



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Meccanica
e Aerospaziale
Prof. Stefano Mauro

**Analisi del piping della centrale di stoccaggio Stogit di
Sergnano al fine della valutazione della resistenza alla
perforazione da parte di un escavatore**

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

Prof. Stefano Mauro

Torino,
19/11/2020



Indice

Indice	2
Introduzione	2
Metodologia per il calcolo della forza da applicarsi da parte di un escavatore per provocare un foro in una tubazione .	2
Applicazione alle tubazioni della centrale di Sergnano	5
Valutazione del margine di sicurezza rispetto all'ipotesi di rottura	9
Analisi dei risultati e conclusioni.....	12

Introduzione

In una precedente nota del 12/9/2018 (All. 1) si sono analizzate le condizioni che possono portare alla rottura di una tubazione contenente gas in alta pressione a causa dell'azione meccanica esterna del dente di un escavatore. L'analisi è stata condotta in base alle prescrizioni della norma australiana *AS 2885.1-2012 – Pipelines – Gas and liquid petroleum* che indica una metodologia di calcolo puntuale per la stima della forza che deve applicare un escavatore per provocare la rottura delle tubazioni.

La metodologia di calcolo prevista dalla norma considera la taglia dell'escavatore e la tipologia della benna, distinguendo tra denti per uso generale ("general purpose") e denti per demolizioni ("tiger tooth"), e fornisce indicazioni per correlare la forza massima applicabile da un escavatore con la sua taglia.

In questa nota si applica la procedura prevista dalla norma a tutte le tipologie di tubazioni per il trasporto di gas presenti all'interno della centrale di stoccaggio Stogit di Sergnano per le quali nell'analisi di rischio non si considera l'ipotesi di rottura full bore, ossia con diametro di 8" o superiore. Lo scopo dell'analisi è valutare se le prescrizioni previste per l'esecuzione di lavori di scavo siano sufficienti ad assicurare che le operazioni siano svolte in sicurezza e non sussista il rischio di rottura delle tubazioni per perforazione.

Metodologia per il calcolo della forza da applicarsi da parte di un escavatore per provocare un foro 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

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

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

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

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	B
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 può provocare.

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				
		L at point	W at point	Hole dia.	L at point	W 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

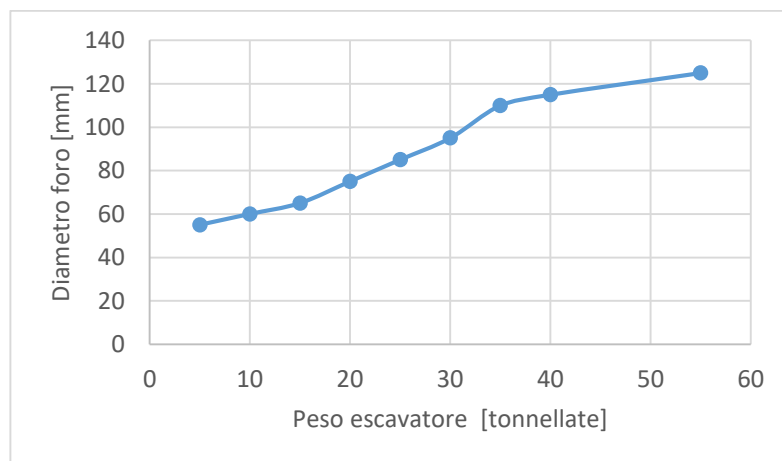


Figura 1 – diametro massimo del foro in funzione del peso dell'escavatore



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 $\frac{R_P}{B*F}$, 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 alle tubazioni della centrale di Sergnano

La tabella 3 riporta le tipologie di tubazione per il trasporto gas con diametro 8" o superiore presenti nella centrale di Sergnano. per ciascuna sezione è indicato il materiale, il rating, la classe tubazioni, il tipo di costruzione delle tubazioni, la pressione e il range di temperature di progetto, il diametro nominale, la tensione massima nominale a rottura del materiale e lo spessore del tubo. Si noti che la tensione a rottura effettiva è sempre maggiore rispetto a quella nominale, ed è indicata nella documentazione di accompagnamento del singolo lotto di tubi.

Le prescrizioni operative di Stogit per l'esecuzione di scavi prevedono che *"per le attività di scavo su parti di tubazioni in esercizio devono essere utilizzati mezzi di peso non superiore a 35 tonnellate con benna piatta. Lo scavo con benna è possibile fino a 50 cm dalla generatrice superiore e ad una distanza laterale di 50 cm dalla condotta, successivamente gli scavi devono essere eseguiti a mano. L'operatore della ditta appaltatrice, durante le fasi di scavo è sempre assistito da un operatore ausiliario a terra che monitora l'avanzamento dello scavo"*.

Si è quindi analizzata la possibilità che l'azione di un escavatore con massa di 35 tonnellate apra in una condotta un foro di diametro 110 mm, considerando conservativamente l'ipotesi che la benna sia equipaggiata con denti di tipo general purpose, anziché essere piatta come previsto dalle procedure.



