



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Meccanica
e Aerospaziale
Prof. Stefano Mauro

Considerazioni sulla resistenza alla sollecitazione meccanica esterna di tubazioni per gas ad alta pressione

Contratto di ricerca n° 64/2016 tra Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale e SNAM

Prof. Stefano Mauro

Torino,
12/9/2018



Indice

Indice	2
Introduzione	2
Metodologia per il calcolo della forza da applicarsi da parte di un escavatore per provocare un foro di sezione 4" in una tubazione	3
Applicazione a tubazioni per impianti ad alta pressione	6
Analisi dei risultati e conclusioni.....	10

Introduzione

L'azione meccanica esercitata dall'esterno su un tubazione gas costituisce una delle principali possibili cause di danneggiamento che possono dare origine al rilascio di gas. Ai fini di valutare quando possano effettivamente verificarsi queste tipologie di danni appare quindi utile individuare quali siano le azioni e le condizioni operative in cui sia realistico ipotizzare che siano trasmesse alle tubazioni sollecitazioni sufficienti a causarne la rottura.

Premesso che un'analisi dettagliata del fenomeno richiede un calcolo puntuale da effettuarsi in funzione delle condizioni operative, un'analisi preliminare può essere effettuata utilizzando i riferimenti forniti dalla norma australiana AS 2885.1-2012 – *Pipelines – Gas and liquid petroleum*.

La norma nella sua appendice M fornisce indicazioni per determinare se un escavatore può generare con uno dei denti della benna un foro passante su una tubazione. Fornisce inoltre una procedura di calcolo e i valori dei coefficienti numerici da utilizzare per la sua applicazione nei diversi casi considerati. La procedura ha validità generica e il dato ottenibile è la taglia minima di escavatore in grado di causare per un errore di manovra un foro passante nella tubazione, oppure il margine di sicurezza rispetto a tale ipotesi.

Questo metodo di calcolo permette di ottenere dati utili a valutare se sussista il pericolo che uno scavatore possa forare per errore una determinata tubazione, permettendo quindi di definire e mettere in atto le eventuali misure e procedure utili a ridurre al minimo il rischio connesso.



Metodologia per il calcolo della forza da applicarsi da parte di un escavatore per provocare un foro di sezione 4" in una tubazione

La norma australiana AS 2885.1-2012 – *Pipelines – Gas and liquid petroleum* nella sua appendice M fornisce una metodologia utile a valutare se un escavatore è in grado di applicare una forza sufficiente a permettere a un dente della benna di penetrare all'interno della parete di una tubazione e di provocare un foro di sezione pari a quella del dente. La metodologia è basata sul confronto tra la forza calcolabile come necessaria per causare la penetrazione del dente nella tubazione e quella calcolabile come forza massima applicabile dall'escavatore.

La forza R_p necessaria alla perforazione della tubazione è calcolata con l'espressione M3 riportata nella sezione M2 dell'appendice M della norma

$$R_p = 0.0007 t_w (\sigma_U + 410) (L + 22.4) \left(\frac{W}{W + 3.14} \right) \quad (1)$$

Dove:

- L , W lunghezza e larghezza del dente incidente;
- t_w spessore del tubo;
- σ_U tensione di rottura.

La forza massima F applicabile da un generico escavatore, in mancanza di altre indicazioni, è determinabile in funzione del suo peso W_{OP} secondo la formula M4 della sezione M2 dell'appendice M della norma, dove la forza F è espressa in kN e il peso W_{OP} è espresso in tonnellate

$$F = 7.5 W_{OP} - 0.04 (W_{OP})^2 \quad (2)$$

Tale forza F deve essere moltiplicata per un coefficiente correttivo B che tiene conto delle condizioni operative. La tabella M5, riportata nel seguito, suggerisce i valori da adottare per il coefficiente B .



Circumstances	<i>B</i>
In locations where penetration resistance is not a governing factor in pipeline wall thickness selection	<0.75
Where penetration resistance provides adequate resistance to penetration against typical excavator threats, but where puncture may occur under aggressive excavator operation	0.75
Where penetration resistance can be reasonably relied on to satisfy the requirements of the safety management study for 'no puncture'	1.0
Where penetration must never occur, such as may sometimes be necessary to meet the special requirements for high consequence areas (e.g. where the release rate from a hole would exceed the permitted value, or where the size of a hole would exceed the critical defect length)	≥1.3

NOTE: A value of 1.3 for *B* appears to provide a reasonable level of assurance that even dynamic loads will not result in penetration, based on the field trials discussed below.

