

Doppia parete con rinforzo metallico: caratteristiche costruttive e comportamento meccanico



Il comportamento "viscoelastico" del PEHD consente di rilassare le tensioni meccaniche dovute a picchi di sollecitazione localizzati lungo la linea. Oltre che un vantaggio, tale caratteristica costituisce un limite in presenza di carichi esterni radiali, che tendono ad ovalizzare la tubazione per effetto del fenomeno di "creep". L'utilizzo di tubazioni corrugate riduce l'entità del fenomeno ma non lo elimina: per questo motivo sono state messe a punto tubazioni rinforzate con elementi metallici disposti a spirale lungo la parete esterna del tubo.

di Roberto Frassine - Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta", Politecnico di Milano

Lelio Di Pietro - Deriplast

Il tipo di polietilene più utilizzato per le applicazioni nel settore dei tubi è quello ad alta densità (HDPE), caratterizzato da cristallinità più elevata rispetto agli altri tipi di polietilene con conseguente miglior comportamento meccanico complessivo. La parte di materiale che non cristallizza (fase "amorfa") presenta una temperatura di transizione vetrosa inferiore a -100°C : questa caratteristica impartisce al materiale un'elevata tenacità a temperature molto basse, ma anche una spiccata tendenza a dare luogo a deformazioni variabili nel tempo per effetto dei carichi applicati (fenomeno di "creep"). L'HDPE è di conseguenza un materiale le cui proprietà meccaniche sono fortemente dipendenti dal tempo e il suo comportamento è ben descritto da un modello di tipo viscoelastico non lineare. L'interazione del tubo con le sollecitazioni trasmesse dal terreno (sforzi, deformazioni, stabilità allo schiacciamento, ecc.) è quindi più complessa rispetto a quella di un materiale a comportamento elastico e dipende dalle caratteristiche del materiale e dalla geometria del profilo di corrugamento.

COMPORAMENTO MECCANICO

Il comportamento meccanico della tubazione interrata dipende essenzialmente dall'interazione tubo-terreno: in linea di principio, essendo la tubazione in HDPE più deformabile del terreno circostante, ci si può attendere che i carichi e i conseguenti sforzi agenti nella parete del tubo vadano diminuendo nel tempo per effetto dei fenomeni di assestamento del sistema composito tubo/terreno. La progressiva ovalizzazione della tubazione per effetto della pressione del terreno soprastante fa sì che una parte significativa dei carichi inizialmente sopportati dal tubo venga trasferita al terreno. L'entità dello "schiacciamento" all'equilibrio è funzione



delle proprietà meccaniche del materiale utilizzato (modulo elastico) e dal profilo geometrico dello strato corrugato (momento d'inerzia della sezione). L'elevata tenacità dell'HDPE permette al tubo, sotto la pressione del terreno, di sopportare ovalizzazioni anche rilevanti senza subire danneggiamenti, trasformando lo sforzo di flessione (nella sua componente di trazione) in uno sforzo anulare di compressione membranale per effetto della contropressione esercitata dal terreno: si forma così una struttura composita con considerevoli caratteristiche di resistenza ai carichi verticali che può essere dimensionata con tecniche di progettazione ingegneristica simili a quelle impiegate nella realizzazione di gallerie, miniere e trivellazioni. Il comportamento meccanico delle materie plastiche è tuttavia profondamente diverso da quello dei materiali da costruzione tradizionali (Haddad, 2005). Esso presenta caratteristiche anelastiche non-lineari con dipendenza dal tempo fin dai primi istanti di applicazione della sollecitazione meccanica (comportamento "viscoelastico"). Dal punto di vista progettuale, la non-linearità può essere tenuta in conto in prima approssimazione con metodi di "linearizzazione" a tratti, mentre la dipendenza dal tempo si valuta mediante prove a sforzo costante (creep) o a deformazione costante (rilassamento). In figura 1a è mostrato un esempio di curve sforzo-deformazione ottenute da una prova di compressione monoassiale su HDPE a diverse velocità di deformazione, nelle quali si evidenziano le spiccate caratteristiche di non-linearità e l'effetto della dipendenza dal tempo (attraverso la dipendenza dalla velocità di deformazione) tipica del comportamento viscoelastico. In figura 1b è mostrata invece la forza di reazione nel tempo per una deformazione imposta costante (prova di rilassamento) per una tubazione liscia in HDPE da 300 mm di diametro soggetta ad una deformazione imposta del 10% in direzione del diametro. Si osserva come la forza applicata inizialmente si riduca rapidamente fino a dimezzarsi dopo circa 5 minuti dall'istante di applicazione della deformazione.

