



Caratterizzazione della rottura a fatica di un oleodotto: un caso reale.

L. Allegrucci, F. Dolce, A. Coletta, V. Di Paolo, P. Chini, M. Bernabei

*Aeronautica Militare - Centro Sperimentale Volo – Reparto Chimico,
Aeroporto De Bernardi, via Pratica di Mare, 45, 00040 Pomezia (RM)*

SOMMARIO. La distribuzione logistica dei combustibili di impiego aeronautico della Difesa è assicurata, nell'Italia settentrionale, sia da mezzi terrestri che, soprattutto, dall'impiego di una rete di oleodotti che, dal 1960, attraversa questa parte del paese dalla Liguria al Veneto. In un tratto di questa rete, durante le regolari operazioni di pompaggio, è stata registrata una diminuzione di pressione del sistema ed una contemporanea fuoriuscita di carburante dall'oleodotto che ha interessato superficialmente sia il terreno circostante che un fiume limitrofo. Per tale ragione è stata avviata dalla Procura della Repubblica una indagine per definire cause e responsabilità dell'evento.

Il tratto di rete in esame era costituito dal tubo in acciaio API 5L grado B, protetto dalla corrosione mediante uno strato di asfaltene (ovvero da un rivestimento bituminoso applicato a caldo) e contenuto da una camicia di cemento necessaria ad assicurarne l'integrità strutturale nei siti posti al di sotto del manto stradale.

Il sopralluogo effettuato ha evidenziato la rottura della tubazione localizzata nella sua parte superiore.

La superficie di rottura è stata sottoposta ad indagine frattografica al fine di risalire al meccanismo della rottura ed alle sue cause.

La superficie è stata osservata mediante microscopia ottica ed elettronica per individuare caratteristiche morfologiche ed eventuali deformazioni plastiche associate alla rottura.

Il materiale è stato analizzato e caratterizzato mediante analisi quantitativa elementare ICP (spettroscopia al plasma), analisi semiquantitativa puntuale EDS (spettroscopia a dispersione di energia), microscopia metallografica e determinazione di durezza per individuare eventuali anomalie di composizione o di trattamento termico.

Il rivestimento bituminoso è stato, anch'esso, caratterizzato mediante FTIR (spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier) e GC-Py (gas-pirolisi) per valutarne il grado di deterioramento ed individuare eventuali anomalie.

Tutte le evidenze acquisite hanno palesato una rottura a fatica con innesco sulla superficie esterna del tubo. La presenza di una estesa zona deformata, in corrispondenza della crinatura, ha reso indispensabile una valutazione mediante analisi agli elementi finiti (FEA). Il modello numerico ha evidenziato come la geometria e l'incrudimento del materiale, indotti dalle deformazioni, abbiano conferito alla tubazione sensibilità alla fatica nelle normali condizioni di esercizio caratterizzate dai carichi alterni provocati dall'attacco e lo stacco delle stazioni di pompaggio. L'applicazione del calcolo della vita a fatica, correlata alle variazioni di carico ciclico dovute alle operazioni di flussaggio del carburante, ha consentito la datazione dell'origine della rottura.

Tale periodo temporale è coinciso con l'intervento di pavimentazione stradale dell'area in esame (fino a quel momento a destinazione rurale, e per tale motivo semplicemente interrata) effettuato circa 20 anni prima e durante il quale un mezzo meccanico ha provocato la deformazione della tubazione ed i cui effetti sono stati ecologicamente ed economicamente catastrofici solo due decenni dopo. Questo dato è stato anche confermato



dalla presenza, nell'intorno della rottura, di un rivestimento a base polietilenica diverso dal resto della rete di distribuzione e non ancora disponibile in commercio al momento della posa in opera della tubazione.

KEYWORDS. Fatigue, Pipeline, Failure analysis, Finite element analysis, API 5L grade B.

INTRODUZIONE

La distribuzione logistica dei combustibili di impiego aeronautico della Difesa è assicurata, nell'Italia settentrionale, sia da mezzi terrestri che, soprattutto, da una rete di oleodotti che, dal 1960, attraversa questa parte del paese dalla Liguria al Veneto (Fig. 1). In un tratto di questa rete, durante le regolari operazioni di pompaggio, è stata registrata una diminuzione di pressione del sistema ed una contemporanea fuoriuscita di carburante dall'oleodotto che ha interessato superficialmente sia il terreno circostante che un fiume limitrofo.

A seguito dell'inconveniente, avvenuto alla rete il 10 Marzo 2008 nel tratto nei pressi di Vicenza, è stata avviata dalla Procura della Repubblica una indagine per definire cause e responsabilità dell'evento.



Figura 1: Collocazione della rete P.O.L. [1].