Tabella 1 – coefficienti correttivi *B*

Infine la norma fornisce le dimensioni dei denti utilizzati dagli escavatori, in funzione del loro peso, distinguendo tra denti per uso generale e denti penetratori a punto singolo (single point penetration tooth) e denti gemellati del tipo "tigre" (twin pointed tiger teeth). Per ciascun tipo di dente sono indicate le sue dimensioni e la sezione del foro che possono causare.

Excavator weight (t)	Dimensions in mm								
	Max. tooth length (i.e. max. hole length)	General purpose tooth			Single point penetration tooth and twin pointed 'tiger' teeth				
		<i>L</i> at point	<i>W</i> at point	Hole dia.	<i>L</i> at point	<i>W</i> at point	Hole dia		
							Pen. tooth	Single point of T tooth	Tiger tooth
5	70	51	4	55	6	5	40	15	55
10	70	56	14	60	8	7	45	20	60
15	85	63	13	65	11	9	55	20	70
20	95	76	13	75	13	10	60	25	80
25	100	89	18	85	11	17	65	25	85
30	110	102	21	95	12	20	70	30	95
35	125	121	23	110	14	22	80	30	110
40	135	127	24	115	16	25	90	35	120
55	145	143	30	125	17	25	90	35	125



Tabella 2 – dimensioni dei denti e del foro associato

La tabella 2 indica l'esistenza di una relazione monotona tra il peso dell'escavatore e la sezione del foro che può eventualmente essere generato. Il grafico sottostante riporta la relazione tra peso dell'escavatore e diametro del foro effettuato dai denti

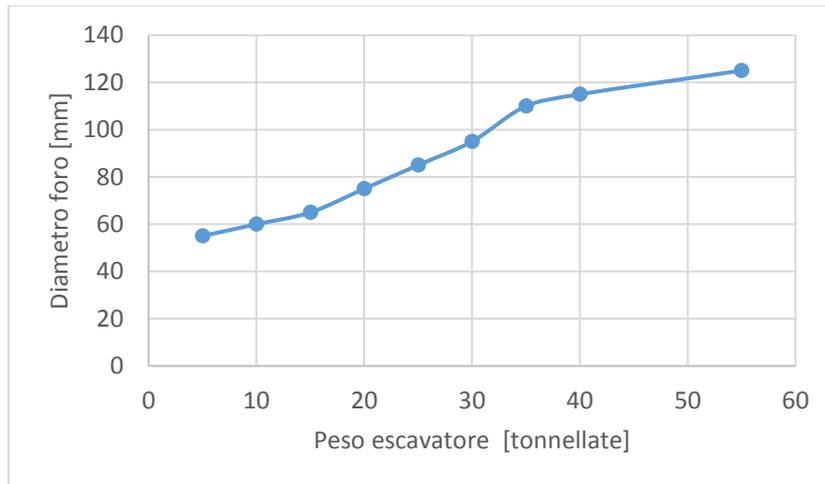


Figura 1 – diametro massimo del foro in funzione del peso dell'escavatore

La procedura per valutare se un determinato escavatore è in grado di praticare un foro di una determinata sezione in una determinata tubazione è quindi la seguente:

- Individuare la massa dell'escavatore
- Individuare in tabella 2 la massima sezione del foro praticabile da quella tipologia di escavatore
- Valutare se la massima sezione individuata è superiore (o prossima) a quella di interesse. In caso di risposta negativa la procedura termina, giungendo alla conclusione che l'escavatore considerato non è in grado di praticare il foro della sezione considerata. In caso contrario si prosegue con i punti successivi
- Individuare lunghezza e larghezza del dente, nel caso "general purpose" e in quello "twin pointed tiger teeth"
- Individuare lo spessore del tubo per il quale si vuole effettuare la verifica
- Individuare la tensione di rottura del materiale della tubazione soggetta a verifica
- Calcolare la forza R_p secondo l'espressione 1, per entrambe le tipologie di dente
- Calcolare la forza massima F applicabile dall'escavatore secondo l'espressione 2
- Selezionare in tabella 1 il coefficiente correttivo B appropriato
- Calcolare il rapporto $\frac{R_p}{B \cdot F}$, che esprime il coefficiente di sicurezza rispetto alla possibilità che l'escavatore considerato provochi un foro della sezione indicata in tabella 2 nella tubazione soggetta a verifica