La conseguenza di questo tipo di comportamento meccanico sull'interazione tubo/terreno è duplice: da un lato, sottoposto al carico del terreno soprastante, il tubo continuerà a deformarsi fino al raggiungimento dell'equilibrio della struttura composita tubo/terreno (effetto di creep); dall'altro, una volta raggiunto questo equilibrio, lo sforzo presente nella parete del tubo tenderà a diminuire progressivamente nel tempo (rilassamento). L'effetto di questa sequenza di eventi è schematizzato in figura 2.

Prove condotte su un provino prelevato da un tubo in HDPE del diametro di 1200 mm e deformato del 5% mostrano che la forza dopo un giorno risulta circa il 30% di quella che era stata necessaria per applicare la deformazione iniziale. Per quanto riguarda l'effetto di creep, invece, in assenza di confinamento laterale esso produce una progressiva ovalizzazione del tubo per effetto del carico del terreno soprastante: la deformazione si assesterà dopo un certo tempo su un valore più gran-

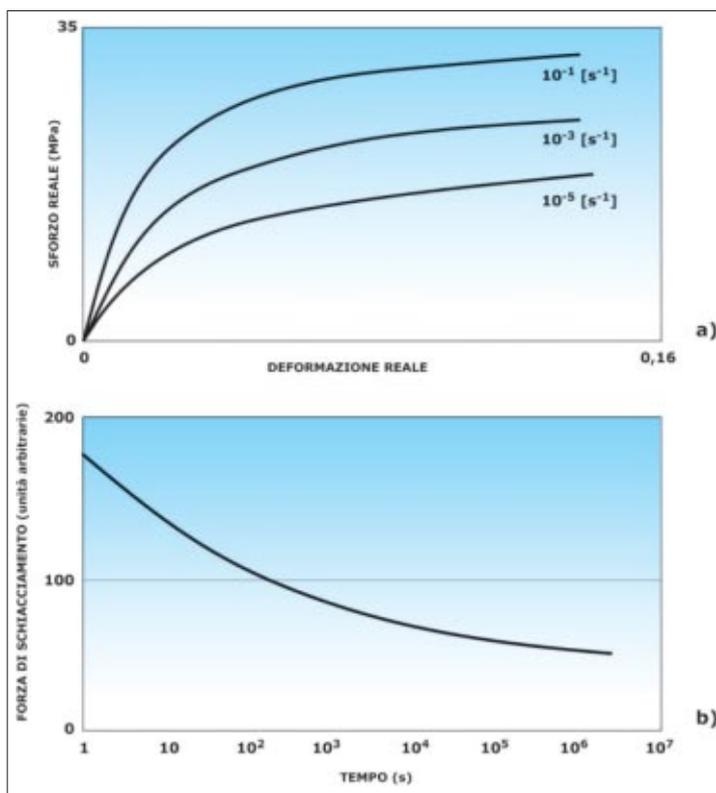


Fig.1: a) Curve sforzo-deformazione misurate in compressione monoassiale su un HDPE al variare della velocità di deformazione imposta e b) rilassamento della forza di schiacciamento misurata su una tubazione corrugata in HDPE per una deformazione diametrale imposta pari al 10%

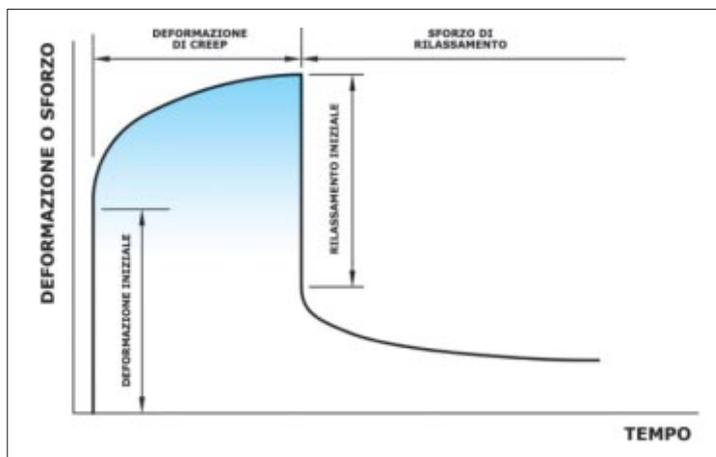


Fig.2: Creep e rilassamento del tubo dovuto alle interazioni della struttura composita tubo/terreno