REPERTI ESAMINATI

La tubazione è costituita da acciaio API 5L grado B, protetto dalla corrosione mediante protezione catodica ed uno strato di asfaltene [2] (ovvero da un rivestimento bituminoso applicato a caldo) e contenuto da una camicia di cemento necessaria ad assicurarne l'integrità strutturale nei siti posti al di sotto del manto stradale. Il sopralluogo effettuato ha evidenziato la rottura della tubazione localizzata nella sua parte superiore. Sono stati esaminati tre tratti di tubazione della lunghezza di due metri, di cui uno interessato dalla rottura che ha dato origine al problema e gli altri due utili per le analisi comparative. La superficie di rottura è stata sottoposta ad indagine frattografica al fine di risalire al meccanismo della rottura ed alle sue cause.

PROTOCOLLO DI INDAGINE

Sui reperti di natura metallica è stato seguito un protocollo di indagine che ne ha consentito di esaminare e documentare gli aspetti macrofrattografici, microfrattografici e metallografici. Sono state inoltre effettuate analisi chimiche e misure durezza per verificare la rispondenza a specifica del materiale in termini chimico-fisici e

tecnologici. I reperti di natura polimerica sono stati esaminati mediante analisi cromatografiche e spettrofotometriche. Infine, in base alle rilevanze ottenute ed ai dati disponibili, è stato possibile costruire un modello numerico e stimare i carichi applicati e la vita a fatica del materiale.

APPARATI E STRUMENTAZIONE

Gli esami macrofrattografici sono stati condotti con microscopio ottico Leica M205C. Gli esami microfrattografici sono stati effettuati mediante microscopio elettronico FESEM-Zeiss Leo-Supra 35 equipaggiato con microanalizzatore di fluorescenza dei raggi X a dispersione di energia (EDS) Oxford INCA MICS. Gli esami metallografici sono stati condotti con microscopio metallografico Leica DM 6000. Le prove di durezza sono state condotte con microdurometro Leitz R2D-DO con carico applicato a piramide di diamante 136° pari a 100 g. Le analisi chimiche elementari sono state effettuate mediante ICP ottico Perkin Elmer Optima 2100 DV. Le determinazioni spettrofotometriche sono state condotte con FTIR Perkin Elmer Spectrum 1000 su pasticca di NaCl. Le determinazioni gascromatografiche dei prodotti di pirolisi sono state condotte con GC Perkin Elmer Autosystem XL con iniettore equipaggiato con pirolizzatore CDS Mod Pyroprobe 2000, interfaccia CDS 1550 e rivelatore a ionizzazione di fiamma (FID). Il modello ad elementi finiti (FEA) è stato costruito utilizzando il software Ansys LS Dyna.

RISULTATI

Esame visivo e macrofrattografico

Il tratto di tubo lesionato è caratterizzato dalla presenza di una crinatura passante orientata nel senso longitudinale del tubo e lunga 15 cm (Fig. 2).

Il tubo presenta una nastratura in buono stato, non prevista nelle specifiche di posa in opera della rete e posta a ricoprire il rivestimento bituminoso originario.

Tutta la direttrice della rottura si presenta priva della catramatura, profilo tratteggiato in bianco e dettaglio evidenziato nel riquadro di Fig. 3.



Figura 2: Localizzazione crinatura.

Il tubo presenta, in corrispondenza della rottura, una schiacciamento verso l'interno (Fig. 4) che varia la geometria creando un punto in cui si concentrano le sollecitazioni create dalle operazioni di flussaggio del cherosene, orientate dall'interno verso l'esterno [3] e [4].

La rimozione dei rivestimenti e la pulizia della superficie esterna del tubo hanno evidenziato la presenza di una forte abrasione longitudinale che interessa tutta la lunghezza del tratto di tubo lesionato ed è localizzata sulla direttrice della rottura, Fig. 5. Gli altri tratti di tubo esaminati sono risultati essere in ottimo stato.

La rottura presenta i lembi disallineati. La superficie di rottura evidenzia la presenza di un'area scura e pianeggiante che si propaga a partire dalla superficie esterna del tubo (Fig. 6). La zona pianeggiante è caratterizzata da quattro lunette consecutive che presentano segni radiali convergenti verso la superficie esterna del tubo, dettaglio in Fig. 6.

