

Linea Guida

CONTROLLO
AD ONDE
GUIDATE
DI TUBAZIONI

ENTE DELLA
ZONA
INDUSTRIALE
DI
PORTO
MARGHERA



Linea Guida

**CONTROLLO
AD ONDE
GUIDATE
DI TUBAZIONI**

DECRETO DEL MINISTERO DELLE ATTIVITÀ PRODUTTIVE

n. 329 del 1 dicembre 2004 - Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

Linea Guida "Controllo ad onde guidate di tubazioni"

Il presente documento è stato elaborato al fine di contribuire alla migliore applicazione del decreto 329/04 artt. 10 e 16 dal Gruppo di Lavoro: Controlli non distruttivi onde convogliate e contenimento emissioni istituito con determina del Direttore del Dipartimento I.S.P.E.S.L. di Venezia del 26 febbraio 2007 e per successive integrazioni, con determina prot. n. 10299 del 25 settembre 2007 composto da:

	Direzione Interregionale Vigili del Fuoco del Veneto e Trentino Alto Adige - Padova	Direttore	Ing. Dr. Marcello Della Giovampaola Ing. Dr. Enrico Trabucco
	ARPAV - Venezia		Ing. Dr. Marco Ziron
	Coordinamento Tecnico Interregionale Gruppo di Lavoro "Macchine ed Impianti"	ARPAV - VE ASL 6 - Livorno AUSL - Piacenza	Ing. Dr. Rinaldo Giraldi Ing. Dr. Spartaco Geppetti Ing. Dr. Luigi Pallavicini
	Università IUAV - Venezia		Ing. Dr. Prof. Piercarlo Romagnoni
	Università di Bologna - D.I.S.T.A.R.T. Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio.		Ing. Dr. Alessandro Marzani
	Esperto in Onde Guidate - Londra UK W53 TX		Ing. Dr. Alessandro Demma
	Modulo Uno Presidente Commissione Acustica UNI - Milano		Ing. Dr. Giuseppe Elia
	I.S.P.E.S.L. Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro		
	Dipartimento Tecnologie di Sicurezza - Roma		Ing. Dr. Vittorio Mazzocchi Ing. Dr. Elisa Pichini Maini
	Laboratorio C.N.D. - A.d R. ISPEL Roma Vice Presidente Commissione PND-UNI - Milano		Ing. Dr. Carlo De Petris
	Dipartimento Certificazione e Conformità di Prodotti e Impianti - Roma		Ing. Dr. Corrado Delle Site
	Dipartimento di Taranto		Ing. Dr. Vincenzo Annoscia
	Dipartimento di Firenze		Dr. Paolo Lenzuni
	Dipartimento di Venezia	Presidente GL Coordinatore GL	Dr. Livio Giuliani Ing. Dr. Roberto Romano Ing. Dr. Francesco Boella Ing. Dr. Mauro Piovesan
		Segretario GL	Dr. Edoardo D'Amico
	Ente della Zona Industriale di Porto Marghera - Venezia		Per.Ind Egisto Rampado



Dipartimento di Venezia



Presentazioni

L'ISPEL, che raccoglie la tradizione dell'ANCC, ha sempre tenuto a mantenere un'adeguata capacità d'aggiornamento alle nuove tecnologie d'interesse nella sicurezza degli impianti e delle apparecchiature in pressione con particolare attenzione alle metodologie e alla messa a punto di tecniche utilizzate in sede di fabbricazione e di esercizio.

La vigente normativa nella prevenzione e sicurezza del lavoro colloca l'Istituto a riferimento nazionale ed internazionale del settore. L'Istituto è stato altresì accreditato quale Organismo Notificato per le attività previste dalle direttive PED, TPED e ATEX, coniugando la riconosciuta competenza con l'imparzialità e la terzietà propria della Pubblica Amministrazione.

Forte è poi la presenza sul territorio di Dipartimenti orientati al supporto alla piccola e media impresa che nell'ambito della prevenzione e sicurezza del lavoro trova nell'Istituto caratteristiche di disponibilità e professionalità.

In tal senso, ed in coerenza con la missione dell'Istituto, la linea guida che qui si propone, nel solco tracciato dalla linea guida per l'Esame Visivo su attrezzature a pressione, costituisce un ulteriore piccolo ma importante tassello di un mosaico più complesso concernente l'approccio ispettivo e valutativo di tubazioni e condotte, mediante tecnica di controllo non distruttivo ad Onde Guidate.

Il Direttore del Dipartimento

Dott. Livio Giuliani

L'Ente della Zona Industriale di Porto Marghera, sorto nel 1924 come "Associazione tra gli Industriali di Porto Marghera", a cui aderiscono attualmente la gran parte delle aziende insediate nella zona industriale si propone:

- lo studio dei problemi economici e tecnici che possono interessare la zona e le industrie di Marghera;
- la tutela e lo sviluppo delle industrie della zona di Marghera ed in particolare delle aziende associate;
- il miglioramento dei servizi pubblici e delle condizioni generali della zona di Marghera;
- la gestione della propria Rete di Controllo della Qualità dell'Aria.

L'attività svolta dall'Ente Zona inoltre si coordina con quella degli altri Enti ed Associazioni presenti sul territorio; l'Ente, da sempre interessato all'evoluzione tecnologica e normativa, ha collaborato alla stesura di questa linea guida in quanto la tecnica d'ispezione ad onde guidate rappresenta un'innovazione dei metodi di valutazione dello stato di conservazione ed efficienza delle tubazioni, quindi è di estremo interesse delle Aziende industriali rappresentate.

Il Presidente

Dott. Ing. Lucio Pisani

Introduzione

Il metodo ad Onde Guidate sta riscuotendo sempre maggiore interesse nel campo della sicurezza degli impianti industriali. Esso consente, infatti, di svolgere con semplicità e rapidità, un controllo di *screening* delle tubazioni ai fini della valutazione del loro stato di conservazione ed efficienza. Proprio perché controllo di *screening*, il metodo ad Onde Guidate presuppone ulteriori controlli di dettaglio, da effettuare su zone e componenti delle tubazioni che abbiano evidenziato indicazioni di una certa rilevanza.

L'utilizzo esteso a vari tipi d'installazione e l'agevole ripetersi dell'indagine su tubazioni in esercizio, rende questo controllo particolarmente indicato per una diagnosi d'insieme (a carattere globale) sullo stato d'integrità anche di tubazioni coibentate o interrato, difficilmente ispezionabili con altri metodi, senza interventi di preparazione particolarmente onerosi.

La linea guida qui proposta è stata redatta con l'intento di fornire:

- per quanto possibile, il senso concreto delle potenzialità diagnostiche della metodica, ma sottolinearne anche le limitazioni applicative;
- gli elementi essenziali di caratterizzazione della metodica sotto il profilo della fisica di base, dell'adeguatezza dell'approccio diagnostico per le diverse tipologie applicative, della descrizione delle principali condizioni operative del controllo e interpretative dei dati rilevati;
- le basi per un approccio strutturato della metodica, complementare al primo importante contributo della specifica norma sperimentale di prodotto elaborata a livello nazionale.

Il documento non ha la pretesa di essere un manuale tecnico, né di indicare prescrizioni operative e clausole contrattuali, ma pone come obiettivo l'informazione di base sugli aspetti applicativi ed operativi di una metodologia di CND a carattere innovativo e di attuale impressionante diffusione all'uso.

Il Direttore del Dipartimento Tecnologie di Sicurezza

Dott. ing. Vittorio Mazzocchi

Il Direttore del Dipartimento Certificazione e Conformità di Prodotti e Impianti

Dott. ing. Federico Ricci

Il Direttore del Dipartimento di Venezia

Dott. Livio Giuliani

CONTROLLO AD ONDE GUIDATE DI TUBAZIONI

1. INTRODUZIONE
2. SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE
3. RIFERIMENTI NORMATIVI
4. TERMINI E DEFINIZIONI
5. CLASSIFICAZIONE DELL'APPROCCIO METODOLOGICO
 - 5.1. TECNICA AD ECO - IMPULSO (*Pulse - Echo*)
 - 5.2. TECNICA A TRASDUTTORE REMOTO (*Pitch - Catch*)
 - 5.3. TECNICA A TRASDUTTORE REMOTO (*Through - Transmission*)
 - 5.4. TECNICA DI MONITORAGGIO AD ECO - IMPULSO (*Pulse - Echo Monitoring*)
6. PROCEDURA DI CONTROLLO AD OG DI TUBAZIONI
 - 6.1. DOCUMENTAZIONE PRELIMINARE ALLA PROVA
 - 6.2. PERSONALE
 - 6.3. STRUMENTAZIONE DEDICATA AL CONTROLLO AD OG
 - 6.3.1 Strumentazione OG
 - 6.3.2 Dotazione ausiliaria
 - 6.4. CONDIZIONI RELATIVE AL CONTROLLO
 - 6.4.1. Identificazione delle superfici da esaminare
 - 6.4.2. Accessibilità e trattamento delle superfici
 - 6.4.3. Sicurezza nell'esecuzione del controllo
 - 6.4.4. Tecniche di esame
 - 6.4.5. Esecuzione del controllo
 - 6.4.6. Accettabilità del segnale ai fini valutativi
 - 6.4.7. Interpretazione, valutazione e classificazione delle discontinuità
 - 6.4.8. Rapporto di prova
 - 6.4.9. Archiviazione della documentazione

Appendici

- A) FISICA DI BASE E PRINCIPI GENERALI DEL METODO
- B) ADEGUATEZZA ALL'USO DELLE OG
- C) APPARECCHIATURA OG E VERIFICA PERIODICA
- D) CASI APPLICATIVI
- E) CLASSIFICAZIONE DELLE INDICAZIONI RILEVATE NEL CONTROLLO AD OG
- F) MODELLO DEL RAPPORTO DI PROVA
- G) BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUZIONE

Il controllo ad Onde Guidate^[1] è un metodo di Prova Non Distruttiva^[2] a carattere globale, basato sulla propagazione di onde elastiche ultrasoniche a bassa frequenza (generalmente fino a 100 kHz), finalizzato alla rilevazione di variazioni della sezione trasversale della struttura indagata attraverso la misurazione di variazioni di impedenza acustica.

Una descrizione della fisica di base del controllo ad OG e dei relativi principi generali viene fornita nell'Appendice A.

Le OG vengono tipicamente generate a partire da una zona ristretta della struttura, da dove si propagano in entrambe le direzioni restituendo, eventualmente, echi dovuti alla presenza di variazioni di impedenza acustica lungo il tratto interessato della struttura in esame. La fig. 1 illustra schematicamente il percorso dell'onda elastica primaria incidente generata dal sistema di eccitazione e quello dell'onda riflessa a causa della presenza di una discontinuità alla quale è associata una variazione di impedenza acustica.



Fig. 1 - Rappresentazione schematica del percorso dell'onda elastica primaria incidente e di quello dell'onda riflessa a causa della presenza di una discontinuità.

Il controllo ad OG:

- consente un'analisi diagnostica a carattere globale (*screening*) dello stato d'integrità di tubazioni, facilmente ripetibile e di più rapida esecuzione rispetto a quella derivante dall'applicazione di tecniche basate sul metodo ad Ultrasuoni ad incidenza normale;
- è particolarmente efficace, per il rilevamento di stati corrosivi interni o esterni, e più in generale di difetti planari estesi con mancanza di metallo (es. erosioni) o senza (es. ammaccature). La rilevazione di altre indicazioni riconducibili a fratture, cricche e/o altre discontinuità circonferenziali e/o assiali, non è da escludere compatibilmente alla loro dimensione, collocazione ed orientamento, ed alla sensibilità della strumentazione OG utilizzata;
- può essere applicato per diversi tipi di installazioni, tra le quali tubazioni interrato o coibentate, senza necessariamente richiedere il "fermo impianto".

Anche se l'impiego delle OG consente di individuare l'area interessata dalla presenza di una discontinuità, ciò non esaurisce generalmente il controllo di tale area. Esso dovrà essere, pertanto, integrato da ulteriori controlli, condotti con metodi e tecniche PND complementari al fine di pervenire ad una caratterizzazione di dettaglio della discontinuità rivelata e della sua estensione.

Per modalità diagnostiche basate sulla propagazione di onde elastiche, il controllo ad OG ha solo qualche affinità con quelli condotti con metodi ad Ultrasuoni (tipicamente inteso) ed Emissione Acustica, e sicuramente non è ad essi pienamente riconducibile. Ciò è ancor più vero sotto il profilo strumentale ed operativo. Tali premesse sono essenziali per non incorrere da subito nell'equivoco di una insostenibile analogia tra il controllo ad OG ed altri che hanno finalità e modalità applicative distinte.

La Fig. 2 rappresenta schematicamente la differenza nell'approccio diagnostico tra un controllo convenzionale con metodo ad Ultrasuoni e quello ad Onde Guidate. Risulta perciò intuibile la ragione per cui il controllo ad OG viene anche detto "a lungo raggio".

¹ Nel documento le Onde Guidate sono indicate, per comodità, con la sigla OG in difformità alla simbologia internazionale che adotta la sigla GW (Guided Waves).

² Nel documento le Prove Non Distruttive sono indicate PND.



Fig. 2 - Rappresentazione schematica dell'approccio diagnostico del controllo ad Onde Guidate e quello del metodo ad Ultrasuoni.

2. SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

La presente Linea Guida ha l'obiettivo di presentare criteri e metodologie di carattere generale per indirizzare l'attività del controllo ad OG delle "tubazioni metalliche". Più in particolare, essa ha lo scopo di fornire raccomandazioni in merito a:

- opportunità applicative,
- modalità esecutive,
- valutazione e verifica dell'affidabilità dei risultati,
- registrazione e archiviazione della documentazione,

dei controlli ad OG delle tubazioni effettuati con lo scopo di verificarne l'integrità e le condizioni di conservazione ai fini dell'esercizio in efficienza.

Per "tubazioni" si intendono i componenti di una condotta destinata al trasporto di fluidi, siano essi indistintamente: liquidi, vapori, gas.

Le tubazioni possono essere collegate tra loro o ad altri componenti dell'impianto per mezzo di giunzioni fisse (saldature) o rimovibili (flange o raccordi), presentare lungo il loro sviluppo curve e/o derivazioni, innestarsi su altre tubazioni mediante bocchelli o altri accessori, essere rivestite di materiale vario (coibente, refrattario, bituminoso...), fuori terra (eventualmente sovrappasso), ovvero essere interrato o sommerse, e se necessario mantenute in posizione mediante supporti.

Le indicazioni di seguito fornite sono generalmente riferibili a tubazioni in acciaio al carbonio o basso legato di diametro compreso tra DN 25 (1") e DN 1200 (48"), spessore compreso tra 2 mm e 55 mm e temperatura di parete compresa tra 0 °C e 70 °C, anche coibentate.

Non può escludersi che differenti o specifiche applicazioni su tubazioni di particolare tipologia costruttiva e per materiali diversi dall'acciaio possano essere comunque condotte in conformità a specifiche procedure opportunamente qualificate (vedi Sezione 6.4.4).

In Appendice B viene fornito un algoritmo di valutazione dell'adeguatezza all'uso del controllo OG.

3. RIFERIMENTI NORMATIVI

- UNI U45000990 Prove non distruttive - Controllo mediante onde guidate di tubazioni in acciaio fuori terra.
- UNI EN 473:2001; Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive - Principi generali.
- UNI EN 1330-2:2000; Terminologia termini comuni ai metodi di prove non distruttive.
- UNI EN 13480-1:2006; Tubazioni industriali metalliche - Parte 1: Generalità.
- UNI EN 13480-2:2003; Tubazioni industriali metalliche - Parte 2: Materiali.
- UNI EN 13480-3:2007; Tubazioni industriali metalliche - Parte 3: Progettazione e calcolo.