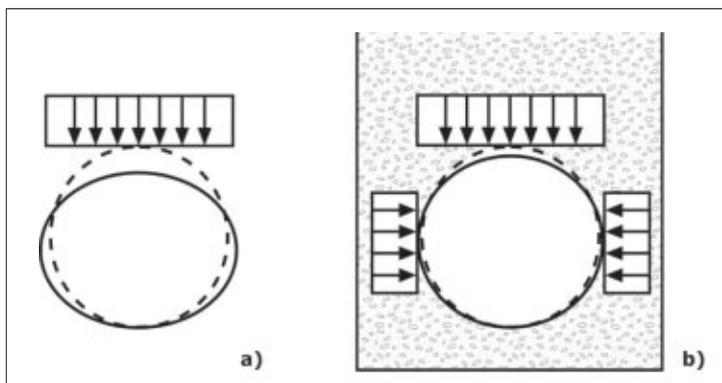


Fig.3:
Interazione
tubo/terreno
nel caso di
tubazione
deformabile

de di quello iniziale (figura 3a). Se invece il tubo è interrato, esso asseconderà inizialmente la deformazione del terreno, fino alla formazione di un “arco” di scarico che ripartirà parte del peso del terreno soprastante sul terreno adiacente, in modo analogo a quanto si osserva nelle costruzioni in muratura in caso di cedimento dell’architrave (CPPA, 2009). Parte della sollecitazione agente sul tubo sarà quindi scaricata sul terreno laterale (figura 3b), il quale eserciterà un’azione di confinamento per la deformazione del tubo stesso. La deformazione complessiva risultante sarà quindi considerevolmente minore rispetto a quella che si avrebbe con il tubo libero.

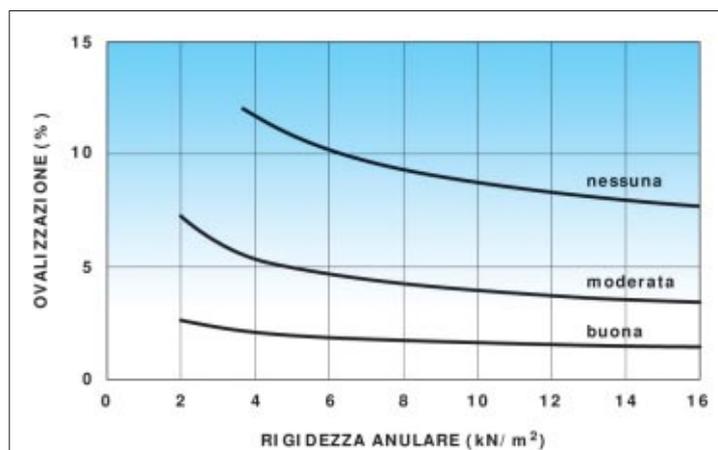
Per poter mantenere basse le sollecitazioni nella parete di un tubo corrugato in HDPE è quindi necessario che la rigidezza del terreno sia più elevata della rigidezza del tubo. In generale, la situazione più favorevole è quella in cui ai lati del tubo è presente un terreno denso e rigido mentre in corrispondenza della sommità è presente un terreno meno compatto, che favorisce la formazione dell’arco e riduce il peso. Questo effetto sarà poi accentuato dall’ovalizzazione del tubo, che preme sul terreno adiacente compattandolo ulteriormente e riduce la pressione di contrasto con il terreno nella direzione verticale. Per questo motivo le tubazioni flessibili possono essere posate a profondità considerevolmente superiori rispetto alle tubazioni rigide. Al contrario, se il terreno non è adeguatamente compattato sarà proprio il cambiamento della sua rigidezza a determinare la deformazione finale del tubo, che potrebbe raggiungere valori anche molto elevati con rischio di un’eventuale collasso per instabilità: con questo tipo di tubazione è quindi assolutamente necessario controllare il tipo di terreno di riempimento e la sua corretta compattazione dopo la posa della tubazione stessa. Prove sperimentali condotte su tubazioni interrate (Sargand et al., 2005) hanno mostrato che, indipendentemente dal profilo di corrugamento, l’ovalizzazione di tubazioni in HDPE di 1,5 m di diametro si stabilizza entro 30 giorni dalla posa e non supera il 5,2% dopo 2 anni dall’installazione se il terreno di riempimento è stato correttamente selezionato e compattato. L’effetto “arco” è stato misurato come rapporto tra il peso del terreno e il carico sulla tubazione ed è risultato essere compreso tra il 34% e il 57% in dipendenza della compattazione del terreno e della sua granulometria. La pressione misurata alla sommità della tubazione è inoltre diminuita

