wave testing and monitoring of structures", Mat. Eval., 61, 2003, pp. 80-84.
6. "Operating and technical instructions for magnetostrictive sensor (MSS) instrumentation system, model MsSR2020, MsSR2020D", prepared by Sensor Systems

and NDE Technology Department, Applied Physics Division, SWRI, San Antonio, Texas
– December 2004