- UNI EN 13480-4:2003; Tubazioni industriali metalliche - Parte 4: Fabbricazione ed installazione.
- UNI EN 13480-5:2003; Tubazioni industriali metalliche - Parte 5: Collaudo e prove.
- UNI EN 13480-6:2006; Tubazioni industriali metalliche - Parte 6: Requisiti aggiuntivi per tubazioni interrate.
- CEN/TR 13480-7:2002; Guidance on the use of conformity assessment procedures.
- CEN/TR 14748:2004; Non Destructive Testing - Methodology for qualification of non destructive tests.
- API 570 Piping Inspection Code: Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-service Piping Systems, Second Edition, October 1998, Addendum 1, February 2000, Addendum 2, December 2001, Addendum 3, August 2003.
- D. Lgs. 25 febbraio 2000, n. 93 "Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione".
- D. Lgs. 1 dicembre 2004, n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93".
- Raccolta M, rev. 1995 "Specificazioni tecniche applicative del D.M. 21 Novembre 1972 riguardanti l'impiego dei materiali nella fabbricazione degli apparecchi e sistemi in pressione".
- Raccolta S, rev. 1995 "Specificazioni tecniche applicative del D.M. 21 Novembre 1972 per l'impiego della saldatura nella fabbricazione e riparazione degli apparecchi e sistemi in pressione".

4. TERMINI E DEFINIZIONI

Ai fini della presente Linea Guida si applicano i termini e le definizioni riportate in:

- UNI EN 13480-1-2-3-4-5-6:2006; Tubazioni industriali metalliche;
- API 570 Piping Inspection Code: Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-service Piping Systems, Second Edition, October 1998, Addendum 1, February 2000, Addendum 2, December 2001, Addendum 3, August 2003;
- D.Lgs. 25 febbraio 2000, n. 93 "Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione";

unitamente ai seguenti:

Accessori a pressione

Dispositivi aventi funzione di servizio ed i cui alloggiamenti sono sottoposti a pressione.

Accessori di sicurezza

Dispositivi destinati alla protezione delle attrezzature contro il superamento dei limiti ammissibili.

Attrezzature a pressione

Recipienti, tubazioni, attrezzature a pressione a focolare o altri dispositivi di riscaldamento con rischio di surriscaldamento, accessori di sicurezza ed accessori a pressione.

Caratteristica geometrica

Variazione della sezione trasversale riconducibile alle caratteristiche costruttive di una tubazione (saldatura, supporto, flangia, curva, ecc.) che causa una variazione di impedenza acustica.

Curva di Correzione dell'Ampiezza con la Distanza (Curva DAC)

Curva rappresentante il decadimento in ampiezza del segnale, dovuto alla attenuazione associata alla propagazione di un'onda guidata.

Discontinuità

Variazione della sezione trasversale, non riconducibile ad una caratteristica geometrica, che dà luogo ad una indicazione.

Elementi annessi

Flange, raccordi, manicotti, supporti, alette mobili, ecc.

Guida d'onda

Componente strutturale, in questo caso la tubazione, che grazie alla sua particolare geometria consente la propagazione di onde guidate.

Indicazione

Segnale discriminabile dal rumore di fondo, generato da un riflettore.

Indice di modo (i)

Numero intero utilizzato come variabile contatore per distinguere e ordinare i modi di una determinata famiglia di onde guidate, solitamente per valori di velocità di fase crescente.

Onda Guidata Flessurale $F(n,i)$

Onda caratterizzata da un moto senza simmetria assiale rispetto all'asse della tubazione.

Onda Guidata Longitudinale $L(n=0,i)$

Onda caratterizzata da un moto a simmetria assiale rispetto all'asse della tubazione con spostamento prevalente lungo tale asse.

Onda Guidata Torsionale $T(n=0,i)$

Onda caratterizzata da un moto a simmetria assiale rispetto all'asse della tubazione con spostamento prevalente in direzione tangenziale alla sezione della stessa.

Ordine circonferenziale (n)

Numero intero di sinusoidi che caratterizzano la variazione dello spostamento associato ad un determinato modo guidato lungo la circonferenza della tubazione. Ad esempio ad $n=0$ corrisponde un'onda guidata con spostamento a simmetria assiale (onde Torsionali e Longitudinali).

Perdita della sezione trasversale (PST)

Area di sezione trasversale mancante per la presenza, tipicamente, di corrosione e/o erosione.

Riflettore

Discontinuità o caratteristica geometrica che produce un'indicazione.

Scansione

Episodio di generazione di OG e acquisizione di eventuali riflessioni.

Sensibilità del controllo

Capacità di rilevare le indicazioni provenienti da discontinuità note artificiali, assunte come campione di riferimento.

Sistema di generazione/ricezione

Dispositivo, generalmente configurato ad anello, utilizzato per la eccitazione/ricezione di onde guidate, da posizionare direttamente sulla tubazione. Il sistema di generazione/ricezione generalmente sfrutta principi di trasduzione piezoelettrica o elettromagnetica.

Tratto utile

Tratto di tubazione per il quale viene accertata la possibilità di svolgere efficacemente il controllo ad OG.

Zona morta

Zona della tubazione, limitrofa a quella d'installazione del sistema di eccitazione/ricezione, di estensione variabile da alcune decine di centimetri ad alcuni metri.

5. CLASSIFICAZIONE DELL'APPROCCIO METODOLOGICO

Le modalità operative riconosciute per il controllo ad OG sono le seguenti:

- tecnica ad eco-impulso (indicata anche come *Pulse - Echo*), fig. 3;
- tecnica a trasduttore remoto (indicata anche come *Pitch - Catch*), fig. 4;
- tecnica a trasduttore remoto (indicata anche come *Through - Transmission*), fig. 5;
- tecnica di monitoraggio ad eco-impulso (indicata come *Pulse - Echo monitoring*), fig. 6.



Fig. 3 - Rappresentazione schematica del set-up relativo alla tecnica ad eco-impulso (*Pulse - Echo*).



Fig. 4 - Rappresentazione schematica del set-up relativo alla tecnica a trasduttore remoto (*Pitch - Catch*).



Fig. 5 - Rappresentazione schematica del set-up relativo alla tecnica a trasduttore remoto (*Through - Transmission*).



Fig. 6 - Rappresentazione schematica del set-up relativo alla tecnica di monitoraggio ad eco-impulso (*Pulse - Echo monitoring*).

5.1 TECNICA AD ECO-IMPULSO (*Pulse - Echo*)

La tecnica ad eco-impulso (*Pulse - Echo*), che prevede l'utilizzo di un solo sistema di generazione/ricezione delle OG, viene schematicamente illustrata in fig. 3.

Il sistema di trasduzione passa alternativamente dalla modalità attiva (*Pulse*), nella quale il sistema di generazione invia il segnale di *test*, alla modalità passiva (*Echo*), nella quale rileva invece gli echi generati dai riflettori eventualmente presenti nella tubazione. L'interpretazione dei segnali nella successiva fase di analisi, basata sulla discriminazione delle direzioni di propagazione e dei modi d'onda, consente di localizzare e caratterizzare le indicazioni rilevate.

La corretta applicazione della tecnica richiede la presenza di almeno due caratteristiche geometriche di riferimento (generalmente saldature di composizione) entro il tratto utile di tubazione allo scopo di calcolare le curve DAC (vedi Sezione 6.4.5).

5.2 TECNICA A TRASDUTTORE REMOTO (*Pitch - Catch*)

La tecnica a trasduttore remoto (*Pitch - Catch*) viene schematicamente illustrata in fig. 4. Utilizza due sistemi di generazione/ricezione: il primo dei due anelli assume il ruolo di *Master*, il secondo anello assume il ruolo di *Slave*, o remoto, e viene opportunamente distanziato dal primo.

Il sistema di trasduzione dell'anello *Master* passa alternativamente dalla modalità attiva (*Pulse*), nella quale i trasduttori inviano il segnale di test, alla modalità passiva (*Echo*), nella quale i trasduttori rilevano i segnali di ritorno dalla tubazione. Anche in questo caso, l'interpretazione dei segnali nella successiva fase di analisi, basata sulla discriminazione delle direzioni di propagazione e dei modi d'onda, consente di localizzare e caratterizzare le indicazioni rilevate.

Il sistema di trasduzione dell'anello *Slave* lavora esclusivamente nella modalità passiva ricevendo il segnale trasmesso dall'anello *Master*.

A differenza della modalità *Pulse - Echo*, con l'uso del trasduttore remoto è possibile eliminare la zona morta.

5.3 TECNICA A TRASDUTTORE REMOTO (*Through - Transmission*)

La tecnica a trasduttore remoto (*Through - Transmission*) viene schematicamente illustrata in fig. 5. Questa tecnica operativa risulta molto simile a quella a trasduttore remoto (*Pitch - Catch*) in quanto utilizza anch'essa due sistemi di generazione/ricezione il primo dei quali assume il ruolo di *Master* mentre il secondo quello di *Slave*. Tuttavia, a differenza della modalità a trasduttore remoto (*Pitch - Catch*), in questo caso i due sensori risultano maggiormente distanziati l'uno dall'altro con lo scopo di rilevare una corrosione media distribuita lungo il tratto di tubazione compreso tra di essi attraverso una misura media dell'attenuazione dell'onda guidata primaria.

Corrosioni generalizzate o, comunque, estese in lunghezza assiale, potrebbero infatti non manifestarsi mediante echi di riflessione, ma possono essere dedotte, per via implicita, dall'incremento di attenuazione del segnale.

Il sistema è infatti in grado di determinare la perdita di energia acustica confrontando in tempo reale l'energia emessa dall'anello *Master* con quella ricevuta dall'anello *Slave* o remoto, e di calcolare le curve DAC (vedi Sezione 6.4.5).

5.4 TECNICA DI MONITORAGGIO AD ECO-IMPULSO (*Pulse - Echo Monitoring*)

La tecnica di monitoraggio ad eco-impulso viene schematicamente illustrata in fig. 6.

L'anello è permanentemente connesso alla struttura, protetto esternamente da agenti atmosferici e ambientali (acqua, terra, etc.), come mostrato, in una possibile modalità, in fig. 7, e pre-cablato in modo tale da permettere una facile e veloce connessione durante la fase operativa di *screening*.

Il sistema di trasduzione passa alternativamente dalla modalità attiva (*Pulse*) nella quale i trasduttori inviano il segnale di test, alla modalità passiva (*Echo*) nella quale i trasduttori rilevano i segnali di ritorno dalla tubazione.

L'interpretazione dei segnali nella successiva fase di analisi, basata sulla discriminazione delle direzioni di propagazione e dei modi d'onda, consente di localizzare e caratterizzare le indicazioni rilevate. Inoltre, la comparazione dei segnali di *test* ottenuti in momenti distinti, permette di evidenziare le eventuali evoluzioni nel tempo delle anomalie.

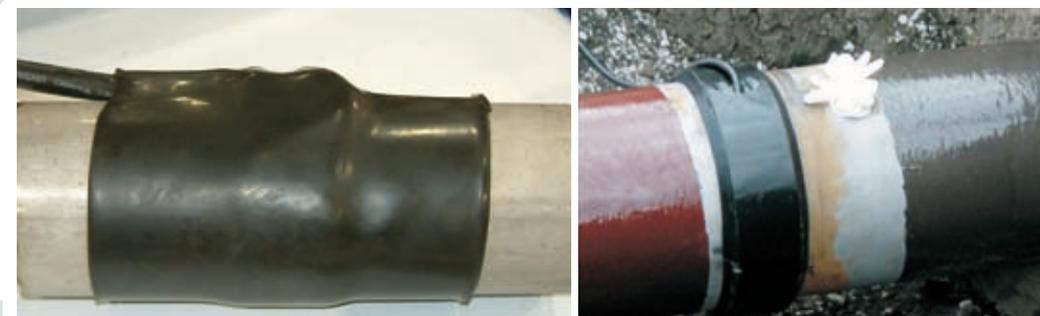


Fig. 7 - Sistemi di eccitazione ad applicazione permanente.

6. PROCEDURA DI CONTROLLO AD OG DI TUBAZIONI

Il controllo ad OG di tubazioni presuppone la elaborazione di un piano di controllo che, basandosi sull'analisi dei meccanismi di danno individuati come noti e prevedibili, definisca specifiche condizioni operative. Tali condizioni operative, anche nel caso di controllo ad OG, devono essere precisate nell'ambito di una procedura che consideri alcuni aspetti di notevole rilevanza, di seguito brevemente illustrati.

Si ricorda che il controllo ad OG ha caratteristiche di *screening* e, pertanto, ad ogni indicazione significativa, comunque rilevata, deve seguire un ulteriore controllo di dettaglio del componente o della zona d'interesse, al fine di verificare la presenza di una discontinuità e caratterizzarne, eventualmente il tipo, la forma e l'orientamento.

6.1 DOCUMENTAZIONE PRELIMINARE ALLA PROVA

Preliminarmente al controllo ad OG, occorre disporre di alcune informazioni necessarie ad una più attenta pianificazione delle attività. In tal senso, si riporta di seguito l'elenco di alcune informazioni di tipo identificativo e descrittivo della tubazione oggetto del controllo, di particolare utilità:

- a) utilizzatore dell'impianto;
- b) identificazione dell'impianto;
- c) identificazione della linea della tubazione;
- d) riferimenti del diagramma P&I (*Piping and Instrumentation*);
- e) categoria della tubazione;
- f) identificazione della sezione;
- g) diametro (espresso anche come DN);
- h) caratteristiche costruttive (materiali, spessori, lavorazioni, ecc.);
- i) fluido circolante (tipo di fluido *liquido*, *vapore*, *gas*, gruppo, caratteristiche di aggressività di tipo corrosivo/erosivo);
- j) condizioni di esercizio (temperatura min./max., pressione min./max.);

6.2 PERSONALE

Il personale che esegue il controllo a onde guidate deve essere qualificato in conformità alla UNI EN 473, o ad altra norma equivalente nel settore industriale interessato, nel metodo utilizzato, qualora esistente.

In mancanza di una disciplina di riferimento, tale personale può essere qualificato secondo procedure approvate e riconosciute dalle parti dopo aver frequentato con profitto sia uno specifico corso formativo di base sul metodo, sia un corso specifico di addestramento all'uso della strumentazione dedicata. Tali corsi possono essere tenuti presso i Centri di Formazione PND di Enti previsti dal D. Lgs. 81/2008.

6.3 STRUMENTAZIONE DEDICATA AL CONTROLLO AD OG

6.3.1 Strumentazione OG

La strumentazione dedicata tipicamente utilizzata per il controllo ad OG è essenzialmente costituita da:

- 1) *computer* dotato di schede di condizionamento e di *software* per la generazione, la registrazione e il trattamento del segnale,
- 2) strumentazione per l'amplificazione del segnale,
- 3) sistema di trasduzione per la generazione e la ricezione delle OG,
- 4) cavi di connessione tra *computer* e strumentazione,
- 5) cavi di connessione tra la strumentazione ed il sistema di trasduzione.

Una vista d'insieme di alcuni tipici apparati strumentali, attualmente sul mercato, per il controllo ad OG è presentata in fig. 8.

I sistemi di generazione/ricezione sfruttano diversi principi di trasduzione (piezoelettrica o elettromagnetica) e si configurano solitamente nella forma di anelli rigidi (fig. 9), fasce pneumatiche (fig. 10) come anche di semplici bracciali (fig. 11) da avvolgere sulla tubazione.



Fig. 8 - Vista di alcuni tipici apparati strumentali per il controllo ad OG, costituiti dal sistema di generazione/ricezione (installato sulla tubazione) e dalla relativa unità di controllo.

Gli anelli rigidi e le fasce pneumatiche portano al loro interno una serie di trasduttori piezoelettrici. Il numero e la distribuzione dei trasduttori lungo la direzione assiale del tubo e lungo la direzione circonferenziale è tale da assicurare la separazione dei singoli modi di onda guidata di interesse per l'analisi e la soppressione dei modi di onda guidata non desiderati. Solitamente gli anelli rigidi sono impiegati per tubazioni di diametro compreso tra DN 25 (1") e DN 200 (8"), mentre le fasce pneumatiche estendono l'applicazione a tubazioni di diametro fino a DN 1200 (48").

L'utilizzo di fasce pneumatiche richiede una pompa a corredo per il gonfiaggio, come mostrato in fig. 10, al fine di assicurare un buon accoppiamento con tra i trasduttori e la superficie esterna della tubazione. Alcune delle strumentazioni in commercio sono predisposte di pom-

pa pneumatica all'interno del sistema di generazione, per il gonfiaggio delle fasce.

I bracciali (fig. 11) sfruttano il principio fisico della magnetostrizione per generare e ricevere le onde guidate. La magnetostrizione risulta efficace solo su materiali ferromagnetici, quali l'acciaio. Nel caso in cui la tubazione non sia di materiale ferromagnetico, ad esempio alluminio, risulta possibile generare e ricevere onde guidate incollando solidamente alla tubazione una piccola striscia di materiale ferromagnetico (solitamente nickel) nella zona sottostante all'applicazione del bracciale (vedere fig. 11).