progressivamente nei mesi successivi alla posa grazie all’assestamento del terreno e al rilassamento del materiale. Solitamente il limite ammissibile di deformazione verticale è dell’ordine del 5% del diametro interno nominale, tenendo conto anche delle tolleranze di spessore e di ovalizzazione legate al processo di produzione del tubo. Prove sperimentali e simulazioni numeriche hanno però mostrato che un tubo corrugato in HDPE è in grado di deformarsi ben oltre questo limite senza snervare né subire collasso per instabilità (Lyondell, 2011). Un indice di questa deformabilità è la cosiddetta “flessibilità” anulare (ring flexibility), misurata secondo la norma EN 1446, che risulta essere sempre superiore al 20%. A parità di carichi esterni applicati, entrambi i fenomeni dipendono dalla rigidezza del tubo e dal modulo di elasticità del terreno circostante. La classe di rigidezza anulare del tubo è definita dal suo valore di SN, che indica il valore di rigidezza minima (espressa in kN/m^2) garantita per il prodotto in esame misurata con la procedura riportata nella norma EN ISO 9969. I valori tipici di SN per i tubi corrugati in HDPE sono 2, 4, 8 e 16. Le principali relazioni tra le prestazioni del sistema e le caratteristiche del tubo sono riportate nella tabella 4 della norma EN 13476-1 2007. Lavori di letteratura hanno mostrato (Kang et al., 2009 e Sargand et al., 2009) che per tubazioni correttamente posate le sollecitazioni iniziali si riducono di oltre il 50% per effetto del creep e del rilassamento a lungo termine del materiale. La norma EN 13476-1 2007 riporta i valori di deflessione massima al variare della classe di rigidezza anulare SN per tubi corrugati in diverse condizioni di compattazione del terreno di posa: tale diagramma è riportato a titolo indicativo in figura 4. Studi condotti su diverse configurazioni di trincea per tubazioni multiple (Joshi et al., 2011) hanno mostrato che una semplice posa di tipo “trenchless” – più economica in quanto non richiede complesse operazioni di scavo, non necessita di geotessili di stabilizzazione ed è più efficace in termini di stabilità e distribuzione di pressioni sul tubo – può consentire significativi risparmi nei costi di posa.

TUBAZIONI RINFORZATE CON SPIRALE METALLICA

Le tubazioni corrugate in HDPE sono largamente impiegate da molti decenni per la realizzazione di condotte di scarico non in pressione, grazie all’eccellente resistenza del materiale anche in ambienti particolarmente aggressivi e alla facilità ed economicità della posa. Uno dei limiti principali che si è evidenziato in queste applicazioni è la maggiore deformabilità del tubo rispetto ad altri tipi di materiale (gres, cemento, acciaio, ecc.) che rende necessaria l’azione di supporto del terreno circostante per limitare le deformazioni e prevenire lo schiacciamento del tubo sotto i carichi esterni applicati. Questo fenomeno è in qualche misura reso più evidente dal fatto che il polietilene, come tutti i materiali plastici, ha un comportamento meccanico di tipo viscoelastico e quindi mostra sotto carico costante una deformazione progressivamente crescente nel tempo: questo fenomeno è