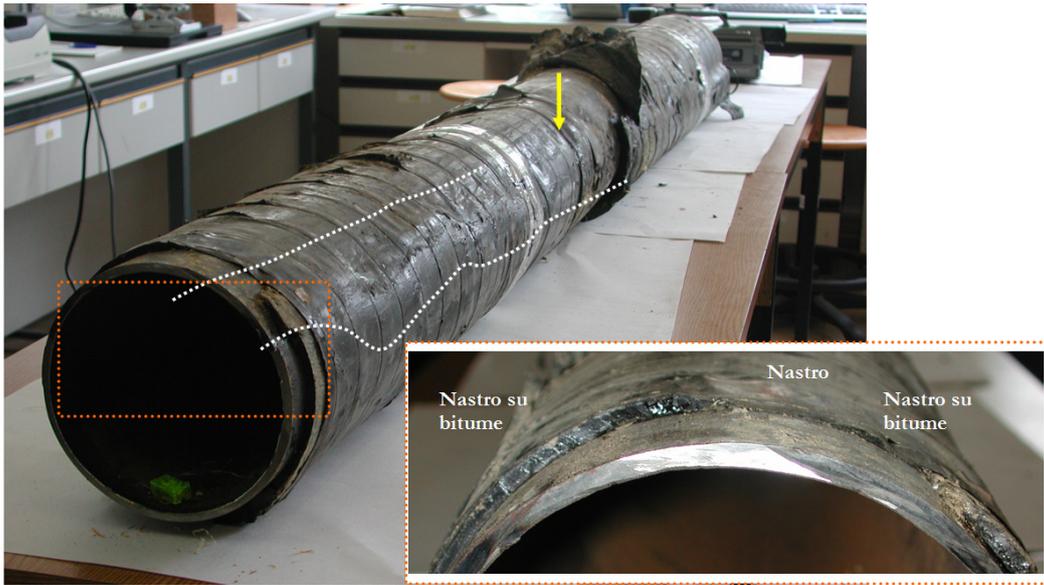


Figura 3: Rivestimento bituminoso e nastratura presenti sul tratto di tubo lesionato.

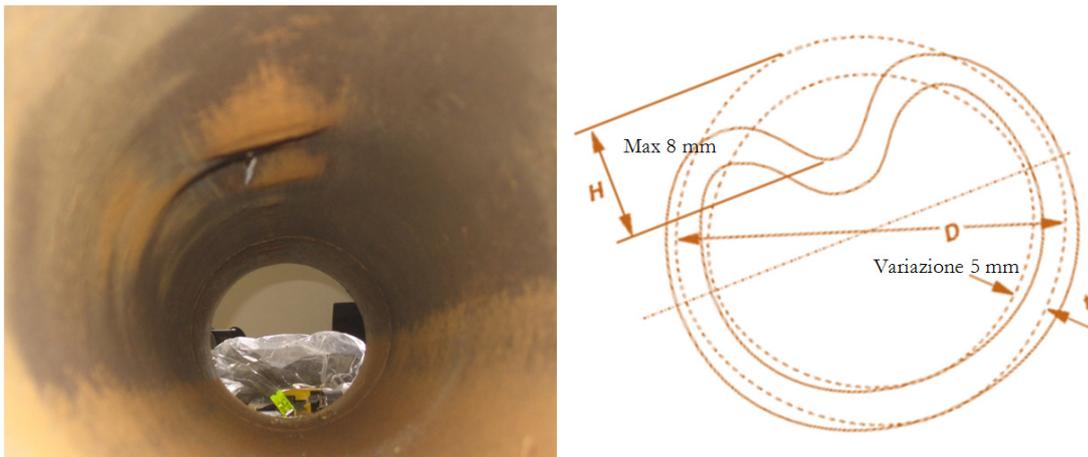


Figura 4: Deformazione per compressione [5] e [6].



Figura 5: Abrasioni longitudinali.

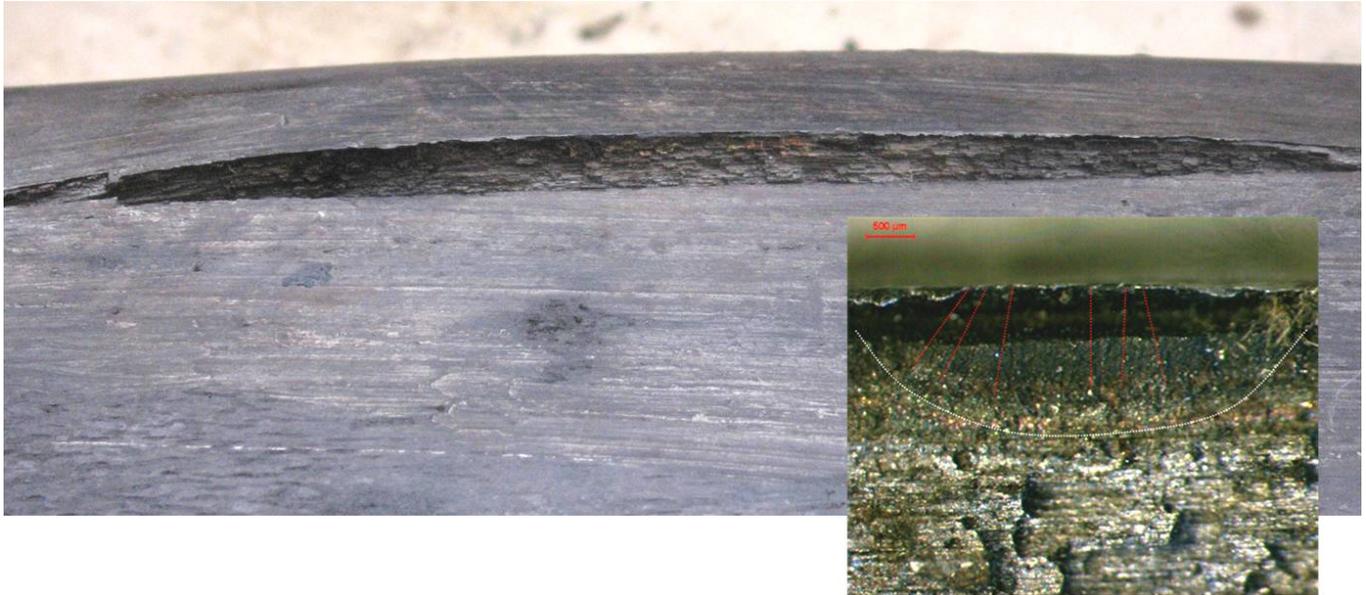


Figura 6: Superficie di rottura.