Fig. 9 - Sistemi di eccitazione ad anello rigido



Fig. 10 - Sistemi di eccitazione a fascia pneumatica.

L'efficienza della trasduzione magnetostrittiva è favorita dalla presenza, in corrispondenza del sensore, di un campo magnetico, cosiddetto di "bias", generalmente fornito da una serie di magneti permanenti.

Il sistema di registrazione deve permettere di localizzare la discontinuità all'interno del tratto utile.

L'efficienza dell'apparecchiatura ad OG deve essere periodicamente verificata secondo le indicazioni del fabbricante.

Ulteriori elementi descrittivi della apparecchiatura sono riportati in Appendice C.



Fig. 11 - Sistema di eccitazione a bracciale (a); striscia di materiale ferromagnetico (nickel) solidamente collegata alla tubazione (b).

6.3.2 Dotazione ausiliaria

Il personale addetto all'esecuzione del controllo OG deve disporre, all'occorrenza, di una dotazione strumentale ausiliaria, utile al rilevamento delle discontinuità, alla eventuale misurazione di loro parametri caratteristici o degli effetti del degrado (riduzione dello spessore, estensione della superficie corrosa, ecc.).

Oltre ai dispositivi di protezione individuale corrispondenti ai rischi specifici, a titolo puramente indicativo, viene di seguito riportata una lista di strumenti, dispositivi, attrezzature, apparecchiature, ecc. costituenti la dotazione ausiliaria utile per rendere più agevole il controllo ad OG *in situ*: pompa manuale, metro a nastro (i nastri da 3 metri e da 30 metri sono raccomandati), set chiavi esagonali, raschietto per vernice o spazzola metallica (per la pulizia dei tubi), blocco per appunti, penne, matite, specchio, torcia elettrica, apparecchio per misurazione dello spessore ad ultrasuoni, ricambi e *kit* di riparazione, pinze/strumento per l'estrazione del trasduttore, maschera antigas completa di filtro, imbrago completi di moschettoni, distanzio-metro *laser*, cordella da 50 metri, gazebo smontabile, estintori, tute da lavoro, forbice, pinza universale, tenaglia, *set* chiavi fisse, martello, *spray* ad azione sbloccante, *set* pinze, spatola, scalpello, livella, *cutter*, *set* cacciaviti, spazzole, pennarelli a diversa colorazione, levachiodi, specchietto con supporto magnetico, guanti, valigetta pronto soccorso, pistola gonfiaggio, attrezzatura fotografica, telecamera.

6.4 CONDIZIONI RELATIVE AL CONTROLLO

6.4.1 Identificazione delle superfici da esaminare

La tubazione o il tratto da esaminare deve essere identificabile o rintracciabile.

Le superfici e le estensioni delle relative aree da controllare devono essere individuabili e verificabili in conformità al Piano di Controllo o altra documentazione di riferimento.

Qualora necessario e possibile, al fine di rendere più agevole il riconoscimento di zone di particolare interesse o rilevanza, può essere utile procedere ad una marcatura o sistema equivalente per delimitarne i margini o evidenziare eventuali parti più significative per la presenza di discontinuità. Eventuali marcature, comunque, non devono creare problemi sotto il profilo funzionale, né determinare equivoci a livello interpretativo e, possibilmente, devono essere completamente eliminabili.

6.4.2 Accessibilità e trattamento delle superfici

L'accessibilità alla tubazione deve essere di estensione sufficiente per l'applicazione del sistema di generazione/ricezione delle OG in relazione allo scopo della ispezione, procedendo, ove necessario, alla rimozione di eventuali ostacoli o impedimenti ad una corretta installazione.

Generalmente la tubazione deve essere accessibile lungo l'intero sviluppo circonferenziale e per un tratto longitudinale di alcuni centimetri (questa estensione longitudinale deve essere chiaramente definita nella procedura di lavoro). Per altro, a causa degli ingombri propri del sistema ad OG, è indispensabile disporre di una adeguata zona di accessibilità intorno alla tubazione.

Per sistemi di generazione/ricezione a contatto ciò implica la rimozione di qualsiasi protezione o ricoprimento, anche quando questo sia intimamente connesso alla tubazione, mediante spatola, spazzola o altri mezzi abrasivi. Fa eccezione il rivestimento in vernice con strato regolare di spessore non maggiore di 1 mm e perfettamente aderente, la cui rimozione non sia possibile con un guanto e con pressione manuale.

Nella zona così liberata va eseguita una efficace pulizia della superficie.

L'esecuzione del controllo ad OG richiede sempre una verifica preliminare del corretto accoppiamento del dispositivo di generazione/ricezione con la tubazione; specifiche più dettagliate sotto il profilo operativo possono essere meglio definite nel manuale d'uso della strumentazione utilizzata.

6.4.3 Sicurezza nell'esecuzione del controllo

Nell'effettuare il controllo ad OG delle tubazioni, il personale è esposto a pericoli derivanti sia dall'attività specifica sia dal contesto.

Al fine di minimizzare i rischi occorre predisporre le opportune misure di prevenzione degli infortuni in conformità alle disposizioni di legge o prescrizioni normative in materia di sicurezza sul lavoro.

Le apparecchiature per il controllo ad OG potrebbero non essere idonee per utilizzo in atmosfera potenzialmente esplosiva secondo la direttiva 94/9/CE (ATEX). Per tale ragione, dovrà essere predisposta una sezione dedicata del Piano della Sicurezza che disciplini il corretto utilizzo della strumentazione dedicata riguardo l'utilizzo, il trasporto e la custodia.

6.4.4 Tecniche di esame

E' opportuno che l'esecuzione dell'esame sia preceduta da una verifica dell'adeguatezza del controllo ad OG in relazione alle specificità delle tubazioni di carattere operativo, tecnologico e geometrico. Nell'appendice B viene fornito un algoritmo empirico a questo scopo.

La scelta della tecnica del controllo ad OG da utilizzare va eseguita tenendo conto delle specifiche tipologie di fabbricazione di ogni singola parte strutturale, storia, condizioni d'uso, nonché al particolare contesto di installazione.

Tale scelta è rimessa alla competenza ed esperienza del personale, tenuto conto dei vincoli imposti da condizioni contestuali e dalla dotazione strumentale.

Si riportano, comunque, di seguito alcune indicazioni per una più mirata selezione dell'approccio diagnostico in relazione ad alcune considerazioni di massima:

- la tecnica *Pulse-Echo*, che prevede l'utilizzo di un solo sistema di generazioni/ricezione delle OG, viene raccomandata allorquando:
 - occorra determinare difetti localizzati, in tratti di tubazioni non troppo estese e per le quali l'attenuazione delle OG sia poco significativa;
 - si disponga di un sistema di condizionamento del segnale in grado di generare onde guidate e, contemporaneamente, rilevare l'eco di eventuali discontinuità presenti.
- la tecnica *Pitch-Catch*, che prevede la disposizione ravvicinata di un trasduttore per la generazione delle OG e di un diverso trasduttore per la ricezione delle stesse, viene raccomandata allorquando:

- non si disponga di un sistema di condizionamento del segnale che consenta di trasformare il generatore di OG in ricevitore;
 - si voglia eliminare la zona morta.
- c. la tecnica *Through-Transmission*, che prevede la disposizione di un trasduttore per la generazione delle OG a monte del tratto da ispezionare e di un secondo trasduttore per la ricezione a valle del tratto stesso, viene raccomandata allorquando:
- si abbia l'esigenza di stimare la presenza di una corrosione estesa mediante una misurazione media dell'attenuazione;
 - si abbia l'esigenza di effettuare una misurazione precisa dell'attenuazione delle OG.
- d. la tecnica *Pulse-Echo monitoring*, che prevede l'installazione permanente di un trasduttore per la generazione/ricezione delle OG, viene raccomandata allorquando:
- si abbia l'esigenza di stimare l'evoluzione nel tempo di un difetto o della progressione di uno stato corrosivo.

A puro titolo indicativo, la Tabella 1 indica la tecnica d'esame raccomandata in relazione ai diversi casi applicativi.

Casi applicativi	Tecniche d'esame		
	<i>Pulse-Echo</i>	<i>Pitch-Catch</i>	<i>Through-Transmission</i>
Screening a lungo raggio	Si	No	No
Lungo attraversamento	Si	Si (*)	Si
Penetrazioni di pareti	Si	Si	No
Tubazioni interrato	Si	Si	Si
Corrosione esterna	Si	Si	Si
Sovrappasso	Si	No	No
Corrosione sotto i supporti	Si	No	No

Tabella 1

(*) Se necessario, analizzare la zona morta.

Il controllo ad OG può richiedere un procedimento di qualificazione. Un approccio metodologico per la qualificazione delle tecniche basate sui metodi PND, e quindi anche di quelle relative al controllo ad OG, viene fornito nel documento CEN/TR 14748:2004 - "Non Destructive Testing - Methodology for qualification of non destructive tests".

Nell'Appendice D vengono sinteticamente riportate le risultanze di alcuni casi studio di esecuzione del controllo OG per tipiche installazioni.

6.4.5 Esecuzione del controllo

6.4.5.1 Generalità

Sotto il profilo operativo, l'esecuzione del controllo ad OG deve avvenire in conformità a quanto stabilito dalla specifica Procedura, o altra documentazione di riferimento, raccomandando necessariamente ulteriori controlli condotti con metodi e tecniche PND complementari, al fine di pervenire ad una caratterizzazione di dettaglio della eventuale discontinuità rilevata e della sua estensione. L'indicazione di altri metodi e tecniche PND di dettaglio deve essere discriminata sulla base delle tipologie di danno attese e delle condizioni di accessibilità.

6.4.5.2 Strategia operativa

E' raccomandato condurre il controllo della tubazione iniziando da un'estremità e proseguendo con ordine fino all'altra, controllando lo stato di conservazione delle strutture di supporto e di accesso ove presenti.

Il controllo ad OG deve essere svolto metodicamente in modo da garantire un'ispezione completa senza omissioni, né eccessiva sovrapposizione di aree ispezionate (indicativamente intorno al 5%). Inoltre, l'area della tubazione di applicazione del sistema di eccitazione delle OG deve essere scrupolosamente controllata con altri metodi PND per rilevarne lo stato di conservazione, costituendo, le sezioni di quest'area, il riferimento di sezione trasversale per la prova specifica.

6.4.5.3 Frequenza

Le frequenze utilizzate per il controllo ad OG devono essere nell'intervallo specificato dal fabbricante dell'apparecchiatura.

La frequenza non è un parametro di configurazione tale da produrre cambiamenti nella localizzazione della discontinuità rilevata, relativamente alla posizione sia assiale, sia angolare. E' tuttavia buona norma condurre alcune prove preliminari con almeno tre diverse frequenze per ogni scansione al fine di determinare quella migliore per la caratterizzazione delle indicazioni.

Al variare della frequenza, infatti, varia la lunghezza d'onda dell'onda guidata utilizzata per l'ispezione, ovvero la sua sensibilità nei riguardi delle dimensioni della discontinuità.

6.4.5.4 Taratura

Nel controllo ad OG la scansione vera e propria deve essere preceduta da una taratura, che risulta organizzata nelle tre fasi di seguito specificate:

Misura del rumore di fondo

Ad avvenuta installazione del sistema di generazione/ricezione sulla tubazione, occorre procedere alla misurazione del rumore di fondo secondo le modalità definite in Procedura, o altra documentazione di riferimento.

Verifica del funzionamento dei canali

Il corretto funzionamento dei singoli canali deve essere verificato, per esempio, misurando la capacità elettrica dei singoli canali.

Calcolo della curva DAC

La curva DAC, costruita dalle indicazioni generate da almeno due caratteristiche geometriche poste a diversa distanza dal sistema di generazione/ricezione, di fatto rappresenta l'attenuazione dell'onda al variare della distanza, e costituisce un efficace strumento per valutare la severità delle discontinuità rilevate nel tratto utile.

L'attenuazione dell'onda guidata è funzione di svariati fattori, quali, ad esempio il rivestimento della tubazione, il suo procedimento di fabbricazione e il contesto ambientale.

A seconda del *target* della ispezione si richiede che il sistema sia in grado di evidenziare la presenza di variazioni di sezione (PST) pari a un x% che rappresenta il difetto critico per la specifica applicazione (e generalmente è un valore compreso tra 1 e 10%) con un rapporto segnale/rumore S/N=2. Poiché S/N è una quantità decrescente con la distanza, tale condizione risulta facilmente verificata in prossimità del sistema di generazione, mentre risulta sempre più difficile da verificare all'aumentare della distanza. Dall'analisi della curva DAC è possibile individuare il punto nel quale una fissata variazione di sezione (espressa in %) determina un rapporto S/N=2.

Tale punto rappresenta il limite estremo del tratto utile del controllo ad OG.

6.4.5.5 Sensibilità del controllo

La sensibilità del controllo è la capacità della strumentazione OG di rilevare indicazioni. La sensibilità è implicitamente determinata dalla curva DAC ottenuta in fase di taratura dell'apparecchiatura OG in sede di prova.

6.4.5.6 Scansione

Una volta generate le onde guidate nella tubazione, la strumentazione OG acquisisce e registra il segnale relativo a riflessioni originate da caratteristiche geometriche e/o eventuali discontinuità. Il *software* rappresenta al visore la curva DAC ed il segnale registrato per consentire la discriminazione delle indicazioni.

6.4.5.7 Ispezione della zona morta

Nella tecnica *Pulse - Echo*, segnali riflessi da discontinuità molto prossime al sistema di generazione/ricezione raggiungono quest'ultimo mentre si trova ancora in modalità attiva (generazione) e, pertanto, non in grado di acquisire (ricezione). La regione del tratto di tubazione all'interno della quale questo fenomeno è circoscrivibile, viene indicata come "zona morta" in quanto al suo interno non è possibile discriminare la presenza di discontinuità.

Per tale ragione, è assolutamente necessario verificare che l'area obiettivo del controllo sia esterna alla zona morta.

Per ispezionare la zona morta è necessario traslare, per una distanza opportuna, il sistema di generazione/ricezione, ovvero ricorrere a tecniche di controllo integrative di dettaglio (tipicamente Ultrasuoni) da svolgere in conformità alle norme o alla regolamentazione tecnica di riferimento.

6.4.6 Accettabilità del segnale ai fini valutativi

E' buona norma, a meno di diversamente specificato in Procedura, assumere come significative le indicazioni caratterizzate da un rapporto segnale rumore maggiore di due.

La presenza, lungo la tubazione, di elementi annessi quali curve, raccordi a T, flange e quant'altro costituisca una variazione della geometria della linea, implica una riduzione del rapporto segnale/rumore che richiede l'esecuzione di un'ulteriore scansione a valle del componente stesso.

Qualora ciò non fosse possibile, è bene comunque assumere un atteggiamento estremamente cautelativo per evitare azzardate estrapolazioni.

6.4.7 Interpretazione, valutazione e classificazione delle indicazioni

Il segnale acquisito nel controllo ad OG deve essere opportunamente interpretato allo scopo di discriminare dal rumore (elettrico e/o di fondo), o da eventuali falsi positivi, le indicazioni effettivamente riconducibili a discontinuità.

Qualsiasi indicazione significativa rilevata nel controllo ad OG deve essere successivamente indagata con controllo di dettaglio che confermi la presenza di una discontinuità e consenta la caratterizzazione di quest'ultima in relazione alla tipologia, forma, dimensioni e orientamento.

Dal momento in cui il controllo ad OG consente esclusivamente una misura della variazione della sezione trasversale della tubazione, qualora si volesse pervenire ad una valutazione dello spessore minimo residuo per il tratto utile, è di norma raccomandato condurre uno o più rilievi spessimetrici (tipicamente UT) in posizioni note, comunque distanti da indicazioni significative localizzate, per un indispensabile riscontro.

Nell'Appendice E viene comunque proposto un possibile criterio di classificazione delle indicazioni rilevate nell'ambito di un controllo ad OG di tubazioni.