comunemente denominato “creep” (si veda ad esempio *Christensen, 1982, Suleiman et al., 2004 e Shaw et al., 2005*). Per cercare di ovviare alle conseguenze di questo fenomeno, sono state introdotte sul mercato tubazioni corrugate “rinforzate” con una spirale d'acciaio: la presenza del metallo all'interno della struttura del tubo limita considerevolmente gli effetti di creep, analogamente a quanto avviene nel caso delle materie plastiche rinforzate con fibre (materiali compositi). La disposizione a spirale, inoltre, attenua l'effetto di singolarità geometrica dovuto alla presenza della corrugazione, in particolare per quanto riguarda l'azione di sollecitazioni flessionali. Le tubazioni corrugate a doppia parete strutturale sono costituite da due strati di materiale coestruso, che vengono opportunamente sagomati all'uscita dalla testa di estrusione per assumere la configurazione geometrica mostrata schematicamente in figura 5. Le tubazioni rinforzate con una spirale metallica (che nel prosieguo, per semplicità, saranno indicate come “tubazioni spiralmate”) presentano un profilo di corrugazione simile ma una struttura interna molto diversa, in quanto tra i due strati di HDPE si interpone la spirale metallica stessa, come mostrato schematicamente in figura 6. Lo strato esterno, al quale compete la funzione di impartire rigidità alla struttura, risulta quindi “rinforzato” da questo elemento che è assente nel tubo corrugato tradizionale. Si può notare inoltre che, a causa della disposizione elicoidale del nastro d'acciaio, la sezione non presenta più una simmetria rotazionale nel piano trasversale all'asse del tubo: la differenza tra le due geometrie di corrugazione è più evidente nella vista laterale mostrata in figura 7.



In entrambe le tubazioni, sia lo strato interno che lo strato esterno di HDPE svolgono funzioni importanti. Lo strato interno si trova infatti a diretto contatto con il fluido trasportato e deve quindi possedere adeguata resistenza chimica e meccanica, ad esempio agli urti e all'abrasione dovuta al particolato trasportato. Lo strato esterno, nel caso delle tubazioni corrugate, impartisce invece alla struttura la necessaria resistenza ai carichi applicati. Nel caso delle tubazioni spiralmate, la qualità dell'HDPE deve garantire, oltre alle adeguate caratteristiche chimiche e meccaniche, anche una buona adesione con la spirale metallica; tale adesione viene di solito ottenuta attraverso l'applicazione di uno strato di “primer” sulla superficie del rinforzo metallico prima della produzione del tubo. È quindi essenziale che le caratteristiche dei materiali e le condizioni di estrusione siano attentamente verificate durante tutto il ciclo produttivo per assicurare la necessaria

Fig.4: Valori massimi di deflessione per tubazioni corrugate in diverse condizioni di compattazione del terreno

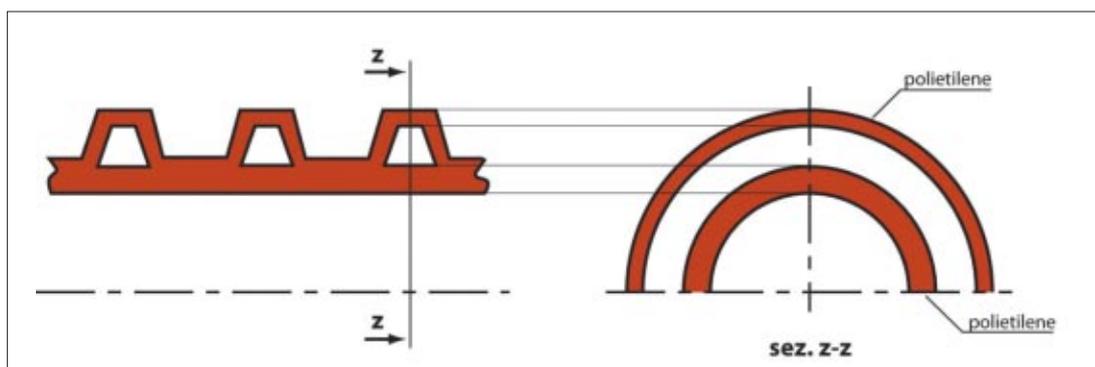


Fig.5: Sezione di una tubazione corrugata a doppia parete (tipo B secondo EN 13476-3: 2007)