Osservazione ed esame microfrattografico

L'osservazione microfrattografica ha confermato la presenza delle caratteristiche tipiche di una rottura progressiva ed in particolare sono stati evidenziati un innesco, una zona di propagazione ed una zona terminale di schianto [7].

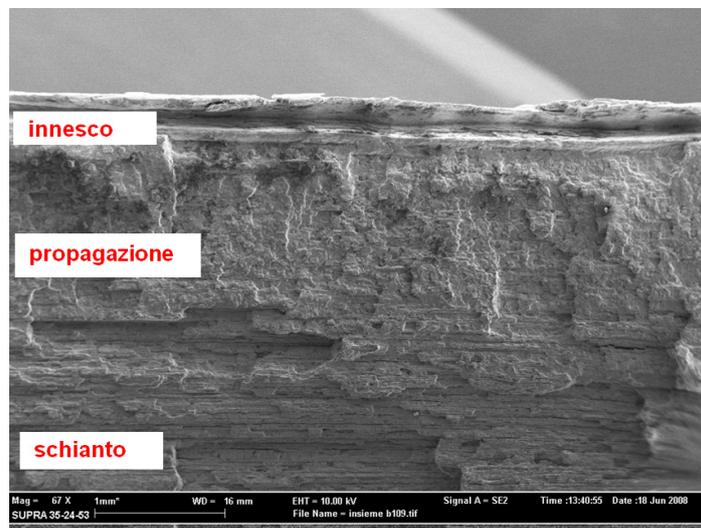


Figura 7: Differenti zone della superficie di rottura.

L'innesco è costituito da un microsolco da abrasione che si sviluppa longitudinalmente sulla superficie esterna del tubo ed è collocato centralmente rispetto alla deformazione. Il microsolco presenta notevoli ribordature, è profondo mediamente 280 μm e si estende in larghezza per circa 420 μm di larghezza su ciascuna delle due superfici di rottura complementari.

L'osservazione microfrattografica ha confermato le dimensioni dell'innesco emerso nell'esame di microscopia ottica: esso interessa circa 125 mm dei 150 mm che costituiscono la lunghezza dell'intera crinatura.

Il fronte progressivo della superficie di rottura si estende per circa 3 mm, ovvero circa il 50% della sezione del tubo, ed ha la morfologia tipica di un meccanismo di fatica, caratterizzata dalla presenza di linee concentriche al punto di innesco. Nella sua interezza la rottura si manifesta come un fenomeno di fatica multinnesco in quanto le quattro aree di propagazione, già precedentemente osservate, sono consecutive e senza soluzione di continuità. Tali valori, stimati



applicando i criteri di valutazione suggeriti dal metodo ASTM E 647-00 [8] e compatibilmente con i limiti imposti dalla tipologia del materiale e dalla tecnica strumentale [9], sono pari a 30 strie di fatica in 10 μm lungo tutta la zona di propagazione stabile, Fig. 8 e 9. Estendendo tale valutazione alla sezione di 3 mm interessata dalla propagazione della rottura a fatica, si ottiene un valore di 9000 cicli.

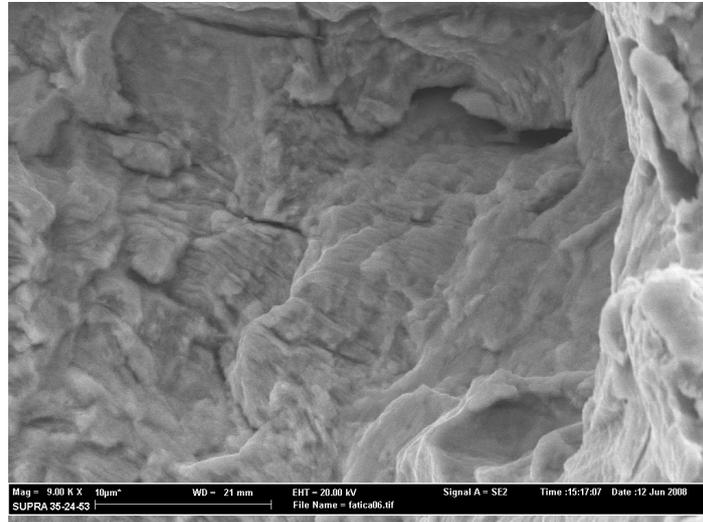


Figura 8: Linee di fatica.