6.4.8 Rapporto di prova

A conclusione del controllo ad OG deve essere compilato un Rapporto di Prova che dovrebbe fornire almeno specifiche indicazioni circa:

- a) data e luogo di esecuzione della prova;
- b) nominativo del committente (Fabbrikante, Utilizzatore, Organizzazione, ecc.);
- c) nominativo dell'Organizzazione di appartenenza del personale che ha condotto il controllo ad OG;

- d) identificazione dell'attrezzatura, componente o elemento, esaminati in conformità a quanto raccomandato nella Sezione 6.4.1, con descrizione sintetica delle principali caratteristiche funzionali e dimensionali;
- e) estensione delle aree esaminate nel corso della prova e specificazione di eventuali marcature per evidenziare la presenza di discontinuità;
- f) procedimento adottato per rendere accessibile la superficie da esaminare (esterno o interno dell'attrezzatura, componente o elemento) e descrizione delle tecniche di trattamento delle superfici in accordo a quanto raccomandato nella Sezione 6.4.2;
- g) documentazione di riferimento (procedura, disegni, manuali, ecc.);
- h) apparecchiatura utilizzata;
- i) modi d'onda guidata utilizzati nella prova e frequenza di generazione utilizzata;
- j) misurazione della capacità del/i canale/i o alternativamente misurazione del campo acustico emesso;
- k) estensione della zona morta;
- l) quando è richiesta, misurazione relativa a sistema di calibrazione assoluta della apparecchiatura;
- m) lunghezza del tratto di prova;
- n) curva di correzione della ampiezza con la distanza (DAC) relativa alla caratteristica geometrica (saldatura, flangia, ecc.);
- o) curva di correzione della ampiezza con la distanza (DAC) relativa al livello di sensibilità indicato nel rapporto;
- p) sensibilità della prova in termini di Perdita della Sezione Trasversale (PST) (tutti gli echi al di sopra del livello di sensibilità dichiarato dovranno essere identificati ed interpretati);
- q) eventuali variazioni della sensibilità nel tratto di tubazione esaminato;
- r) indicazione schematica delle caratteristiche identificate (saldature, flange, supporti, etc.);
- s) indicazione della PST e, quando possibile, della posizione longitudinale, angolare e della estensione circonferenziale di ciascuna indicazione che superi la soglia definita dalla sensibilità;
- t) classificazione delle indicazioni rilevate e notazione del controllo di dettaglio previsto o raccomandato per la caratterizzazione delle eventuali discontinuità. A corredo, è fortemente raccomandata la registrazione di documentazione grafica (disegni, schizzi o schemi), o di immagini fotografiche o video, o di altro tipo per garantire l'archiviazione dei risultati o dei dati anche per una successiva consultazione in fase di analisi comparativa (evoluzione della discontinuità);
- u) in caso di monitoraggio con tecnica OG permanente, la prova iniziale (impronta) deve essere effettuata come una prova di *screening* iniziale e registrata. Ulteriori prove devono identificare differenze significative rispetto all'impronta iniziale;
- v) data, nome e firma e qualifica del personale che ha supervisionato il controllo OG, se richiesto o necessario;

Se necessario, i punti d) - v) dell'elenco dovrebbero essere replicati per la caratterizzazione di tutti i tratti di tubazione riferibili ad una stessa sessione di controllo.

L'Appendice F fornisce un modello del Rapporto di Prova che può essere adattato alle specifiche esigenze.

6.4.9 Archiviazione della documentazione

Tutta la documentazione acquisita, sia precedentemente sia successivamente, al controllo deve essere mantenuta secondo modalità di conservazione ed archiviazione definite dalla legislazione e/o normativa applicabile, ovvero dalla eventuale procedura adottata.

Appendice A FISICA DI BASE E PRINCIPI GENERALI DEL METODO

A.1 CENNI SULLA FISICA DI BASE

Con il termine *onde guidate* si intende il fenomeno di propagazione di onde meccaniche in elementi strutturali di dimensione finita o semi infinita che, proprio in relazione alle loro caratteristiche geometriche, svolgono una funzione di "supporto-guida", ovvero di "guide d'onda". Molti componenti strutturali, quali piastre, aste e tubi, sono di fatto guide d'onda naturali che ben si prestano alla propagazione di particolari tipi di onde guidate.

Diversamente dalle onde elastiche di volume, note come Longitudinali e Trasversali, per le quali la velocità di propagazione è funzione delle sole proprietà meccaniche del mezzo, il comportamento delle onde guidate risulta essere significativamente dipendente tanto dalle caratteristiche geometriche della guida d'onda, quanto dalla frequenza di propagazione. In particolare, definita una guida d'onda, per una assegnata frequenza di propagazione esiste un numero finito di onde guidate che si propagano lungo l'elemento strutturale, ciascuna con diversa velocità, attenuazione e forma d'onda. Tali caratteristiche delle onde guidate, mutando al variare della frequenza di propagazione, vengono definite dispersive. Per questo motivo, *l'equazione d'onda*, la cui soluzione determina il comportamento delle onde guidate, assume anche il nome di *relazione di dispersione*.

Per guide d'onda a geometria assialsimmetrica, come le tubazioni, esistono al più tre distinte famiglie di onde o modi guidati: modi *Longitudinali* (fig. A1), modi *Torsionali* (fig. A2), e modi *Flessurali* (fig. A3). La principale caratteristica che contraddistingue le tre famiglie è la tipologia di spostamento indotta sulla tubazione. In particolare, i modi *Longitudinali*, si propagano principalmente per spostamenti in direzione assiale della tubazione; per contro, i modi *Torsionali* si propagano lungo la tubazione inducendo nella generica particella del materiale uno spostamento prevalente nella direzione circonferenziale del tubo. Entrambi i modi presentano un campo di spostamenti assialsimmetrico sulla sezione del tubo. Infine, i modi *Flessurali*, non godono di simmetria assiale rispetto all'asse della tubazione.

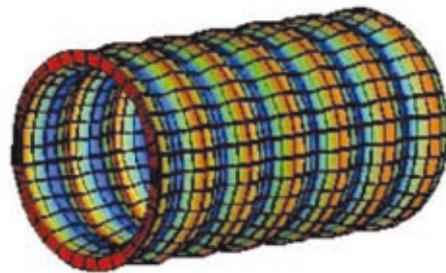


Fig. A1 - Esempio di onda guidata longitudinale: $L(0,1)$

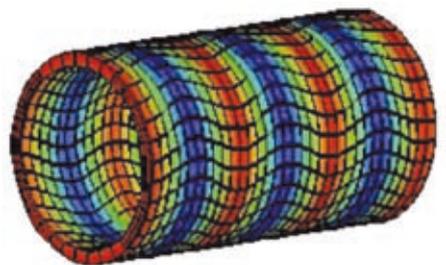


Fig. A2 - Esempio di onda guidata torsionale: $T(0,1)$

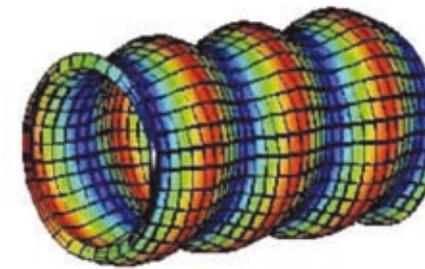


Fig. A3 - Esempio di onda guidata flessurale: $F(1,1)$

Solitamente, i modi sono indicati con un doppio indice (n,i) . L'indice n descrive il numero di lunghezze d'onda, attorno alla circonferenza della tubazione, con cui lo spostamento associato al modo si ripete (vedi fig. A4). Ad esempio, per $n = 0$, lo spostamento possiede simmetria assiale, ovvero la forma d'onda è assialsimmetrica, ed i corrispondenti modi Torsionali e Longitudinali sono identificati come $T(n = 0,i)$ e $L(n = 0,i)$.

I modi Flessurali $F(n,i)$ non presentano mai simmetria assiale dello spostamento in direzione circonferenziale ed esistono solo per $n \geq 1$.

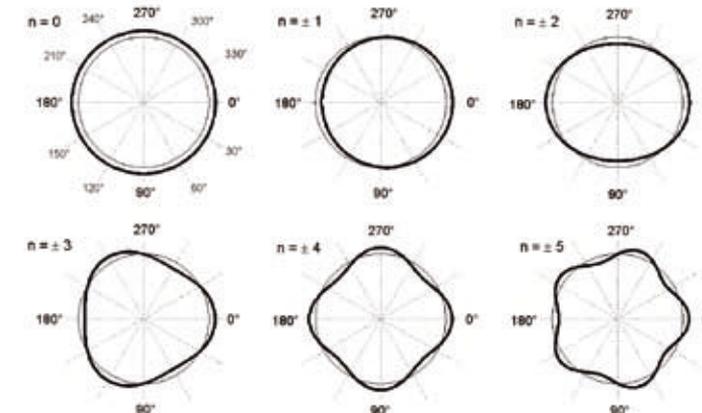


Fig. A4 - Rappresentazione del numero di lunghezze d'onda attorno alla circonferenza n

L'indice i è utilizzato come variabile contatore per ordinare i modi di una determinata famiglia. I modi fondamentali, cioè quei modi che sono in grado di propagarsi per valori della frequenza prossimi a zero, hanno indice $i = 1$, mentre i modi successivi sono numerati di conseguenza.

A.1.1 Esempio: 40 ANSI Schedule tubo in acciaio

A titolo di esempio in fig. A5 sono rappresentate le curve di dispersione relative alla velocità di gruppo di un tubo in acciaio nel range di frequenze 0-50 kHz. Le proprietà geometrico-meccaniche della guida d'onda sono descritte in Tabella A1.

In particolare sono riportati in colore rosso i modi Torsionali, in blu i modi Longitudinali ed in colore verde i modi Flessurali. Risulta evidente che nel range di frequenza rappresentato esistono al più un modo Torsionale, $T(0,1)$, il quale risulta essere non dispersivo, due modi Longitudinali, $L(0,1)$ e $L(0,2)$, e tre modi Flessurali, $F(1,1)$, $F(1,2)$ e $F(1,3)$. Risulta inoltre possibile osservare che mentre i modi fondamentali ($i=1$) possono propagarsi a frequenza prossima a zero, i modi di indice superiore $L(0,2)$, $F(1,2)$ e $F(1,3)$ presentano una frequenza detta di "cut-off" al di sotto della quale non possono propagarsi. Ad esempio, il modo $L(0,2)$ non può esistere per frequenze inferiori a circa 16 kHz.

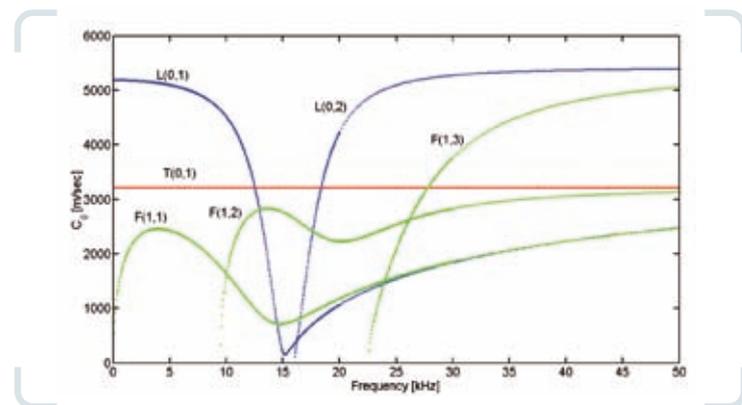


Fig. A5 - Curve di dispersione in termini di velocità di gruppo per un 4-in ANSI 40 tubo in acciaio (proprietà meccaniche e geometriche fornite in Tabella A1)

guida d'onda	raggio interno	raggio esterno	densità	modulo elastico	coefficiente di Poisson
4-in 40 ANSI	51.1810 mm	57.1500 mm	7800 kg/m ³	210×10 ⁹ N/mm ²	0.3

Tabella A1

A.2 PRINCIPI GENERALI DEL METODO

A.2.1 Modi guidati

Il controllo ad OG si basa sulla generazione di onda/e ultrasonore di bassa frequenza a partire da una posizione della struttura cilindrica da ispezionare.

In generale, i modi Longitudinali, Torsionali e Flessurali esistenti nel *range* di frequenza dell'eccitazione (un numero comunemente definito) sono tutti in grado di propagarsi contemporaneamente lungo la tubazione. La generazione di un singolo modo invece semplifica l'applicazione pratica del controllo ad OG.

Tra tutti i modi che possono propagarsi lungo la guida d'onda, i più utilizzati per lo *screening* sono quelli con forma d'onda assialsimmetrica, ed in particolare i modi L(0,2) e T(0,1). Il modo L(0,2), infatti, presenta un ampio *range* di frequenza entro il quale risulta scarsamente dispersivo, mentre il modo T(0,1) è per sua natura non dispersivo, come si evince anche dalla fig. A5. Il vantaggio nell'utilizzo di onde o modi guidati poco o per nulla dispersivi, consiste nella possibilità di generare, e quindi ricevere, eventuali echi che presentano un contenuto in frequenza che viaggia a velocità simile. Questo fatto si traduce in indicazioni contenute nel tempo e quindi molto più facilmente evidenziabili nella fase di analisi del segnale ultrasonico registrato.

A.2.2 Sensibilità alle discontinuità

Il controllo ad OG sfrutta le onde guidate di tipo Longitudinale, Torsionale e Flessurale, che si propagano lungo la "guida d'onda" metallica, barra o tubo che sia, interessandone l'intero spessore (fig. A6).

Analogamente a quanto accade applicando il metodo ad Ultrasuoni, ogni discontinuità che le onde guidate incontrano nel loro procedere costituisce di fatto una variazione di impedenza acustica della guida d'onda la quale genera delle onde riflesse (echi).

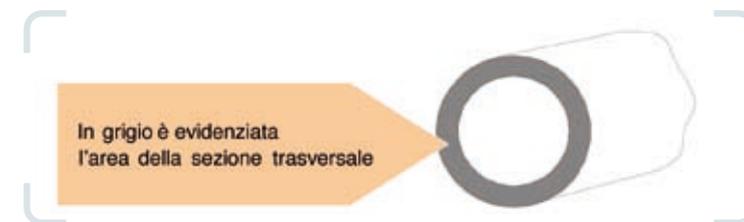


Fig. A6 - Indicazione della sezione trasversale di una tubazione soggetta a controllo OG.

Il monitoraggio di tali echi consente quindi di rilevare la presenza di una possibile discontinuità. Nel caso di un sistema attivo con eco-impulso, una volta conosciute le velocità delle onde riflesse e se discriminati uno o più modi di onda guidata, è possibile anche determinare la distanza della discontinuità dal punto di generazione/ricezione. In questo senso, le riflessioni dovute alla presenza delle caratteristiche geometriche costituiscono degli utili riferimenti.

Il controllo ad OG risulta pertanto sensibile a variazioni di sezione trasversale sia interne che esterne alla tubazione, ma non fornisce, al momento, alcuna informazione diretta sullo spessore rimanente ed è quindi da considerare un metodo di *screening*.

Inoltre le OG sono particolarmente efficaci quando sono utilizzate per il monitoraggio delle tubazioni (con sistemi di trasduzione collegati in maniera permanente). Infatti, capita che discontinuità non evidenziate da segnali derivanti nel controllo *Pulse-Echo*, *Pitch-Catch* o *Through-Transmission*, siano rilevabili attraverso l'analisi di tali segnali acquisiti in differenti controlli effettuati a distanza nel tempo (*Pulse-Echo monitoring*). Così facendo, risulta infatti possibile valutare le differenze di tali segnali e rivelare eventuali discontinuità, come anche il loro stadio evolutivo nel tempo.

In corrispondenza di ogni variazione dell'area della sezione trasversale, e per qualsiasi posizione sulla parete della tubazione, si genera una riflessione delle onde guidate con un'ampiezza dipendente dall'entità della variazione stessa (fig. A7a, dove viene ipotizzata una variazione di sezione del 20%), ma indipendente dal segno della variazione (aumento, ovvero diminuzione, di sezione trasversale).

Naturalmente, l'ampiezza del segnale riflesso è fortemente condizionata dalla posizione della discontinuità che lo genera, a causa dell'attenuazione che cresce al crescere della distanza percorsa sia dall'onda incidente che dall'onda riflessa.

L'ampiezza del segnale è poi anche funzione del numero di riflettori presenti lungo il percorso dell'onda come ben evidenziato in fig. A7.