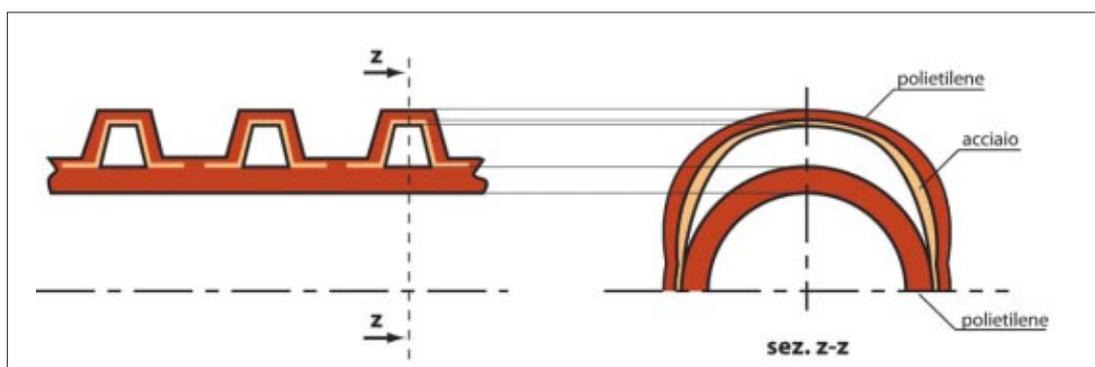


Fig.6: Sezione di una tubazione con spirale metallica di rinforzo (tipo B secondo EN 13476-3: 2007)

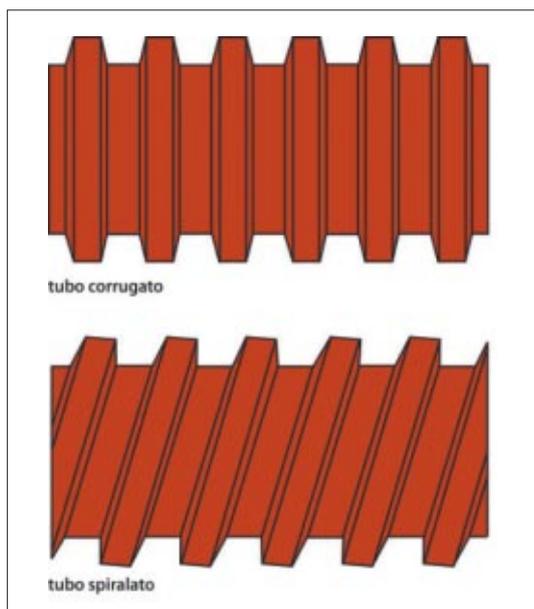


Fig.7: Vista laterale dei due tipi di tubazione corrugata esaminati

qualità dei prodotti. L'incremento di caratteristiche meccaniche dato dalla presenza della spirale metallica si traduce in un risparmio di peso della tubazione a parità di diametro e di classe di rigidità anulare. Ad esempio, una tubazione spiralata di diametro 800 mm SN 8 pesa circa il 15% in meno rispetto ad una corrispondente tubazione corrugata. La presenza dell'acciaio riduce sensibilmente l'effetto di deformazione progressiva (creep) che si manifesta nelle tubazioni corrugate per effetto di un carico esterno applicato in direzione radiale. In figura 8 sono mostrati i dati relativi a prove di deformazione sotto carico condotte su tubazioni a parità di diametro (800 mm) e di classe di rigidità anulare (SN 8): in queste prove è stato applicato un carico tale da imporre una deformazione iniziale y_0 pari al 3%

del diametro iniziale per ciascuno dei due prodotti esaminati.

Si osserva che il fenomeno di creep è presente in entrambi i casi, ma per il tubo spiralato il valore di deformazione dopo 40 giorni di applicazione del carico è circa 4 volte inferiore. Entrambe le tubazioni recuperano parte della deformazione subito una volta rimosso il carico: il recupero dopo 48 giorni è pari a circa un terzo della deformazione totale nel caso della tubazione corrugata, mentre è praticamente completo nel caso della tubazione spiralata già dopo soli 7 giorni. Pur potendo continuare ad essere considerata una tubazione "deformabile", cioè una tubazione meno rigida del terreno circostante, la tubazione spiralata risulta essere quindi più resistente all'ovalizzazione rispetto al tubo corrugato. Questa maggiore stabilità di forma rappresenta un vantaggio nelle operazioni di trasporto, stoccaggio e posa in opera. L'impiego di un tubo spiralato, tuttavia, richiede particolare attenzione al dimensionamento in fase di progettazione e alle procedure di posa in opera per evitare il rischio di un eventuale snervamento della spirale in acciaio (CSTB, 2007) che può generarsi nel caso di deformazioni eccessive (in genere superiori al 5% del diametro iniziale). Tuttavia, anche in presenza di tale deformazione plastica, il polietilene può continuare a svolgere il suo ruolo essenziale di protezione nei confronti dell'acciaio e di trasporto dei fluidi all'interno della condotta in virtù della sua maggiore cedevolezza ed elevata deformabilità e quindi la funzionalità della tubazione non è necessariamente compromessa.