Applicazione a tubazioni per impianti ad alta pressione

In questo paragrafo si procede all'applicazione della metodologia di calcolo riassunta nel punto precedente al caso di tubazioni utilizzate in impianti ad alta pressione e temperatura, come avviene ad esempio nelle centrali di stoccaggio del gas. I calcoli sono effettuati facendo riferimento a materiali tipicamente utilizzati in questi impianti (ASTM A333/6 grade 6 per tubazioni da 8", API 5L/X65 per tubazioni da 24") in condizioni nominali. La tabella riporta le condizioni considerate

ND	Pressione di progetto bar	T operativa °C	Diametro esterno mm	Spessore mm	Tensione di snervamento MPa	Tensione di rottura MPa
8"	295	171	219.1	28.1	240	415
24"	295	171	609.6	54.5	450	535

Tabella 3 – proprietà dei materiali e condizioni operative

In considerazione della temperatura relativamente elevata (171 °C) è opportuno considerare una riduzione delle tensioni di snervamento e di rottura da determinarsi in base a quanto previsto dalla norma DNV-OS-F101 al paragrafo C300, figura 2, riportata di seguito

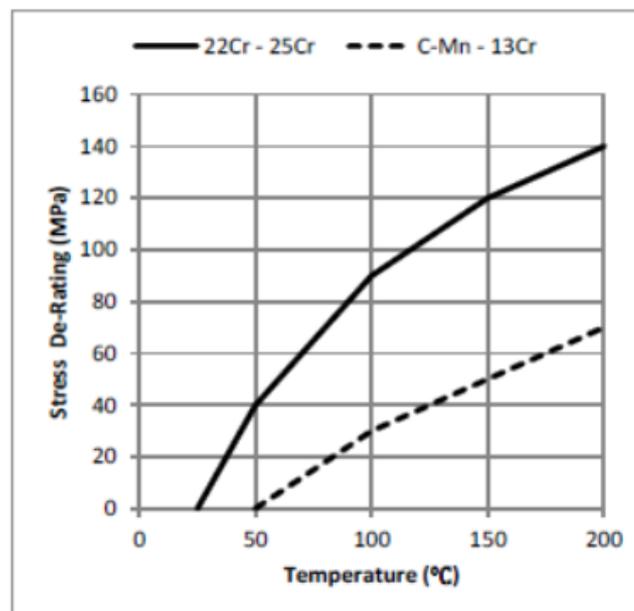


Figura 2 - Riduzione della tensione di rottura in funzione della temperatura (DNV-OS-F101)

I materiali considerati contengono carbonio, manganese e cromo e quindi è opportuno riferirsi alla linea tratteggiata. Alla temperatura di 171°C le tensioni di snervamento e rottura da considerarsi deve quindi essere ridotta di 60 MPa rispetto al valore nominale. I valori da considerarsi sono quindi:



Materiale	Diametro tubazione [inches]	Tensione di snervamento a temperatura ambiente [MPa]	Tensione di snervamento a 171 °C [MPa]	Tensione di rottura a temperatura ambiente [MPa]	Tensione di rottura a 171 °C [MPa]
ASTM A333/6 grade 6	8	240	180	415	355
API 5L/X65	24	450	390	535	475

Tabella 4 – proprietà dei materiali in condizioni operative

Nel seguito si procede a verificare se e in quali condizioni azioni meccaniche possano causare la rottura della tubazione ovvero fori di diametro di 4" (circa 100 mm). La verifica è effettuata considerando l'ipotesi di un'azione di danno effettuata da un escavatore e valutata secondo la *AS 2885.1-2012 – Pipelines – Gas and liquid petroleum*. Si considerano le tubazioni da 8" e 24" descritte in tabella 4.