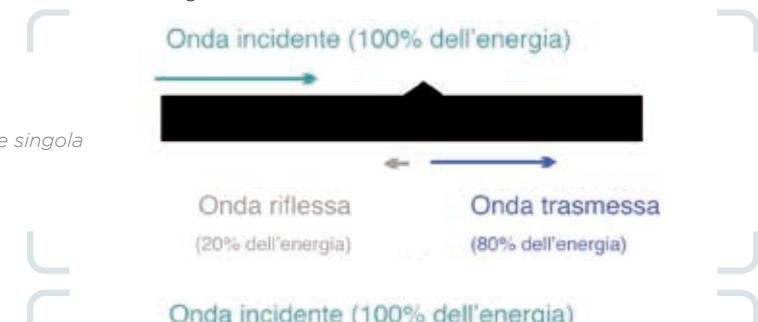


Fig. A7a - Riflessione singola

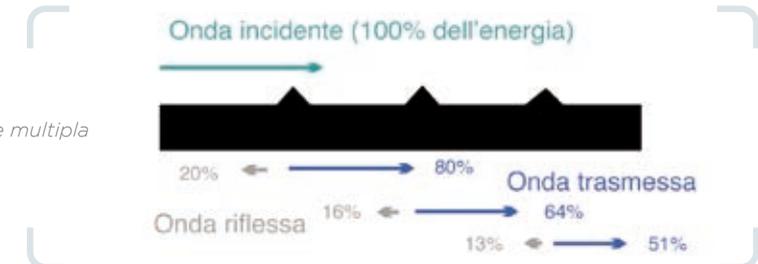


Fig. A7b - Riflessione multipla

In fig. A8, ad esempio, è rappresentata la registrazione relativa ad una ispezione su una tubazione lunga più di venti metri che ben evidenzia la presenza di quattro riflettori associati a quattro saldature (indicate nello schema con -F1, -F3, -F4, -F5). Tali riflettori sono anche indicati nello schema di tubazione riportato in testa al grafico. Con una linea nera continua è rappresentata l'ampiezza del segnale acquisito in mV, mentre le curve di Correzione dell'Amplitude con la Distanza (DAC) con linee tratteggiate. Indicazioni relativamente alla linea rossa del grafico sono fornite al successivo punto A.2.3.

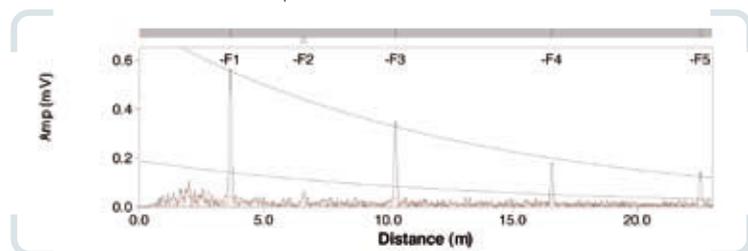


Fig. A8 - Rilevazione degli effetti di attenuazione del segnale dell'onda riflessa lungo un tratto di tubazione caratterizzato dalla presenza di 4 saldature ben distinguibili. E' immediatamente rilevabile la riduzione dell'ampiezza di picco del segnale dell'onda riflessa determinato dalla presenza delle saldature all'aumentare della loro distanza rispetto alla sorgente eccitante collocata nell'origine del sistema riferimento.

Le curve DAC (Correzione dell'Amplitude con la Distanza, fig. A8 e A9) costituiscono un utile riferimento per rivelare e quantificare, sia pure approssimativamente, eventuali variazioni della sezione trasversale. In tal senso, note le posizioni di alcune caratteristiche geometriche (tipicamente saldature), è possibile predire la curva di attenuazione per i segnali correlati ad onde riflesse assialsimmetriche.

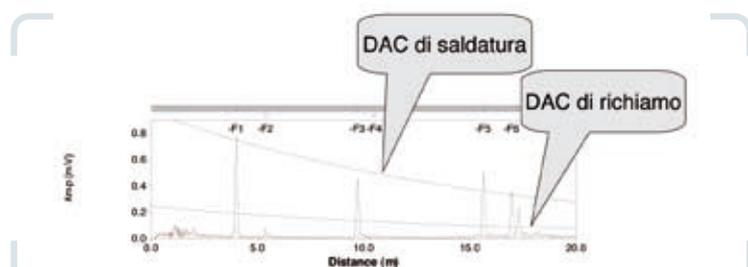


Fig. A9 - Esempio di curva DAC di saldatura e di richiamo.

A.2.3 Estensione angolare delle discontinuità

In generale, in una tubazione possono essere presenti differenti componenti che interrompono la continuità del tubo stesso come ad esempio saldature, flange, supporti laterali e curve (caratteristiche geometriche). Inoltre i tubi possono essere caratterizzati da discontinuità con differente distribuzione (generalizzata o localizzata) ed orientamento (circonferenziale, assiale, attraverso lo spessore).

In particolare, la stessa perdita di sezione trasversale potrebbe essere associata ad una discontinuità relativamente superficiale egualmente distribuita lungo tutta la circonferenza (con simmetria assiale, vedi fig. A10-a), oppure associata ad una discontinuità profonda e concentrata in un'area molto limitata della tubazione (fig. A10-b):

a) una variazione di sezione con simmetria assiale (es. un giunto saldato circonferenziale o una flangia, come anche la discontinuità rappresentata in fig. A11), se investita da un'onda guidata a simmetria assiale, genera sia un'onda trasmessa, sia un'onda riflessa con simmetria assiale;

b) una variazione di sezione non-assialsimmetrica (es. una discontinuità profonda e concentrata, vedi fig. A10-b) genera anche alcune onde non-simmetriche, evidenziate nella fig. A12 con frecce di colore rosso; in particolare essa produce non solo una riflessione, ma anche una conversione di parte dell'energia del modo simmetrico incidente in tutti quei modi guidati possibili alla frequenza di eccitazione. Tale fenomeno viene definito in letteratura come "conversione di modo". In pratica, solo pochi dei modi presenti alla frequenza in esame vengono realmente eccitati dalla conversione di modo. Ad esempio, il modo torsionale $T(0,1)$ tende a convertirsi nel modo flessionale $F(1,2)$ a causa della similarità nella distribuzione dello spostamento e della velocità di gruppo. La presenza di un eco a carattere non simmetrico è pertanto sintomo della esistenza di un riflettore non simmetrico.

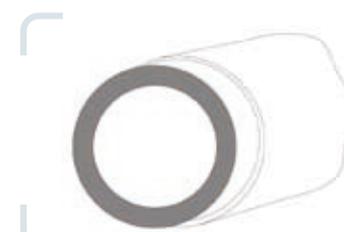


Fig. A10-a - Esempio di una riduzione distribuita di spessore.

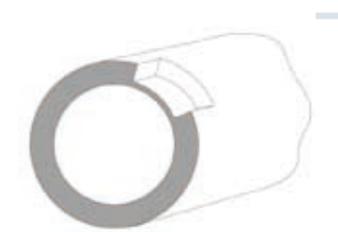


Fig. A10-b - Esempio di discontinuità profonda e concentrata.

Sfruttando questo fenomeno, alcuni ricercatori hanno messo a punto un metodo per l'identificazione di discontinuità il quale, mediante un opportuno sistema di rilevazione in grado discriminare echi di tipo simmetrico da echi di tipo non simmetrico, consente di evidenziare la presenza delle due diverse tipologie di riflettori. In fig. A13 viene rappresentata una possibile modalità di caratterizzazione della simmetria dei riflettori: in particolare, in linea continua nera è riportato il segnale associato a riflessioni simmetriche e in linea continua rossa quello derivante da riflessioni non simmetriche.

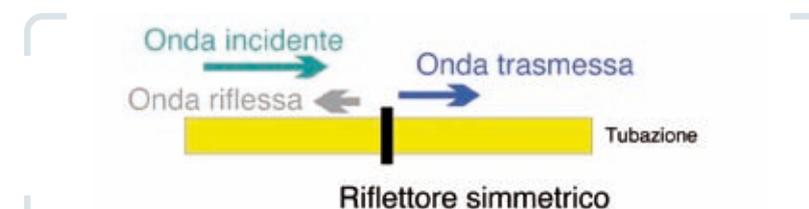


Fig. A11 - Schematizzazione del fenomeno di trasmissione e riflessione in presenza di un riflettore simmetrico.

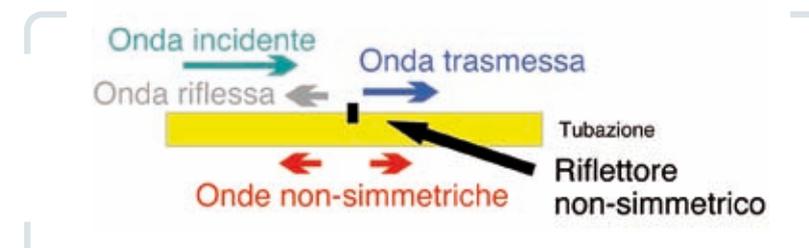


Fig. A12 - Schematizzazione del fenomeno di trasmissione e riflessione in presenza di un riflettore non-simmetrico.

A.2.4 Effetti dell'installazione

Effetto dei rivestimenti bituminosi

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. Tuttavia, esistono alcuni modi guidati che presentano, a determinate frequenze, un minimo di attenuazione risultando così ottimali ai fini del controllo.

Effetto del contatto con il terreno

Il contatto con il terreno provoca, come nel caso dei rivestimenti bituminosi, un effetto di attenuazione del segnale. Inoltre le onde guidate in tubazioni a contatto con il terreno si comportano in maniera differente rispetto a quanto avviene per tubazioni a contatto, ad esempio, con aria o acqua a causa della pressione esercitata sul tubo stesso.

Effetto della geometria della struttura

La presenza di qualsiasi caratteristica geometrica posta lungo la tubazione altera la propagazione delle onde guidate. Pertanto, la presenza di curve, derivazioni, flange, innesti a T, supporti saldati e serraggi, deve essere attentamente valutata in quanto può generare echi, come anche indurre distorsioni delle onde guidate che si propagano.

Una stima dell'impatto sulla adeguatezza del controllo OG, dovuto al rivestimento, al terreno e alla presenza di supporti, è presentata nell'appendice B.

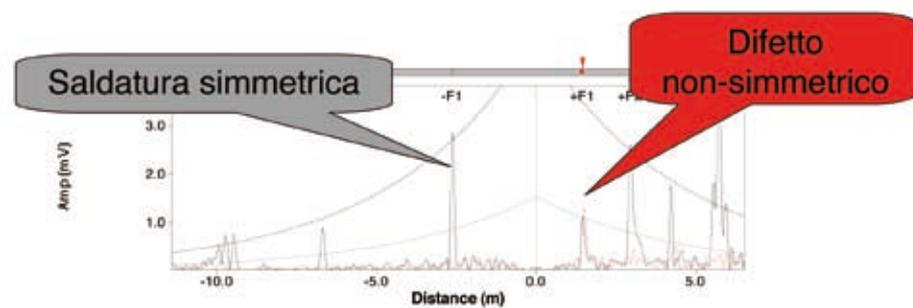
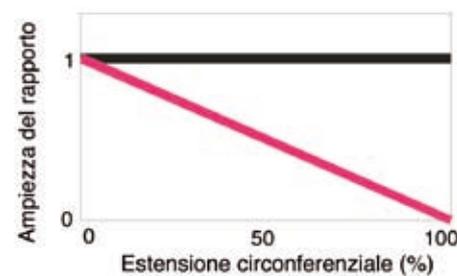


Fig. A13 - Evidenziazione del rilevamento strumentale di un riflettore simmetrico (linea continua nera), e di un riflettore non-simmetrico (linea continua rossa).

Inoltre, la fig. A14 fornisce un criterio per stimare la geometria della indicazione rilevata strumentalmente attraverso il rapporto tra i segnali associati alle onde simmetriche (curva a tratto nero) e non-simmetriche (curva a tratto rosso).

Quando la variazione di sezione trasversale si estende su un arco molto più piccolo della circonferenza si ha:

Curva Rossa = Curva Nera



Quando la variazione di sezione trasversale si estende su tutta la circonferenza si ha:

Curva Rossa << Curva Nera

E' evidente comunque che l'analisi interpretativa così condotta assume una pura valenza qualitativa, tipica di un approccio di screening del controllo ad OG e che, pertanto, una verifica dimensionale dell'indicazione strumentale necessita di un ulteriore accertamento di dettaglio con altri metodi PND (Ultrasuoni, Controllo spessimetrico, Esame Visivo, Magnetoscopia, Liquidi Penetranti).

E' stato dimostrato che le OG consentono di rivelare discontinuità di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda del modo utilizzato per l'ispezione. In tal senso, alcune pubblicazioni illustrano i risultati di ricerche finalizzate alla caratterizzazione della sensibilità delle strumentazioni OG alla rivelazione di discontinuità.

Appendice B ADEGUATEZZA ALL'USO DELLE OG

La adeguatezza del controllo OG come strumento diagnostico è estremamente variabile in funzione di alcune specificità delle tubazioni di carattere operativo, tecnologico e geometrico.

Fermo restando che l'approccio di seguito riportato ha una valenza esclusivamente indicativa, seppur frutto di una vasta esperienza in campo, la stima della adeguatezza R all'uso del controllo ad OG su tubazioni riconducibili a diverse tipologie d'installazione può essere ottenuta a partire dall'esame della tabella B1.

Fattore R	Adeguatezza
$R > 0.7$	Eccellente
$0.5 < R \leq 0.7$	Alta
$0.35 < R \leq 0.5$	Media
$0.15 < R \leq 0.35$	Bassa
$R \leq 0.15$	Sconsigliata

Tabella B1

L'indicatore sintetico di adeguatezza R è calcolato con l'algoritmo empirico:

$$R = F_o \times F_A$$

essendo:

- F_o un indicatore della opportunità al controllo ad OG, quantificabile come segue:

Caratteristiche della tubazione	F_o
Interrata Piggable (quando pig utilizzato)	0.70
Aerea	0.75
Aerea e sopraelevata	0.80
Coibentata	0.90
Attraversamenti (fiumi, strade ecc.)	1.00
Interrata non-Piggable	1.00

Tabella B2

- F_A un indicatore della applicabilità del controllo ad OG per il caso specifico, ricavabile utilizzando una serie di dati tecnici relativi alla applicazione specifica:

$$F_A = (F_{tr} - F_d - F_r - F_{mi} - F_{sp})$$

F_A	Note
$F_A > 0.85$	Situazione a criticità ordinaria sotto il profilo operativo.
$0.5 < F_A \leq 0.85$	Situazione a criticità media sotto il profilo operativo. Si richiede personale con esperienza nella applicazione specifica.
$0.25 < F_A \leq 0.5$	Situazione a criticità alta sotto il profilo operativo. Si richiede personale con esperienza nella specifica applicazione e procedure di lavoro comprovate.
$F_A \leq 0.25$	Situazione a criticità tale da sconsigliare il controllo.

Tabella B3

I vari fattori che determinano F_A sono definiti di seguito:

- F_{tr} un indicatore legato alla lunghezza media dei tratti rettilinei della tubazione:

$$F_{tr} = 0.1 \cdot L_{tr} \quad \text{se } L_{tr} \leq 10 \text{ metri}$$

$$F_{tr} = 1 \quad \text{se } L_{tr} > 10 \text{ metri}$$

dove

$$L_{tr} = (\text{Lunghezza linea da ispezionare a partire dai punti di accesso}) / (N_{curve} + N_{flange})$$

La lunghezza della linea da controllare può eventualmente essere divisa in sezioni longitudinali (tratti). Questo approccio è da preferirsi per la definizione di L_{tr} . Alcuni tratti potrebbero essere esclusi dalla lunghezza della linea qualora altri metodi PND siano ritenuti maggiormente adeguati nell'area specifica (ad esempio tratti tortuosi della linea stessa).

Nel caso in cui il *target* del controllo sia un'area limitata (es. penetrazione di muro) e l'area di accesso sia almeno ad 1 m. di distanza dall'accesso del tubo nel muro, il fattore F_{tr} è considerato uguale a 0.7.