GIUNZIONI

Il comportamento meccanico delle giunzioni può presentare una particolare criticità per questo tipo di tubazioni, in quanto costituisce di solito una singolarità geometrica. Tuttavia, poiché la geometria e le caratteristiche delle giunzioni possono essere

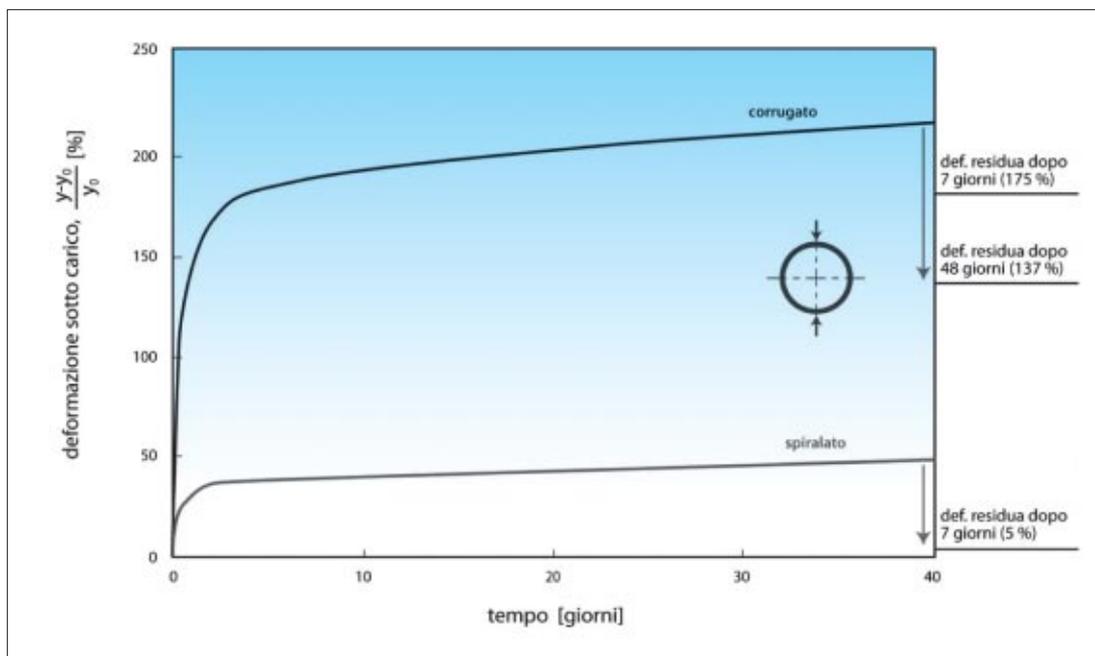


Fig.8: variazione percentuale della deformazione dovuta all'applicazione di un carico costante nel tempo e recupero della stessa dopo rimozione del carico per i due tipi di tubazione esaminata (diametro: 800 mm; rigidità anulare: SN 8)