Innanzitutto dalla tabella 2 si osserva che solamente escavatori di massa superiore a 30 tonnellate utilizzano denti di dimensioni tale da poter effettuare fori della dimensione considerata. In particolare gli escavatori di massa pari a 30 tonnellate utilizzano denti che possono effettuare fori con sezione di 95 mm, ragionevolmente prossimi ai 100 mm considerati per il calcolo. In considerazione dei dati disponibili in tabella 2 si analizza l'ipotesi che il danno sia causato da escavatori con massa di 30, 35, 40 e 55 tonnellate.

La forza massima F che tali escavatori possono applicare su un dente e calcolabile attraverso l'espressione 2 e deve essere corretta moltiplicandola per il fattore B determinato in base alle indicazioni della tabella 1. In considerazione del fatto che le tubazioni per le quali si effettua il calcolo in caso di rottura potrebbero dare origine a eventi con conseguenze elevate si assume cautelativamente il valore massimo indicato di 1.3 per il coefficiente B .

Le forze massime applicabili dagli escavatori sono quindi espresse in tabella 5

Massa escavatore [tonn]	30	35	40	55
Forza massima F [kN]	189	213,5	236	291,5
Forza massima corretta $B \cdot F$ [kN]	246	278	307	379

Tabella 5 –forze massime applicabili dagli escavatori

Le tabelle successive riportano i valori di resistenza alla penetrazione calcolati per le tubazioni da 8" e 24", ponendoli a confronto con i valori di forza massima applicabili dagli escavatori. Per completezza si è esteso il calcolo a tutte le taglie di escavatori indicati in tabella 2, valutando il coefficiente di sicurezza rispetto alla possibilità che uno di essi provochi un foro passante nella tubazione



General Purpose Teeth							
Massa escavatore Wop [tonnellate]	Lunghezza dente L [mm]	Larghezza dente W [mm]	Resistenza perforazione Rp [kN]	Resistenza perforazione A 171 °C Rp(171) [kN]	Forza max escavatore F [kN]	Rp/F	Rp(171)/F
5,0	51,0	4,0	667,3	618,8	47,5	14,1	13,0
10,0	56,0	14,0	1039,2	963,6	92,3	11,3	10,4
15,0	63,0	13,0	1116,2	1035,1	134,6	8,3	7,7
20,0	76,0	13,0	1286,2	1192,6	174,2	7,4	6,8
25,0	89,0	18,0	1539,3	1427,3	211,3	7,3	6,8
30,0	102,0	21,0	1756,1	1628,4	245,7	7,1	6,6
35,0	121,0	23,0	2047,5	1898,6	277,6	7,4	6,8
40,0	127,0	24,0	2143,9	1988,0	306,8	7,0	6,5
55,0	143,0	30,0	2429,8	2253,0	359,3	6,8	6,3

Tabella 6 – analisi dell'ipotesi che un escavatore equipaggiato con denti "general purpose" possa effettuare un foro passante in una tubazione da 8"

Single Point penetration tooth and twin pointed tiger teeth							
Massa escavatore Wop [tonnellate]	Lunghezza dente L [mm]	Larghezza dente W [mm]	Resistenza perforazione Rp [kN]	Resistenza perforazione a 171 °C Rp(171) [kN]	Forza max escavatore F [kN]	Rp/F	Rp(171)/F
5,0	6,0	5,0	283,1	262,5	47,5	6,0	5,5
10,0	8,0	7,0	340,6	315,8	92,3	3,7	3,4
15,0	11,0	9,0	401,8	372,6	134,6	3,0	2,8
20,0	13,0	10,0	437,2	405,4	174,2	2,5	2,3
25,0	11,0	17,0	457,5	424,2	211,3	2,2	2,0
30,0	12,0	20,0	482,5	447,4	245,7	2,0	1,8
35,0	14,0	22,0	516,9	479,3	277,6	1,9	1,7
40,0	16,0	25,0	553,6	513,3	306,8	1,8	1,7
55,0	17,0	25,0	568,0	526,7	379,0	1,5	1,4

Tabella 7 – analisi dell'ipotesi che un escavatore equipaggiato con denti per penetrazione o "tiger" possa effettuare un foro passante in una tubazione da 8"