- F_d un indicatore legato al diametro D della tubazione:

Diametro	F_d
$D < 24''$	0
$24'' < D < 36''$	0.05
$D > 36''$	0.10

Tabella B4

- F_r un indicatore legato al tipo di rivestimento della tubazione:

Rivestimento	F_r
Vernice (< 1 mm)	0
FBE	0.05
Polietilene (*)	0.15
Polietilene - Altene (*)	0.20
Bitume (*)	0.25
Sabbia	0.30
Cemento	0.35
Terra	0.35

Tabella B5

(*) - Qualora i rivestimenti fossero applicati in modo eterogeneo e il loro strato più esterno fosse visibilmente deteriorato, oppure applicati con uno spessore superiore allo spessore della tubazione, l'indicatore F_r va incrementato cautelativamente di 0.1. Stesso approccio deve essere tenuto anche quando il rivestimento del tipo cemento o asfalto fosse direttamente a contatto con la tubazione di lunghezza superiore a 1.5 m.

Qualora il rivestimento (del tipo altene, bitume o simile) fosse di lunghezza superiore a 3 m., l'indicatore F_r va incrementato di 0.1. Qualora il rivestimento fosse composto da più strati, l'indicatore F_r può essere determinato come segue procedendo radialmente dall'interno (F_{r1}) verso l'esterno (F_{rn}):

$$F_r = F_{r1} + 0.5F_{r2} + 0.25F_{r3} + \dots + \frac{1}{2^{n-1}}F_{rn}$$

- F_{mi} un indicatore legato al fluido circolante all'interno della tubazione:

Materiale interno	F_{mi}
Gas	0
Acqua con inibitori e/o bassa salinità	0
Crudo leggero	0.05
Crudo pesante	0.10
Acqua marina	0.25
Bitume o altro materiale asfaltico o plastico	0.25

Tabella B6

Per acqua marina è stato indicato un fattore di difficoltà elevato dovuto al fatto che questa causa forte corrosione interna che generalmente riduce notevolmente il *range* del controllo ad OG.

- F_{sp} un indicatore legato al supporto generico

$$F_{sp} = F_{ss} + F_{sc}$$

essendo

F_{ss} per supporti saldati tipo sella o saldati longitudinalmente

$$F_{ss} = 0.04 \times (15 - L_{um}) \quad \text{se } L_{um} < 15 \text{ metri}$$

$$F_{ss} = 0 \quad \text{se } L_{um} > 15 \text{ metri}$$

F_{sc} per supporti clamp o punto saldatura

$$F_{sc} = 0.04 \times (10 - L_{um}) \quad \text{se } L_{um} < 15 \text{ metri}$$

$$F_{sc} = 0 \quad \text{se } L_{um} > 15 \text{ metri}$$

dove L_{um} è la lunghezza media utile

$$L_{um} = (\text{Lunghezza linea da ispezionare a partire dai punti di accesso}) / (N_{\text{supporti}})$$

Nota:

Nel caso in cui si rilevi che la tubazione sia in stato avanzato di corrosione generalizzata, in relazione al grado di corrosione, la raccomandabilità del controllo ad OG è bassa (nel caso di corrosione estesa a tutta la tubazione e per spessori maggiori al 20% dello spessore massimo), o media nel caso in cui la corrosione generalizzata sia limitata a tratti specifici o con spessori rimanenti superiori all' 80% dello spessore massimo.

Appendice C APPARECCHIATURA OG E VERIFICA PERIODICA

C.1 APPARECCHIATURA OG

Le apparecchiature OG si compongono, come minimo, di un sistema di trasduzione per la generazione dei modi di onda guidata con propagazione assiale su tubi cilindrici come descritto in C.1.1. Lo stesso sistema di trasduzione utilizzato per la generazione delle onde guidate, o un sistema aggiuntivo, viene utilizzato per la ricezione. La apparecchiatura include un sistema per il trattamento dei dati di modo che per il sistema di rilevazione specifico sia possibile la discriminazione di almeno un modo di onda guidata.

C.1.1 Sistema di trasduzione

Il sistema di trasduzione è in grado di generare onde guidate di tipo cilindrico con propagazione assiale.

Sistema di trasduzione piezoelettrico

Una serie di trasduttori piezoelettrici sono posti a contatto con la superficie esterna della tubazione. In alcune strumentazioni, il numero e la distribuzione dei trasduttori lungo la direzione assiale del tubo e lungo la direzione circonferenziale assicura la separazione dei singoli modi di onda guidata di interesse per la analisi a la cancellazione dei modi di onda guidata non desiderati.

Sistema di trasduzione elettromagnetico

Una serie di trasduttori che sfruttano i principi elettromagnetici (magnetostrizione o EMAT) sono posti a contatto o a distanza ravvicinata rispetto alla superficie esterna della tubazione. La strumentazione assicura la separazione dei singoli modi di onda guidata di interesse per la analisi a la cancellazione dei modi di onda guidata non desiderati.

C.1.2 Sensore di rilevazione

Il sensore di rilevazione può essere o lo stesso sensore di generazione del segnale o un sistema di ricezione del segnale separato dal sensore di generazione.

C.1.3 Sistema di trattamento del segnale

Il sistema di trattamento del segnale è tale da generare un segnale registrabile.

C.1.4 Sistema di registrazione

Il sistema di registrazione permette di correlare il segnale registrato con il tratto di prodotto in esame.

C.2 VERIFICA DELL'APPARECCHIATURA

Le apparecchiature vengono verificate, con periodicità definita dalle specifiche norme di applicazione, effettuando controlli di prodotti campione muniti di discontinuità artificiali note.

C.2.1 Verifica dell'apparecchiatura

La verifica viene eseguita per valutare la sensibilità dell'apparecchiatura (vedere punto seguente: Sensibilità dell'apparecchiatura) nel discriminare discontinuità concentrate da discontinuità distribuite (vedere punto seguente: Determinazione della estensione angolare delle caratteristiche rilevate) e individuare la posizione angolare delle discontinuità rilevate (vedere punto seguente: Determinazione della posizione angolare della discontinuità).

Sensibilità dell'apparecchiatura

La sensibilità della apparecchiatura è legata alla *performance* del rapporto segnale/rumore. Per questo possono essere utilizzati due tubi campione:

- 1) tubo campione 1 descritto in fig. C1 per la definizione del rapporto segnale/rumore;
- 2) tubo campione 2 descritto in fig. C2 per la verifica della sensibilità.

con le caratteristiche costruttive di seguito specificate:

- diametro compreso tra DN100 (4") e DN300 (12") e lunghezza 6 m,
- realizzati in acciaio al carbonio riconducibile all'applicazione industriale cui si riferisce il controllo ad OG,
- eventuale finitura superficiale (es. verniciatura, sabbiatura) dettagliatamente documentata,
- estremità finite (cianfrino) con angolo non superiore a 3° rispetto all'asse di simmetria del tubo.

Il sistema di eccitazione/ricezione viene collocato ad una distanza pari ad 1/4 della lunghezza del tubo (1,5 m) misurata a partire da una delle sue estremità.

Per poter determinare il rapporto segnale/rumore occorre utilizzare il tubo campione 1 (illustrato in fig. C1).

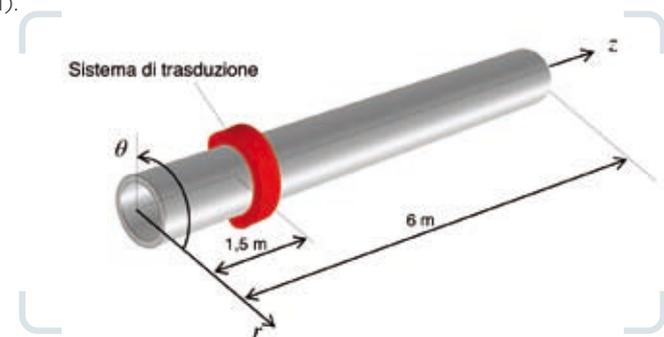


Fig. C1. Tubazione utilizzata per analizzare il rapporto segnale/rumore

L'apparecchiatura viene configurata per ottenere almeno una riflessione da entrambe le estremità del tubo. La prova di sensibilità viene effettuata di modo da potere selezionare i risultati a 4 differenti frequenze (le 4 frequenze prescelte dovranno coprire un intervallo di frequenze di almeno 10 kHz). La curva di DAC viene definita in modo da toccare i picchi d'eco di una estremità del tubo e quello della sua prima riflessione. Questa rappresenta il 100% della ampiezza di segnale in trasmissione.

Il valore del rumore di fondo è dato dal picco (PST percentuale) più elevato riscontrato, con esclusione della zona morta, alle frequenze considerate. I primi 250 mm dalle estremità del tubo campione vengono considerati zona morta.

La sensibilità viene espressa in termini di percentuale minima di variazione della sezione trasversale rilevabile. Il valore della sensibilità non può, ovviamente, essere inferiore al valore massimo del rapporto segnale/rumore dell'apparecchiatura espresso in termini di PST (Perdita della Sezione Trasversale) percentuale.

Per poter determinare la sensibilità dell'apparecchiatura, una volta stabilito il valore massimo del rumore (in percentuale PST), occorre utilizzare il tubo campione 2 (illustrato in fig. C2). Su tale tubo campione devono praticarsi due fori:

1. il primo un foro (foro 1) passante delle stesse dimensioni volumetriche della voluta discontinuità teorica minima rilevabile (valore massimo del rumore). Questo è posto ad una distanza pari a 1/4 dall'estremità del tubo (direzione opposta rispetto alla posizione del sistema di trasduzione). La rilevabilità di una discontinuità risulta tale allorché, per il

foro 1, sia associabile un segnale acquisito dalla apparecchiatura discriminabile con oltre 3dB oltre la soglia del rumore di fondo per almeno 2 frequenze differenziate al minimo di 3 kHz. Questa prova di sensibilità viene effettuata tre volte. Dopo ogni prova, il sistema di trasduzione viene rimosso e riposizionato. Nel caso di esito positivo in 3 prove consecutive, la sensibilità dell'apparecchiatura viene determinata e assunta pari al valore di PST della discontinuità foro 1.

2. il secondo foro (foro 2) passante di dimensioni volumetriche doppie rispetto al precedente. Questo è posto al centro del tubo di prova e ad una posizione angolare ruotata di 90° rispetto al foro 1. La rilevabilità di una discontinuità risulta tale allorché sia, per il foro 2, associabile un segnale acquisito dalla apparecchiatura discriminabile con oltre 3dB oltre la soglia del rumore di fondo per almeno 2 frequenze differenziate al minimo di 3 kHz. Questa prova di sensibilità viene effettuata tre volte. Dopo ogni prova, il sistema di trasduzione viene rimosso e riposizionato. Nel caso di esito positivo in 3 prove consecutive, la sensibilità dell'apparecchiatura viene determinata e assunta pari al valore di PST della discontinuità foro 2.

Nel caso in cui le prove diano entrambe esito negativo, la prova di sensibilità deve essere ripetuta su una ulteriore tubazione di prova dove occorre praticare due ulteriori fori di dimensioni volumetriche superiori a quelli precedentemente assunti ed utilizzando lo stesso approccio metodologico.

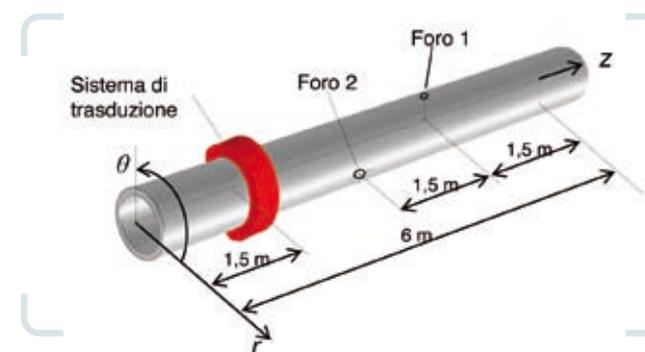


Fig. C2 - Tubazione utilizzata per verificare la sensibilità.

Determinazione della estensione angolare delle caratteristiche rilevate

Per accertare la capacità dell'apparecchiatura di determinare l'estensione angolare delle caratteristiche (utile per definire la severità delle indicazioni rilevate), è necessario che l'ampiezza del segnale non-simmetrico del tipo $F(1,1)$ prodotto da una discontinuità con estensione angolare limitata a meno di 90° sia superiore al 75% dell'ampiezza del corrispondente segnale simmetrico per almeno una delle frequenze del campo utilizzato.

Determinazione della posizione angolare della discontinuità

Per verificare la capacità della strumentazione di localizzare la posizione angolare di discontinuità è necessario effettuare una ulteriore verifica sui fori descritti in Sensibilità dell'apparecchiatura.

Si ritiene accettabile la localizzazione angolare della discontinuità entro un margine di errore di $\pm 25^\circ$.

C.3 DATI TECNICI

Il fabbricante dell'apparecchiatura OG deve fornire dati tecnici che siano sufficienti per la definizione della sicurezza e corretto uso della strumentazione.

C.4 MARCATURA

In aggiunta ai dati richiesti dalla legislazione vigente, l'apparecchiatura OG deve presentare almeno le seguenti marcature:

- nome del fabbricante;
- modello;
- numero di serie o matricola, oppure altra identificazione univoca.

C.5 DOCUMENTAZIONE

L'apparecchiatura OG deve essere accompagnata da una documentazione che includa almeno le seguenti informazioni:

- identificazione dell'apparecchiatura,
- requisiti di sicurezza,
- rapporto di prova che attesti la conformità dell'apparecchiatura ai requisiti richiesti nella verifica
- dati tecnici (vedere punto C.3)
- manuale d'uso e manutenzione

Appendice D CASI APPLICATIVI

D.1 SCREENING A LUNGO RAGGIO

All'interno degli stabilimenti petrolchimici sono installate tubazioni la cui lunghezza complessiva può raggiungere diverse centinaia di metri, per altro affiancate secondo una configurazione a fascio e spesso sostenute da opportune strutture o supporti.

In queste realtà il controllo mediante esame visivo dell'intera tubazione non è esaustivo e i tradizionali controlli ad ultrasuoni non sono facilmente praticabili. Nella maggior parte dei casi i controlli ad ultrasuoni vengono svolti per misure di spessore delle pareti del tubo secondo intervalli prestabiliti ricavando, così, la riduzione media di parete. Quest'approccio di verifica discontinua eseguita spesso in punti di facile accesso riduce fortemente la possibilità di un oggettivo riscontro degli stati corrosivi.

In questi scenari, il controllo ad OG costituisce un efficace e rapido strumento di accertamento diagnostico per tratti di tubazione anche di notevole lunghezza. Il controllo può essere condotto sull'intera tubazione, anche senza esclusione delle zone di difficile accesso come quelle adiacenti ai supporti, rivestite o coibentate, e tra le installazioni appaiate.

Caso studio 1

La figura D1 mostra un tratto di tubazione d'impianto lunga 80 m e con diametro esterno 152 mm (6 pollici). Il tubo e le saldature non hanno rivestimento ed appaiono in buone condizioni. L'obiettivo del controllo OG è quello del rilevamento di possibili corrosioni in prossimità di penetrazioni di parete. Le risultanze del controllo ad OG sono illustrate in fig. D2.

La lunghezza totale del tratto di tubazione esaminata è 100 m. di cui parte interrata (ingresso interrato marcato con +F2). I segnali OG registrati non sembrano evidenziare particolare criticità, ad eccezione di una piccola eco non simmetrica (curva rossa) riflessa dall'entrata in una penetrazione di parete incamiciata (marcata +F1). Solo il successivo controllo di dettaglio condotto per la zona in questione, può confermare l'effettiva esistenza di una discontinuità e la sua entità.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 1 considerando la presenza nella linea di una parte incamiciata. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0$, $F_{mi}=0.05$, $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.95 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.95.