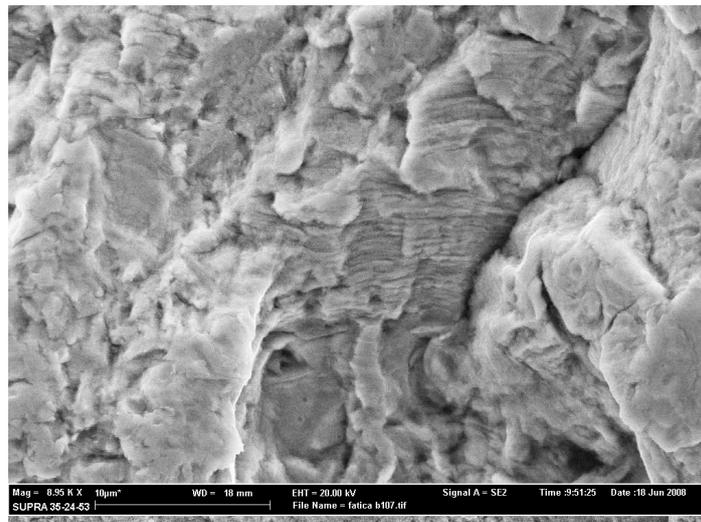


Figura 9: Linee di fatica

Analisi chimica elementare

I dati di composizione corrispondono a quelli di un acciaio API 5L grado B (Tab. 1), in accordo con le specifiche API (American Petroleum Institute) in vigore negli anni di installazione della rete POL [10].

| Elemento | Fe | C | Mn | P | S |
|----------|------|------|------|-------|-------|
| [%peso] | Base | 0.08 | 0.59 | 0.047 | 0.030 |

Tabella 1: Composizione elementare.

La superficie di rottura è stata sottoposta ad analisi elementare semiquantitativa mediante microanalisi EDS non evidenziando disomogeneità locali rispetto alla composizione chimica determinata mediante ICP.

Esame micro strutturale

Il provino al cuore evidenzia una struttura del tipo ferrite/perlite tipica di un acciaio al carbonio e concorde con le specifiche.

Il provino in prossimità dell'innesco della rottura mostra incrudimento, ribordature, microsolchi e crinature secondarie causate dalle deformazioni plastiche, Fig. 10.

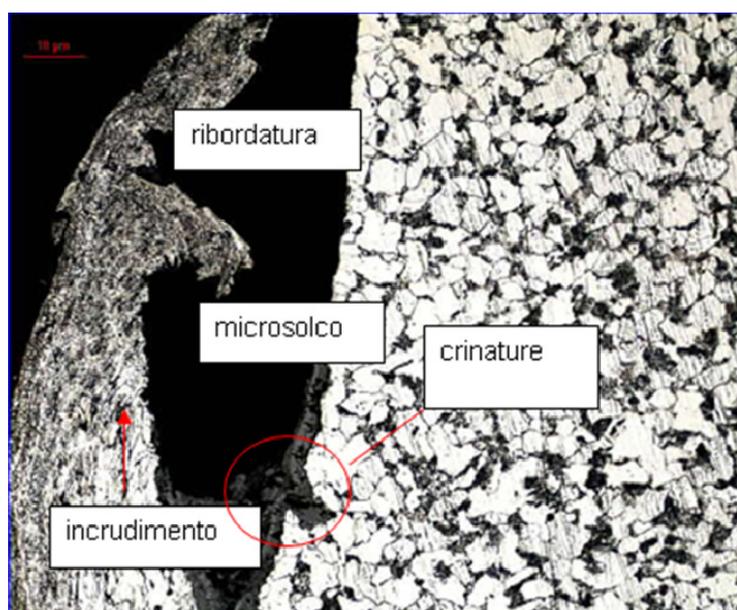


Figura 10: Osservazione metallografica.

Determinazione di durezza

Le misure di durezza sono state effettuate mediante metodo Micro Vickers con carico applicato a piramide di diamante 136° pari a 100 g.

Il tubo integro è perfettamente concorde alle specifiche, mentre la variazione microstrutturale, indotta dalle deformazioni plastiche, conferisce fragilità al materiale.

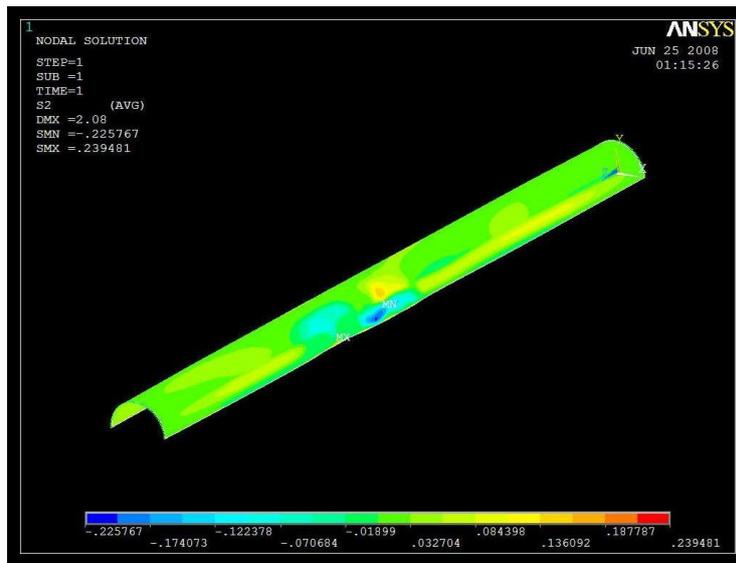
| Punto di misura | Superficie interna tubo integro | Cuore tubo integro | Superficie ext / deformazioni | Superficie di rottura |
|--|---------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Durezza (HV)[Carico di rottura (kg/mm ²)] | 198 [65] | 160 [64] | 299 [96] | 289 [93] |

Tabella 2: Microdurezza.