General Purpose Teeth							
Massa escavatore Wop [tonnellate]	Lunghezza dente L [mm]	Larghezza dente W [mm]	Resistenza perforazione Rp [kN]	Resistenza perforazione a 171 °C Rp(171) [kN]	Forza max escavatore F [kN]	Rp/F	Rp(171)/F
5,0	51,0	4,0	1482,5	1388,3	47,5	31,2	29,3
10,0	56,0	14,0	2308,7	2162,1	92,3	25,0	23,4
15,0	63,0	13,0	2479,8	2322,4	134,6	18,4	17,3
20,0	76,0	13,0	2857,3	2675,9	174,2	16,4	15,4
25,0	89,0	18,0	3419,6	3202,5	211,3	16,2	15,2
30,0	102,0	21,0	3901,5	3653,8	245,7	15,9	14,9
35,0	121,0	23,0	4548,8	4260,0	277,6	16,4	15,3
40,0	127,0	24,0	4763,0	4460,6	306,8	15,5	14,5
55,0	143,0	30,0	5398,0	5055,2	379,0	14,2	13,3

Tabella 8 – analisi dell'ipotesi che un escavatore equipaggiato con denti "general purpose" possa effettuare un foro passante in una tubazione da 24"

Single Point penetration tooth and twin pointed tiger teeth							
Massa escavatore Wop [tonnellate]	Lunghezza dente L [mm]	Larghezza dente W [mm]	Resistenza perforazione Rp [kN]	Resistenza perforazione a 171 °C Rp(171) [kN]	Forza max escavatore F [kN]	Rp/F	Rp(171)/F
5,0	6,0	5,0	628,9	589,0	47,5	13,3	12,4
10,0	8,0	7,0	756,6	708,6	92,3	8,2	7,7
15,0	11,0	9,0	892,7	836,0	134,6	6,6	6,2
20,0	13,0	10,0	971,3	909,6	174,2	5,6	5,2
25,0	11,0	17,0	1016,4	951,9	211,3	4,8	4,5
30,0	12,0	20,0	1071,9	1003,8	245,7	4,4	4,1
35,0	14,0	22,0	1148,4	1075,5	277,6	4,1	3,9
40,0	16,0	25,0	1229,9	1151,8	306,8	4,0	3,8
55,0	17,0	25,0	1261,9	1181,8	379,0	3,3	3,1

Tabella 9 – analisi dell'ipotesi che un escavatore equipaggiato con denti per penetrazione o "tiger" possa effettuare un foro passante in una tubazione da 24"



Analisi dei risultati e conclusioni

Le metodologie di calcolo indicate dalla norma tecnica considerata permette di valutare se la modalità di rottura ipotizzata abbia o meno possibilità di verificarsi. I risultati dei calcoli portano alle conclusioni riassunte qui di seguito, suddivise per sezione delle tubazione

Tubazione da 8"

Grandi escavatori, con massa uguale o superiore a 30 tonnellate, equipaggiati con denti per perforazione o del tipo "tiger", presentano un coefficiente di sicurezza prossimo a 2 nel caso in cui si consideri l'ipotesi che operino per praticare un foro nella tubazione di 8". Occorre peraltro considerare che il calcolo è effettuato nell'ipotesi che il conducente del mezzo applichi volontariamente il massimo della forza possibile e che l'escavatore sia equipaggiato con denti specifici per la perforazione. Considerando che l'analisi è stata effettuata considerando tubazioni ad altissima pressione utilizzate in impianti confinati e controllati e che è interdetto l'utilizzo di benne con denti in prossimità di tubazioni gas, l'ipotesi che possa verificarsi questa tipologia di evento non appare credibile. Si consideri inoltre che escavatori di grandi dimensioni sono tipicamente utilizzati solamente nel caso in cui siano eseguiti lavori di costruzione impianti o grandi manutenzioni, nel corso delle quali le tubazioni sono messe in sicurezza e quindi non sono in pressione.

Tubazione da 24"

Il coefficiente di sicurezza nell'ipotesi che un grande escavatore equipaggiato con denti per perforazione cerchi di praticare un foro nella tubazione è pari, nel caso più critico, a 3. Valgono peraltro le medesime considerazioni svolte per l'analisi dell'analogo scenario per la tubazione da 8", e quindi l'ipotesi che un escavatore possa incidentalmente perforare la tubazione da 24" non appare credibile.