Fig. D1

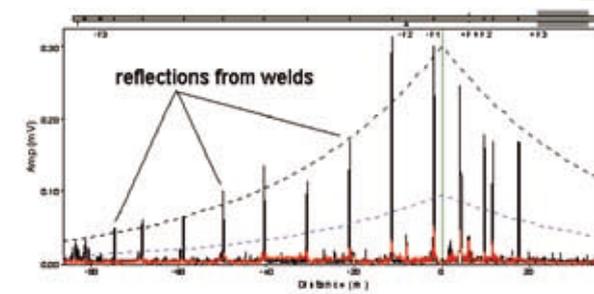


Fig. D2

D.2 LUNGO ATTRAVERSAMENTO

Caso studio 2

Questo caso applicativo concerne lunghi tratti di tubazione non rivestita parzialmente interrata (tumulata). La fig. D3 mostra il tratto di tubazione d'interesse. Le risultanze del controllo evidenziano, nel punto +F5 del diagramma analitico della registrazione strumentale di fig. D4,

un trafileamento (fuoriuscita, perdita) di fluido dalla tubazione. Il trafileamento viene rilevato a circa 47 m dal punto di installazione del sistema di eccitazione OG. Dall'analisi del diagramma si osserva, per altro, una forte attenuazione connotata da un rilevante incremento del livello del rumore di fondo. Questa circostanza indica tra i punti marcati +F5 e +F8 la presenza significativa di un progredito stato corrosivo. Sullo stesso diagramma di fig. D4, il punto marcato +F8 è relativo ad un accoppiamento flangiato.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 0,75. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0$, $F_{mi}=0.05$, $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.95 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.71.

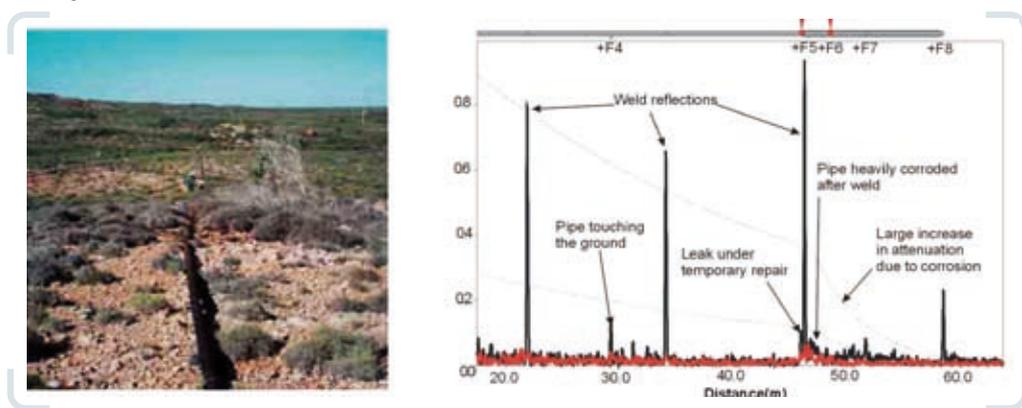


Fig. D3

Fig. D4

D.3 PENETRAZIONI DI PARETI

La penetrazione delle pareti è un tipo di installazione piuttosto diffusa negli stabilimenti petrolchimici al fine di prevenire le fuoriuscite di prodotto ed eventuali allagamenti. Le pareti di questo tipo, con spessore compreso tra 150 e 400 mm, sono solitamente realizzate in calcestruzzo. Tra le diverse soluzioni si menzionano quelle "ad incastro" per le quali la tubazione viene semplicemente cementata in parete durante la costruzione; e "in camicia", in cui la tubazione è corredata di un anello esterno che la avvolge per il tratto necessario all'attraversamento della parete.

In tali penetrazioni, il segmento della tubazione interessata è suscettibile a fenomeni corrosivi, per di più difficilmente rilevabili con esami visivi o con controlli ad ultrasuoni tradizionali.

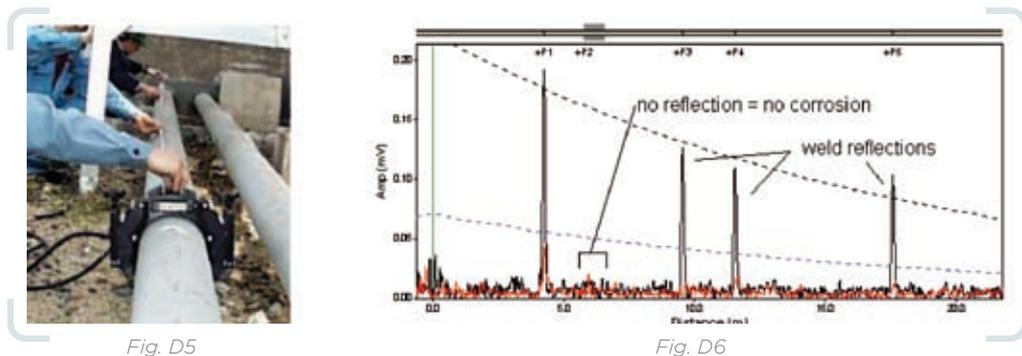


Fig. D5

Fig. D6

Caso studio 3

Questo caso studio concerne una penetrazione di tubazione installata con guarnizione a tenuta. La fig. D5 mostra il tratto di tubazione d'interesse. Il controllo ad OG può essere condotto

mantenendo in esercizio la tubazione e le risultanze, riportate in fig. D6, non mostrano stati corrosivi di una certa rilevanza dal momento che non sono evidenziati segnali di eco in corrispondenza della zona di transizione della tubazione in penetrazione di parete.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 1. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0$, $F_{mi}=0.05$, $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.95 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.95.

Caso studio 4

Questo caso studio concerne il controllo ad OG di tubazioni con penetrazione di pareti "ad incastro". La fig. D7 mostra due tipiche penetrazioni "ad incastro" in un impianto petrolchimico.

La fig. D8-a riporta il rilevamento OG per la tubazione indicata con A in fig. D7. Il tratto di penetrazione di parete è indicato dall'area ombreggiata in alto del diagramma. L'ingresso in parete è marcata F1. L'assenza di segnali di eco di una certa rilevanza è indicativa di un buono stato di conservazione.

La fig. D8-b, invece, riporta il rilevamento OG effettuato sulla tubazione B di fig. D7. Si può notare dal segnale in corrispondenza dall'area ombreggiata in alto del diagramma che in questo caso all'ingresso in parete è associato uno stato di corrosione che eccede la curva DAC di richiamo.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 1. $F_{tr}=1$ (flange ravvicinate, tuttavia il *target* del controllo è solamente la penetrazione), $F_d=0$, $F_r=0.35$ (penetrazioni di muro di cemento), $F_{mi}=0.05$ (linea crudo leggero), $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.6 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.6.



Fig. D7 - Tipiche penetrazioni in parete del tipo "ad incastro" in impianto petrolchimico.

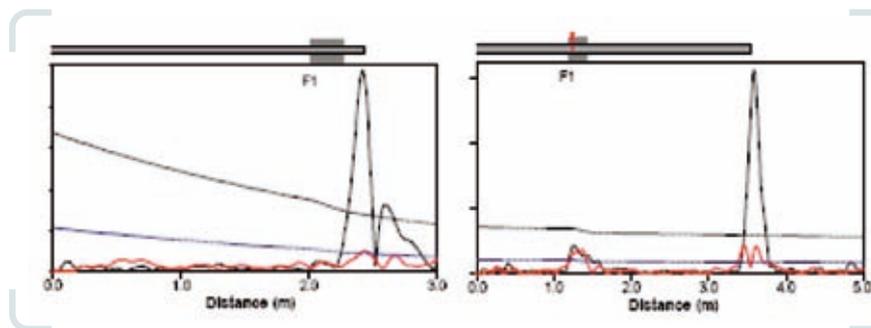


Fig. D8-a - Tubo A: nessuna corrosione rilevata.

Fig. D8-b - Tubo B con presenza significativa di corrosione.

Caso studio 5

Questo caso studio concerne il controllo ad OG di tubazioni con penetrazione di pareti "in camicia" di fig. D9. La fig. D10 mostra il risultato del relativo controllo OG in corrispondenza di una penetrazione di parete. In corrispondenza dell'ingresso in camicia, marcato F1 in fig. D10, viene rilevato un segnale asimmetrico di una certa rilevanza che è indicativo della presenza di un significativo stato corrosivo interno.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 1. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0$, $F_{mi}=0.05$ (linea crudo leggero), $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.95 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.95.



Fig. D9 - Stato della tubazione in penetrazione in parete "in camicia" dopo la rimozione della guarnizione anti-intemperie.

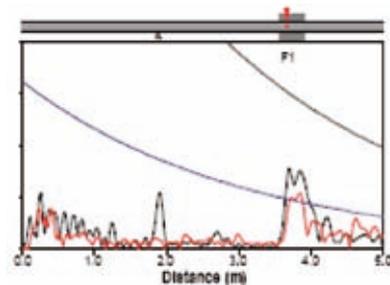


Fig. D10 - Rilevazione del sistema OG relativa ad una penetrazione in parete di tubazione "in camicia".

D.4 TUBAZIONI INTERRATE

Caso studio 6

Questo caso studio concerne il controllo ad OG di una tubazione, fig. D11, di diametro 254 mm (10 pollici). Le risultanze del controllo OG, riportate in fig. D12, evidenziano uno stato corrosivo di una certa criticità non rilevata ad un esame visivo condotto preliminarmente.

Nei diagrammi di registrazione dei segnali OG, la linea verde indica la posizione di installazione del sistema di eccitazione OG, mentre i punti d'ingresso in parete sono marcati +F1 e +F2, rispettivamente. Negli stessi diagrammi vengono, per altro, marcate le posizioni rilevate della parete, delle saldature, dei supporti semplici, oltre che delle zone di tubazione fortemente interessate da stati corrosivi di una certa rilevanza. Più in particolare, l'attenuazione dell'onda guidata di torsione dovuta alla presenza del terreno riduce fortemente l'ampiezza degli echi di circa un fattore 12.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 1. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0.42$ (penetrazione corta di muro di terra con ricoprimento bituminoso di piccolo spessore e in buone



Fig. D11

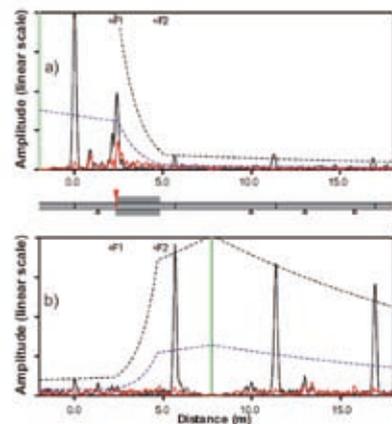


Fig. D12

condizioni), $F_{mi}=0.05$ (linea crudo leggero), $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.53 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.53.

Il diagramma a) di fig. D12, evidenzia una eco non simmetrica di notevole ampiezza (curva rossa) rispetto al punto d'ingresso marcato +F1. Tale circostanza è imputabile ad uno stato corrosivo di discreta criticità.

Il diagramma b) non evidenzia alcuna eco in corrispondenza del punto d'ingresso opposto marcato +F2, indicando, così, l'assenza di zone affette da stati corrosivi significativi. Vale la pena sottolineare la difficoltà della rilevazione di difetti in corrispondenza della marcatura +F1 a causa della considerevole attenuazione.

Il presente caso di studio dimostra, per altro, l'importanza di controllare tubazioni in interrate da entrambi i lati della penetrazione.



Fig. D13

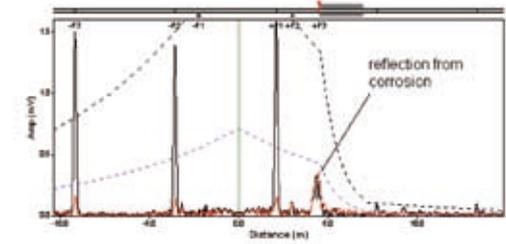


Fig. D14

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 1. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0.45$ (penetrazione di muro di cemento con contatto diretto e superiore ad 1.5 m di lunghezza), $F_{mi}=0.05$ (linea crudo leggero), $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.5 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.5.

D.5 CORROSIONE ESTERNA GENERALE

I gasdotti e gli oleodotti hanno spesso sviluppi di diverse decine, se non centinaia di chilometri su territori esposti a rilevanti variazioni di temperatura. Per altro, non sempre è possibile garantire una adeguata protezione delle tubazioni all'esposizione diretta degli agenti atmosferici con inevitabile conseguenza di attacco corrosivo delle superfici esterne.

In molti casi lo stato corrosivo più critico è riscontrabile in zone poco accessibili come il fondo della tubazione stessa o in corrispondenza di supporti semplici, tanto che risulta estremamente difficoltoso, se non impossibile, l'esame visivo o il controllo con ultrasuoni tradizionali.

Caso studio 7

Questo caso studio concerne il controllo ad OG di una tubazione, fig. D15, di diametro 152 mm (6 pollici) adagiata su un supporto semplice. Tale tubazione, non rivestita, si sviluppa per diverse decine di chilometri in ambiente desertico.

Nella stessa figura si evidenzia un moderato stato corrosivo generalizzato della superficie esterna.

Le risultanze del controllo OG, riportate in fig. D16 relative alla tubazione mostrata in fig. D15, concernono un tratto di 60 m compreso tra la valvola marcata -F2 e la saldatura marcata +F7. L'interpretazione dei segnali evidenzia una zona a stato corrosivo trascurabile compresa tra i punti marcati +F1 e +F7, ed una moderata corrosione in corrispondenza del punto marcato -F1. In corrispondenza di questi tratti, una successiva ispezione ha accertato riduzioni di spessore rispettivamente di 1,2 mm e 3 mm.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 0,75. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0$, $F_{mi}=0.1$ (crudo pesante), $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.95 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.67.

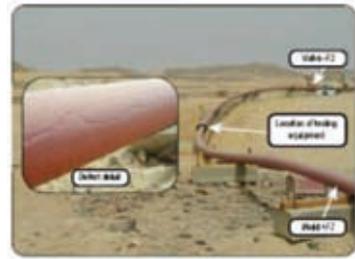


Fig. D15

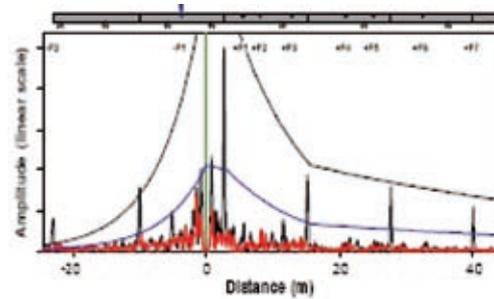


Fig. D16

D.6 TUBAZIONI SOVRAPPASSO

All'interno degli impianti petrolchimici è spesso pratico e funzionale installare tubazioni a percorso aereo sostenute da apposite strutture portatubi, in particolar modo in corrispondenza di attraversamenti di strade.

Caso studio 8

Questo caso studio concerne il controllo ad OG di una tubazione aerea, fig. D17, di diametro 76 mm (3 pollici) mantenuta in esercizio.

La configurazione della tubazione è ad arco con colonne di innalzamento fino a 5 m dal suolo. L'installazione del sistema eccitante, disposto in prossimità della curva ad angolo retto dalla quale si innalza la colonna, consente sia il controllo del tratto verticale, sia quello della zona orizzontale appoggiato al suolo adiacente la curva. Il tratto investigabile è fortemente dipendente dalle condizioni generali della tubazione e dei rivestimenti. Nel caso specifico, il controllo viene esteso ad uno sviluppo complessivo di 40 m disposto quasi simmetricamente rispetto al punto di installazione del sistema OG eccitante.

Le risultanze del controllo ad OG, riportate in fig. D18, non evidenziano particolari criticità ad eccezione di un breve tratto marcato -F1

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 0,8. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0$, $F_{mi}=0.05$, $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.95 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.76.

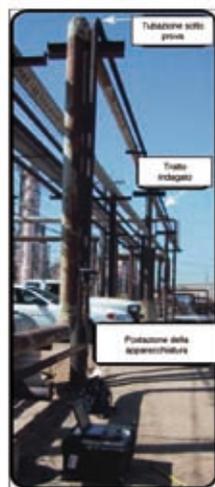


Fig. D17

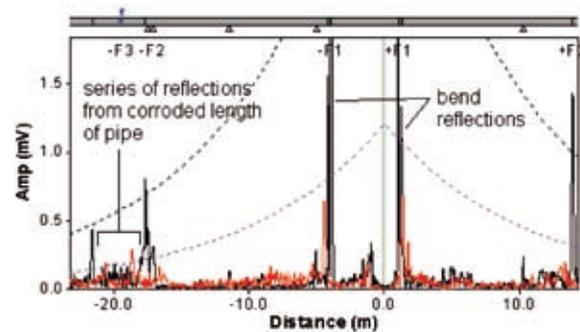


Fig. D18

D.7 CORROSIONE SOTTO I SUPPORTI

I tratti delle tubazioni in contatto con i supporti di sostegno sono molto suscettibili all'attacco corrosivo, particolarmente se le installazioni sono collocate in ambienti marini.