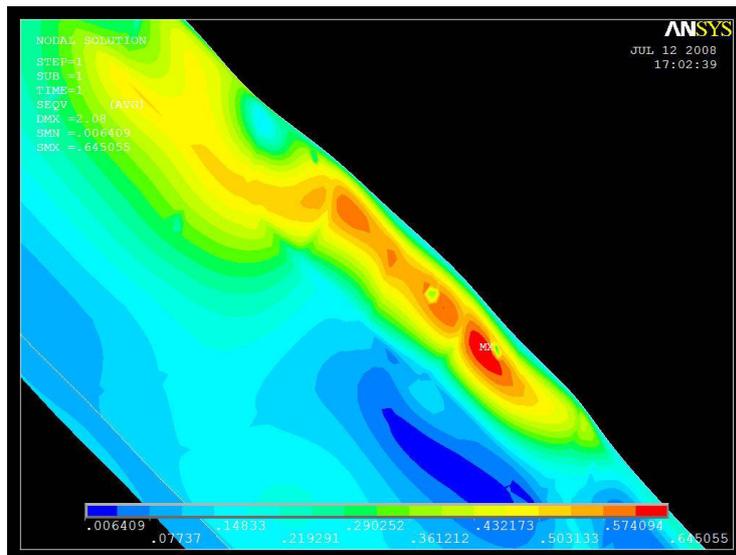
Analisi agli elementi finiti

L'analisi effettuata è di tipo lineare statica con una pressione di esercizio costante pari a 80 bar, lo spessore del tubo 6 mm, il modulo di Young (E) 208 GPa e Poisson (ν) 0.3. Il modello ha 22359 elementi "shell 93 a 8 nodi" e le condizioni al contorno sono tali da riprodurre una lunghezza del tubo infinita.

In corrispondenza della rottura la tubazione raggiunge circa i 240 MPa, superando il limite di fatica, riportato dalla normativa di riferimento [11], pari 165 MPa



Un secondo modello è stato fatto considerando non solo le deformazioni plastiche, ma anche la crinatura e l'incrudimento del materiale. Tenendo conto delle dimensioni della crinatura nella sola fase di propagazione per fatica, lo stress necessario ad arrivare a rottura per sovraccarico è pari a circa 500 MPa raggiunto nelle normali condizioni di esercizio.



Stima della vita a fatica

È stato eseguito il calcolo della vita a fatica del componente in presenza di deformazione.

L' acciaio API 5L Gr. B presenta le caratteristiche meccaniche [12] relative ai fenomeni di fatica riportate in Tab. 3.

| E (GPa) | Su | K' (MPa) | n' | σ_f' (MPa) | ϵ_f' | b | c |
|---------|-----|----------|-------|-------------------|---------------|-------|-------|
| 208 | 423 | 1229 | 0.240 | 964 | 0.360 | 0.145 | 0.550 |

Tabella 3: Caratteristiche meccaniche.



A seguito dell'analisi agli elementi finiti si è stabilito che nel punto d'innescò delle rottura si raggiunge una tensione d'ampiezza $\sigma_{max} = 240$ MPa.

La determinazione dei cicli di fatica è stata fatta utilizzando la legge di Basquin per la stima della vita per cicli di carico ad ampiezza costante [13]. Pertanto assumendo

$$\sigma_{max} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad \text{si ha} \quad N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma'_f} \right)^{1/b}$$

da cui si ottiene

$$N_f \approx 7304$$

Valore comparabile ai 9000 cicli misurati sperimentalmente dalla conta delle linee.

Analisi del rivestimento

I campioni di rivestimento bituminoso, prelevati rispettivamente lontano dalla rottura ed in prossimità della rottura, sotto la nastratura, ed un campione di nastro sono stati sottoposti alle analisi FTIR (Fig. 11), GC-Py (Fig. 12).

I rivestimenti bituminosi sono costituiti da asfaltene e sono uguali siano essi vicino o lontano dalla rottura ed al loro interno contengono uno strato di materiale fibroso, in accordo alle prescrizioni previste per la posa della rete POL.

Il nastro che forma l'avvolgimento presente nel solo tratto ove è presente la rottura è costituito da polietilene ed è estraneo a qualsiasi specifica dell'Aeronautica Militare [14] e [15].