molto diverse da produttore a produttore, è assai difficile poter dare indicazioni generali. Nel caso più frequente, le giunzioni delle tubazioni non in pressione sono del tipo "a bicchiere", il che presuppone che ad una delle due estremità del tubo il diametro interno sia incrementato ad un valore superiore a quello del diametro esterno medio della tubazione stessa, in modo da premetterne l'inserimento. Nel caso delle tubazioni corrugate, il bicchiere può essere ottenuto sia per termoformatura di una delle due estremità direttamente in linea di estrusione o per saldatura di un bicchiere preformato, di solito ottenuto per stampaggio ad iniezione. In entrambi i casi, l'ingombro e la deformabilità locale della giunzione possono costituire un punto di criticità per la posa e l'esercizio della tubazione, sia per quanto riguarda la rettilinearità che per quanto riguarda la deformabilità e la resistenza alla fessurazione. Nel caso delle tubazioni spiralate, il bicchiere può soltanto essere ottenuto saldando un pezzo preformato ad una delle due estremità del tubo stesso. La soluzione ottimale è quella che prevede la presenza della spirale metallica anche all'interno del bicchiere preformato, in modo tale da preservare localmente sia la rigidità che la resistenza della tubazione. In questo modo le caratteristiche meccaniche della giunzione si mantengono equivalenti a quelle della tubazione rettilinea e conservano quindi la caratteristica tipica di queste tubazioni di poter resistere a condizioni di esercizio più severe rispetto alle tubazioni corrugate.

CONCLUSIONI

Le tubazioni corrugate e le tubazioni spiralate in HDPE presentano caratteristiche di durabilità, economicità di installazione e resistenza superiori a quelle dei materiali tradizionali. Le attrezzature richieste per la movimentazione, il taglio e la posa sono inoltre molto più semplici rispetto a quelle richieste con altri materiali. Le tubazioni spiralate presentano inoltre alcune caratteristiche aggiuntive che comportano alcuni vantaggi in termini di utilizzo. La maggiore leggerezza, la considerevole riduzione della tendenza all'ovalizzazione per applicazione di carichi radiali (creep) dovuta alla presenza della spirale d'acciaio, come pure la geometria delle giunzioni bicchierate semplificano le operazioni di posa e offrono migliori prestazioni in esercizio. Per entrambi i tipi di tubazioni è disponibile una normativa di prodotto nazionale (per le tubazioni spiralate, ad esempio, si fa riferimento alla UNI 11434:2012) che definisce completamente i materiali, la geometria e le caratteristiche fisico-meccaniche e prestazionali dei tubi. Per una completa informazione sulle caratteristiche di queste tubazioni si consiglia sempre e comunque di consultare anche i manuali forniti dai produttori e la letteratura disponibile, come ad esempio *CSTB, 2007*. ■

Intervento tenuto al XXXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche svoltosi a settembre a Brescia.

BIBLIOGRAFIA

Christensen R.M. Theory of Viscoelasticity: an Introduction, Academic Press, London, 1982.

CPPIA Division, Corrugated polyethylene pipe design manual and installation guide of the Plastics Pipe Institute, Irving (TX), 2010.

CSTB, Comportement mécanique des canalisations à parois ondulées Paladex de la Société Palad, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Rapport d'essai 26004194, 2007.

Haddad Y.M. Viscoelasticity of Engineering Materials, Chapman & Hall, London, 1995.

Joshi B., Durkee D.B. & Wythes T.J. Finite element modeling of a PE pipe heap leachate collection system, Finite Elements Analysis and Design, 37, 2001, 979-996.

Kang J.S., Han T.H., Kang Y.J. & Yoo C.H. Short and long-term behaviours of buried corrugated high-density polyethylene (HDPE) pipes, Composites: Part B, 40, 2009, 404-412.

Lyondell-Basell, Polypropylene used in structured wall sewage piping systems: a preliminary comparative study of various materials in use, comunicazione privata, 2011.

Sargand S.M., Masada T., Tarawneh B. & Gruver D. Field performance and analysis of large-diameter high-density polyethylene pipe under deep soil fill, J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1, 2005, 39-51.

Sargand S.M., Masada T. & Keatley D. Pennsylvania thermoplastic pipe deep burial project: 20th year investigations, J. of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 4, 2009, 262-268.

Shaw M.T. & Macknight W.J. Introduction to Polymer Viscoelasticity, Wiley, NJ, 2005.

Suleiman M.T. & Coree B.J. Constitutive model for high density polyethylene material: a systematic approach, J. of Materials in Civil Engineering, ASCE, 6, 2004, 511-515.



Tre protagonisti della manifestazione IDRA 2012: da sinistra: Lelio di Pietro di Paladeri (sponsor), Baldassarre Bacchi, professore della facoltà di ingegneria di Brescia (organizzatore e cuore della manifestazione) e Roberto Frassine professore alla facoltà di ingegneria dei materiali al Politecnico di Milano (relatore del presente intervento)