Infatti, nelle zone di contatto viene spesso a raccogliersi umidità che ristagnando accelera il processo corrosivo.

Inoltre, in tubazioni coibentate, lo strato protettivo in corrispondenza delle zone di supporto viene spesso rimosso, per ispezioni di tipo locale, o risulta frequente danneggiato. Tali fattori accelerano il processo corrosivo.

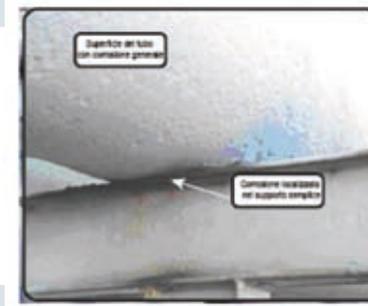


Fig. D19

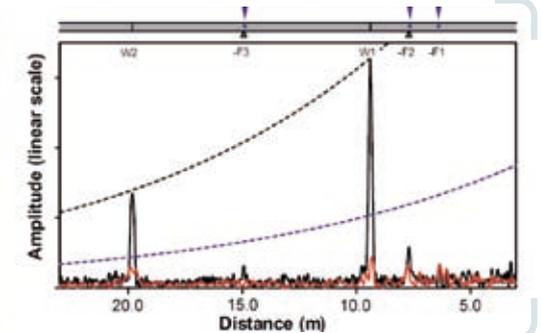


Fig. D20

Caso studio 9

Questo caso studio concerne il controllo ad OG di un gasdotto, fig. D15, di diametro 152 mm (6 pollici) sostenuto da supporti semplici lungo un frangiflutti. La tubazione, che manifesta già vaiolature diffuse sulla superficie esterna, ha comunque un rivestimento in vernice. La fig. D19 mostra il dettaglio del contatto tra la tubazione ed un supporto. La rilevazione degli effetti dell'attacco corrosivo in termini di riduzione dello spessore non è immediata, in quanto l'applicazione dei metodi PND tradizionalmente utilizzati per questo tipo di controllo implicano, comunque, il sollevamento del tubo dal supporto.

Le risultanze del controllo ad OG relative al tratto di tubazione d'interesse sono riportate in fig. 20. Il punto marcato -F2 indica, nel diagramma, la posizione del supporto, mentre i punti W1 e W2 indicano altrettante saldature. In corrispondenza del punto marcato -F1 viene rilevata una pustola di corrosione per la quale la perdita di spessore risulta inferiore al 15% di quello nominale.

In questo tipo di applicazioni, l'uso discreto di diverse frequenze di eccitazione risulta particolarmente efficace dal punto di vista diagnostico.

Per questo caso studio, il valore dell'indicatore di opportunità è 0,8. $F_{tr}=1$, $F_d=0$, $F_r=0$, $F_{mi}=0.05$, $F_{sp}=0$. Quindi l'indicatore di applicabilità definito in Appendice B è 0.95 e l'indicatore sintetico di adeguatezza R è 0.76.

Appendice E CLASSIFICAZIONE DELLE INDICAZIONI RILEVATE NEL CONTROLLO AD OG

Le indicazioni rilevate nell'ambito di un controllo ad OG possono essere classificate secondo la convenzione di seguito riportata in relazione alla loro significatività.

Classe	Descrizione
0	Il controllo ad OG non evidenzia indicazioni.
1	Il controllo ad OG evidenzia un'indicazione di non particolare rilevanza. E' raccomandabile, ove possibile, la esecuzione di ulteriori controlli con altri metodi PND di dettaglio per accertare l'esistenza di una discontinuità.
2	Il controllo ad OG evidenzia un'indicazione di particolare rilevanza. E' obbligatorio procedere all'esecuzione di ulteriori controlli con altri metodi PND di dettaglio per accertare l'esistenza di una discontinuità.

Appendice F MODELLO DEL RAPPORTO DI PROVA

Il modello del Rapporto di Prova di seguito riportato è congruente con l'approccio presentato ed ha, pertanto, carattere puramente indicativo.
A titolo esemplificativo si riporta, infine, un esempio di rapporto di prova del controllo ad OG eseguito su un una tubazione..

Organismo YYYYYYYY	Rapporto di Prova Controllo ad OG	Numero YYYYY	Commessa YYY	Pag	
Dati tubazione					
Utilizzatore, Committente	YYYYYYYY				
Identificazione del sito industriale	YYYYYYYY				
Tratto 1					
Identificazione del tratto ispezionato	vedi rappresentazione isometrica fig. F2				
Identificazione della tubazione (specifica)	Linea HCI da D347 a E1085				
Materiale	Acciaio al carbonio				
Tipo fluido e stato fisico	Acido cloridrico, gassoso				
Diametro massimo [mm]	200				
Spessore nominale [mm]	3.18				
Spessore rilevato [mm]	3.54 - 3.60				
Temperatura massima rilevata sulla superficie del tratto di tubazione [°C]	10°C				
Estensione delle aree esaminate nel corso della prova [m]	20.50				
Procedimento adottato per rendere accessibile la superficie da esaminare	Accesso per mezzo di piattaforma elevatrice, nessuna preparazione della superficie				
Descrizione delle tecniche di trattamento delle superfici	Verniciatura epossidica				
Documentazione di riferimento (Procedura, disegni, manuali, ecc.)	Istruzione operativa IO 01_13 GW_SP (ispezione con onde guidate di tubazioni metalliche su rack)				
Apparecchiatura OG utilizzata	YYYYYYYY				
Posizionamento del sistema di eccitazione/ricezione	vedi fig. G1				39
Modi d'onda guidata utilizzati nella prova	T(0,1) modo torsionale assialsimmetrico del primo ordine				
Frequenza di generazione utilizzata	18,00 - 32,00 kHz				
Capacità del canale/i o del campo acustico emesso	5,1nF ± 0,2 nF				
Estensione della zona morta [m]	0.55				40
Sistema di calibrazione assoluta della apparecchiatura	Calibrazione automatica (10.3052 mV)				
Curva di correzione della ampiezza con la distanza (DAC) relativa alla saldatura	25% PST				
Curva di correzione della ampiezza con la distanza (DAC) relativa al livello di sensibilità indicato nel rapporto	5% PST				
Sensibilità della prova in termini di Perdita della Sezione Trasversale (PST) (tutti gli echi al di sopra del livello di sensibilità dichiarato dovranno essere identificati ed interpretati)	10% PST				
Variazioni della sensibilità nel tratto di tubazione esaminato (se utilizzate)	Tratto C2-C1 sensibilità diminuita a 10% PST				
Indicazione schematica delle caratteristiche identificate (saldature, flange, supporti etc.)	vedi rappresentazione isometrica fig. F2				
Indicazioni					
Numero individuale indicazione	Possibile danno	Localizzazione indicazione Longitudinale, Angolare	Classificazione indicazione	Controllo di dettaglio previsto o raccomandabile	
1	Corrosione Corrosione localizzata esterna	Longitudinale + 5.47 m da anello Angolare ora tecnica 08:00	2	UT, VT	
2					
3					
Note:					
Osservazioni:					



Fig. G1 dettaglio area di applicazione del trasduttore ad onde guidate

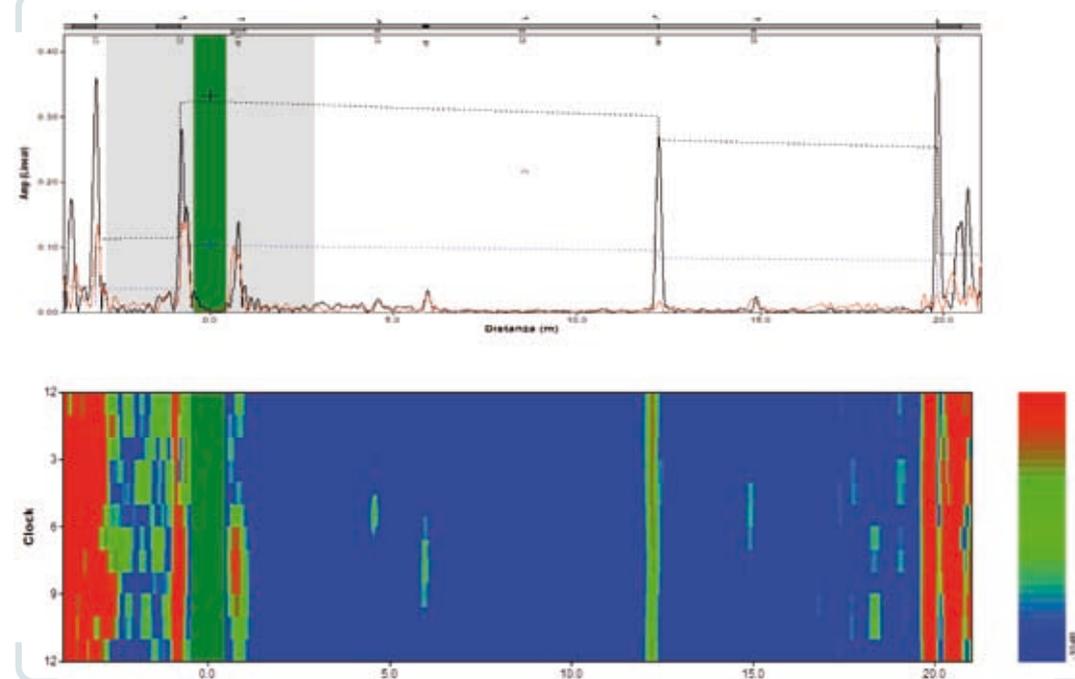


Tabella 1 caratteristiche rilevate sulla tubazione

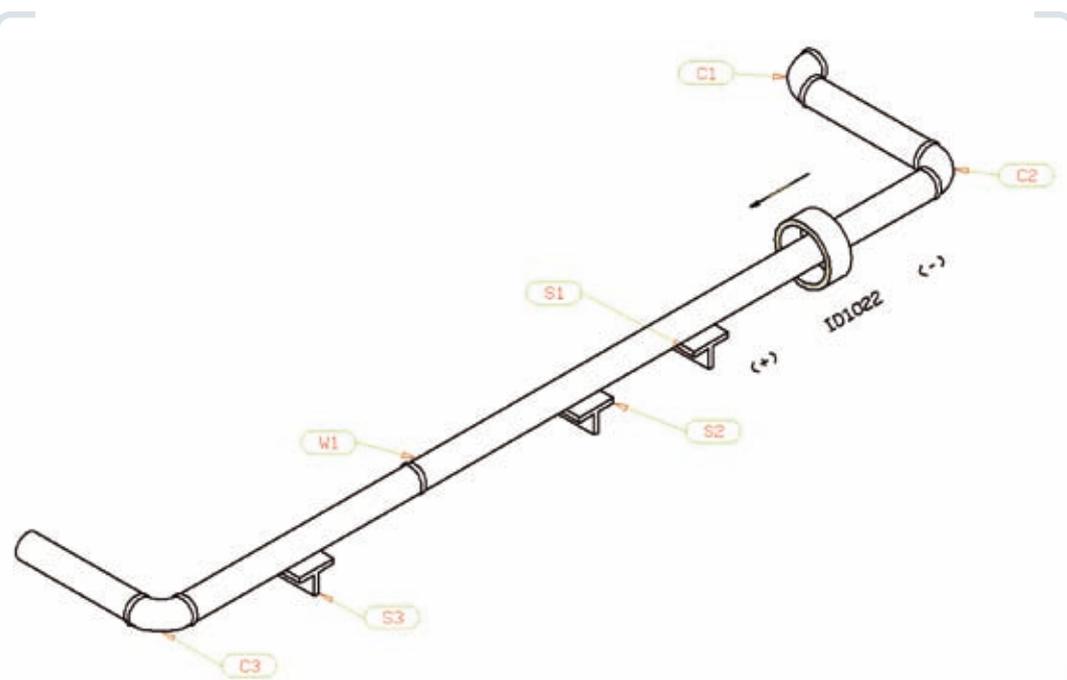


Fig. G2 rappresentazione isometrica dell'area ispezionata

Caratteristica	Posizione	Dimensione (mV)	ECL	Estensione	Classe	Annotazioni
C1	-3.11	0.969	-	70	1D Curva	Curva C1 a 90° saldata
C2	-0.81	0.659	-	40	1D Curva	Curva C2 a 90° saldata
+F1	0.76	0.341	-	13	Specchio	Immagine speculare in campo vicino della caratteristica C2
S1	4.55	0.0602	-	13	Supporto	Supporto S1 appoggiato (verificare lo stato dell'area di contatto)
+F2	5.47	0.0809	5	35	Minore	Indicazione minore, variazione di sezione trasversale del 5% e distribuzione sul 35% della circonferenza. L'esame visivo rivela la presenza la presenza di corrosione (codice 14) sulla superficie esterna che interessa un area di forma ellittica di dimensione 50X80 mm. L'esame con UT rivela uno spessore residuo di 3.35 mm.
S2	8.5	0.00562	-	30	Supporto	Supporto S2 appoggiato (mancanza di appoggio)
W1	12.22	0.711	-	90	Sald	Saldatura W1
S3	14.82	0.0551	-	0	Supporto	Supporto S3 appoggiato (verificare lo stato dell'area di contatto)
C3	19.83	1	-	90	1D Curva	Curva C2 a 90° saldata

Esecutore del controllo OG	Luogo: YYYYYY	Supervisore del controllo OG YYYYYY	Luogo YYYYY
	Data YYYYYY		Data YYYYYY

Appendice G BIBLIOGRAFIA

1. Alleyne, D.N., Pavlakovic, B., Lowe, M.J.S. and Cawley, P. 'Rapid long-range inspection of chemical plant pipework using guided waves', *Insight*, Vol 43, pp 93-96, 2001.
2. Barshinger, J., Rose, J.L., Avioli Jr., M.J. 'Guided wave resonance tuning for pipe inspection. *Journal of Pressure Vessel Technology*', Vol 124, pp 303-310, 2002.
3. Bartoli, I., Marzani, A., Lanza di Scalea, F. and Viola, E. 'Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section', *Journal of Sound and Vibration*, Vol 295, pp 685-707, 2006.
4. Cawley, P., Lowe, M.J.S., Alleyne, D.N., Pavlakovic, B. and Wilcox, P. 'Practical long range guided wave inspection - applications to pipes and rail', *Materials Evaluation*, Vol 61, pp 66-74, 2003
5. Demma, A., Cawley, P., Lowe, M.J.S., Roosenbrand, A.G. and Pavlakovic, B. 'The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements', *NDT&E International*, Vol 37, pp 167-180, 2004
6. 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*, Vol 114, pp 611-625, 2003.
7. Marzani, A., Viola, E., Bartoli, I., Lanza di Scalea, F., Rizzo, P. A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides, *Journal of Sound and Vibration*, Vol 318, pp. 488-505, 2008.
8. Mudge, P.J. 'Field application of the Teletest (R) long-range ultrasonic testing technique', *Insight*, Vol 43, pp 74-77, 2001
9. Rizzo, P., Bartoli, I., Marzani, A. and Lanza di Scalea, F. 'Defect classification in Pipes by Neural Network using multiple Guided Ultrasonic Wave features extracted after Wavelet processing', *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol 127, pp. 294-303, 2005.
10. Sheard, M. and McNulty, A. 'Field experience of using long-range ultrasonic testing', *Insight*, Vol 43, pp 79-83, 2001
11. Silk M.G. and Bainton K.F. 'The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to lamb waves', *Ultrasonics*, Vol pp 11-19, 1979.
12. Simonetti, F., Cawley, P. 'On the nature of shear horizontal wave propagation in elastic plates coated with viscoelastic materials', *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol 460, pp 2197-2221, 2004.
13. Wassink, C.H.P., Robers, M.A., de Raad, J.A. and Bouma, T. 'Condition monitoring of inaccessible piping', *Insight*, Vol 43, pp 86-89, 2001
14. Marzani A., 'Time-transient response for ultrasonic guided waves propagating in damped cylinders', *International Journal of Solids and Structures*, (in press).

fine dell'inchiesta pubblica: OTTOBRE 2008
finito di stampare: OTTOBRE 2008
presso la tipografia Novagrafica - Camponogara
editing a cura di charta-bureau.com