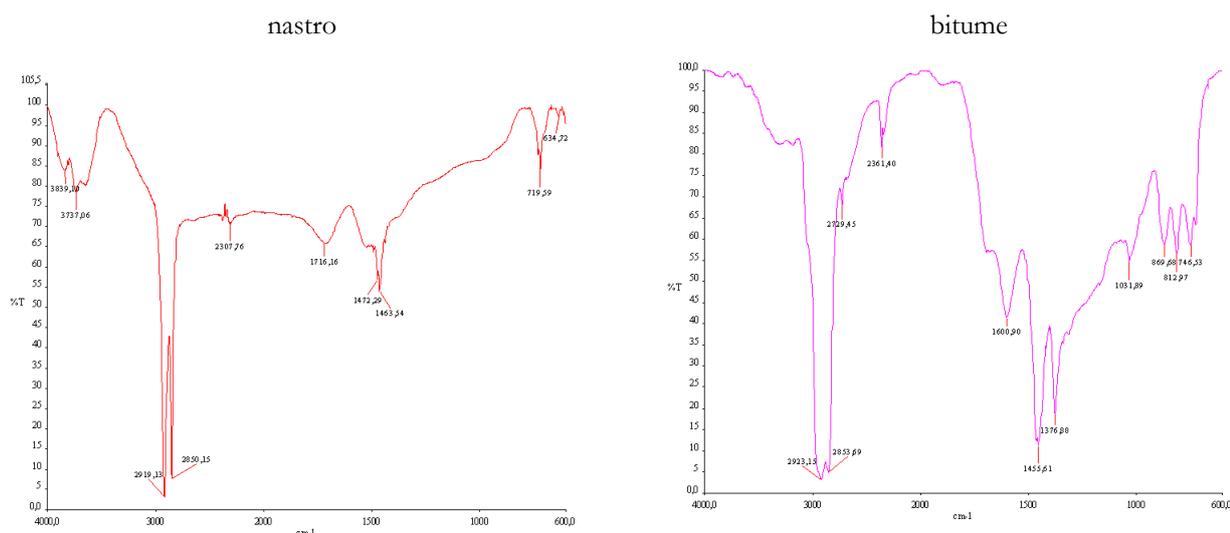


Figura 11: Spettro FTIR .

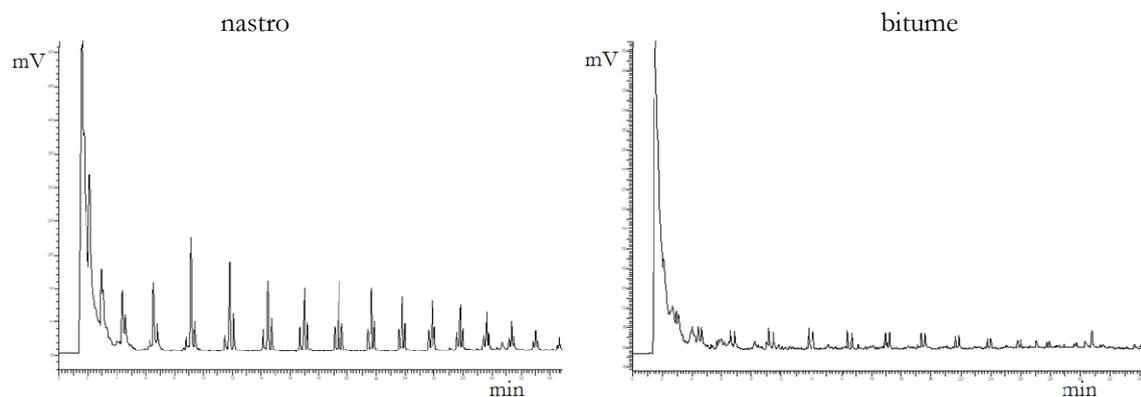


Figura 12: Piogramma.



CONCLUSIONI

Il materiale utilizzato per la realizzazione della tubazione risponde a specifica e gli altri tratti di tubo esaminati sono risultati essere in ottimo stato.

La rottura del tratto di tubazione della rete POL, è stato causata dalla formazione di una crinatura passante, orientata in modo longitudinale e della lunghezza di circa 15 cm.

La crinatura si è formata a partire dalla superficie esterna del tubo e si è propagata in modo progressivo verso l'interno.

Le caratteristiche morfologiche osservate sulla superficie di rottura sono riconducibili a quelle di una rottura progressiva per fatica.

L'innescò della rottura, ovvero la sua causa originaria, è costituito dalle deformazioni plastiche e dalle abrasioni indotte sul tratto di tubo da una azione meccanica compatibile con quella di una benna di una ruspa.

In tali condizioni, nel corso del normale esercizio, le sollecitazioni dinamiche a carattere ciclico che interessano la tubazione, derivanti dal passaggio discontinuo dei prodotti petroliferi, hanno favorito l'instaurarsi del fenomeno osservato. Inoltre le deformazioni sopra descritte hanno svolto il ruolo di concentratore delle sollecitazioni agenti sulla tubazione ed hanno reso possibile un movimento di flessione (bending) del tratto di tubazione che non si sarebbe potuto verificare su un tubo integro.

Le evidenze emerse nell'esame microfrattografico, confermate dai modelli di simulazione numerica, indicano che il fronte progressivo della rottura si è propagato dalla superficie esterna del tubo verso l'interno. Il meccanismo della rottura è classificabile come fatica a basso carico e con numero di cicli che può essere considerato, per ordine di grandezza, come ad alto numero.

In particolare i modelli numerici hanno evidenziato come le sollecitazioni agenti sul materiale per effetto delle normali condizioni di carico, superano la tensione limite di fatica per l'API 5L grado B, solo in presenza della anomala deformazione presente causata da un urto provocato da un mezzo meccanico.

Considerando il valore di interstria minima misurata tra le linee di fatica, pari a 0.30 μm , e l'estensione totale della zona di propagazione a fatica, pari a 3 mm, si ottiene una stima del numero dei cicli pari a 9000. Tale valore, come ordine di grandezza, è compatibile con quello ottenuto mediante applicazione della legge di Basquin per i fenomeni di fatica, che restituisce un valore di circa 7304 cicli.

Nell'ipotesi che ogni apertura della condotta produca almeno un ciclo di sollecitazione e che, per effetto di sbalzi di pressione, si possano generare anche più cicli di sollecitazione per ogni apertura, si ritiene, sulla base dei dati disponibili, che il numero di sollecitazioni efficaci per anno sia pari a 300.

Tale stima, rapportata al numero complessivo di cicli, indica che il fenomeno osservato si è sviluppato in un arco temporale compreso tra 24 e 30 anni, e colloca quindi tra il 1978 ed il 1984 l'anno nel quale è avvenuto il danneggiamento operato dal mezzo meccanico che costituisce la causa del fenomeno esaminato. Proprio in tale periodo sono stati effettuati i lavori di incamiciamento della rete e pavimentazione del manto stradale del tratto interessato.

L'urto del mezzo meccanico ha rimosso l'originale rivestimento di asfaltene proprio in corrispondenza delle abrasioni ovvero sulla direttrice della rottura.

In conseguenza di ciò è stato applicato, solo in questo tratto di tubazione, un differente rivestimento costituito da una nastratura in polietilene avvolta al tubo.

Tale rivestimento, risultato integro, privo di lesioni o strappi ed in buono stato di conservazione, non è previsto né dalle specifiche di progetto delle rete POL né dalle successive specifiche riferite agli interventi di manutenzione dell'oleodotto.

A conferma della datazione dell'intervento invasivo sulla rete si evidenzia che al momento della posa in opera il nastro rinvenuto in corrispondenza della rottura non era ancora disponibile in commercio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Franceschini, E. Turina "Outsourcing e riorganizzazione del servizio Petroleum Oil Lubricants", Report finale, Centro Militare di Studi Strategici e Politecnico di Torino (2006).
- [2] Prova dei bitumi effettuate presso i laboratori Dalmine S.p.a. di Dalmine (Bg) del 17 gennaio del 1956 secondo quanto prescritto dall'art. 41.4.411 del Capitolato.
- [3] P. Hopkins, D. G. Jones, A. C. Clyne, In: International Conference on Pipework, Engineering and Operation, Institution of Mechanical Engineers, London, C376/049 (1989).



- [4] J. R. Fowler, C. R. Alexander, P. J. Kovach, L. M. Connelly, AGA Pipeline Research Committee, Report PR-201-927 e PR-201-9324, (1994).
- [5] C. Macdonald, A. Hopkins, *Engineering Failures Analysis*, 14 (2007) 1667,
- [6] C. Macdonald, *Engineering Failures Analysis*, 12 (2005) 720.
- [7] G. Oddone, *Guida all'interpretazione delle caratteristiche morfologiche delle superfici di frattura al microscopio elettronico a scansione*, M. Ragno Editore, Roma, (1981).
- [8] ASTM E 647-00 Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates.
- [9] Hershko, Mendelker, Gheorghiu, Sheinkopf, Cohen, Levy, *Engineering Failures Analysis*, 15 (2008) 20.
- [10] API specification for pipeline- API std 5L – American Petroleum Institute, (1955).
- [11] Normativa IGE/TD/1 Edition 4, *Steel pipelines for high pressure gas transmission*, (2001).
- [12] M.A. Meggiolaro, J.T.P. Castro, Mechanical Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.
- [13] ASM Metals handbook n° 19 – Fatigue and fracture.
- [14] STD/POL/080 Disciplinare tecnico : Attraversamento oleodotto POL con strade di 1^ specie mediante sezionamento della condotta ed esecuzione di cavallotto (autostrade – strade statali- provinciali- comunali di grande traffico) – A.M. - Comando Prima Regione Aerea - Direzione Demanio – Milano.
- [15] N.T.P.08 - Rivestimento esterno delle tubazioni in polietilene estruso eseguito in fabbrica – A.M. – 27^ Reparto Genio Campale – Milano.