Tabella 3 – consistenza delle rete interna alla Centrale di Sergnano

Caso n°	Rating	Piping Class	Materiale	Tipo (SMLS/SAW)	P _{design}	T _{design} [°C]		DN	σ _{rott}	Spessore
						[bar]	MIN			
1	600	15Z	API 5L Gr. X60	SAW	76	-29	50	36	520	16,80
2	900	16Z	API 5L Gr. X65	SAW	153	-29	50	26	535	22,2
3	900	16Z	API 5L Gr. X60	SAW	153	-29	50	24	520	22,2
4	900	D01	API 5L Gr. B	SMLS	147,6	-29	50	24	415	38,1
5	600	15C / 15Z	API 5L Gr. X60	SAW	76	-29	50	24	520	11,90
6	600	C01	API 5L Gr. B	SMLS	98,5	-29	50	24	415	26,97
7	600	C01	API 5L Gr. B	SMLS	102,1	-10	38	24	415	26,97
8	900	16Z	API 5L Gr. X60	SAW	153	-29	50	20	520	19,10
9	900	16C	API 5L Gr. X52	SMLS	153	-29	50	10	460	15,10
10	900	16C / 16Z	API 5L Gr. X60	SAW	153	-29	50	20	520	19,10



Caso n°	Rating	Piping Class	Materiale	Tipo (SMLS/SAW)	P _{design}	T _{design} [°C]		DN	σ _{rott}	Spessore
						[bar]	MIN			
11	1500	17Z	API 5L Gr. X60	SAW	153	-29	130	20	520	19,10
12	900	D01	API 5L Gr. B	SMLS	150,3	-29	50	18	415	29,36
13	900	D01	API 5L Gr. B	SMLS	150,3	-29	50	18	415	29,36
14	900	D01	API 5L Gr. B	SMLS	147,6	-29	50	18	415	29,36
15	600	C02	API 5L Gr. B	SMLS	85	-29	50	12	415	12,70
16	900	16B	API 5L Gr. X52	SMLS	153	-29	50	12	460	14,30
17	900	D01	API 5L Gr. B	SMLS	147,6	-29	50	12	415	20,62
18	1500	17B / 17V	API 5L Gr. X52	SMLS	153	-29	130	12	460	14,30
19	1500	17B / 17V	API 5L Gr. X52	SMLS	153	-29	130	8	460	12,70
20	1500	E03	API 5L Gr. B	SMLS	150	-10	120	8	415	20,62
21	1500	17C	API 5L Gr. X52	SMLS	153	-29	130	8	460	12,70
22	1500	17Z	API 5L Gr. X52	SMLS	153	-29	130	16	460	17,50
23	600	C01	API 5L Gr. B	SMLS	98,5	-29	50	8	415	10,31



Caso n°	Rating	Piping Class	Materiale	Tipo (SMLS/SAW)	P _{design}	T _{design} [°C]		DN	σ _{rott}	Spessore
						[bar]	MIN			
24	1500	17C	API 5L Gr. X52	SMLS	153	-29	130	10	460	15,10
25	600	C01	API 5L Gr. B	SMLS	102,1	-10	38	20	415	23,83



Valutazione del margine di sicurezza rispetto all'ipotesi di rottura

Ai fini della valutazione del margine di sicurezza rispetto all'ipotesi di rottura si è calcolato per ogni tratto descritto in tabella 3 il rapporto $\frac{R_p}{B * F}$ tra la forza necessaria a provocare la perforazione del tubo e la forza massima applicabile dall'escavatore.

L'analisi è stata condotta considerando l'escavatore di taglia massima ammesso ad operare in centrale, pari a 35 tonnellate. Successivamente è stato verificato il margine di sicurezza anche nell'ipotesi che, contrariamente a quanto prescritto, operi in centrale un escavatore con taglia di 55 tonnellate.

In entrambi i casi l'analisi è stata svolta considerando l'utilizzo di una benna con denti general purpose, ponendosi quindi in una condizione fortemente peggiorativa rispetto alle prescrizioni di normativa che permettono solo l'utilizzo di benne senza denti.

Il calcolo è poi condotto considerando le tubazioni a temperatura ambiente, intesa come non superiore a 50 °C, e alla temperatura di 170 °C, superiore del 30% rispetto alla temperatura massima di progetto di alcune tubazioni. A questa temperatura la norma DNV-OS-F101 al paragrafo C300 indica di considerare una riduzione di 60 MPa della tensione a rottura degli acciai contenenti cromo e manganese come quelli utilizzati per la costruzione della centrale.

La tabella 4 riporta i dati associati alle tipologie di escavatore e di dente considerati

Massa escavatore	Dente general purpose		Dente "tiger tooth"		Diametro foro	Forza massima sviluppata
	Lunghezza	Larghezza	Lunghezza	Larghezza		
[tons]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]
35	121	23	14	22	110	270
55	143	30	17	25	125	359

Tabella 4 – dati relativi agli escavatori, norma AS 2885.1-2012

I risultati delle analisi sono riportati nelle tabelle da 5 e 6 che seguono. I dati mostrano che in nessun caso la forza massima esercitabile dall'escavatore è superiore a quella di perforazione.



Caso n°	Spessore	σ_{rott} T<50°C	σ_{rot} T=170 °C	Resistenza alla perforazione T< 50°C	Resistenza alla perforazione T= 170°C	Rp/F T < 50 °C	Rp/F T = 170 °C
	[mm]	[Mpa]	[Mpa]	[kN]	[kN]		
1	16,8	520	460	1380	1291	5,1	4,8
2	22,2	535	475	1853	1735	6,9	6,4
3	22,2	520	460	1823	1706	6,8	6,3
4	38,1	415	355	2776	2574	10,3	9,5
5	11,9	520	460	977	914	3,6	3,4
6	26,97	415	355	1965	1822	7,3	6,8
7	26,97	415	355	1965	1822	7,3	6,8
8	19,1	520	460	1569	1468	5,8	5,4
9	15,1	460	400	1160	1080	4,3	4,0
10	19,1	520	460	1569	1468	5,8	5,4
11	19,1	520	460	1569	1468	5,8	5,4
12	29,36	415	355	2139	1984	7,9	7,4
13	29,36	415	355	2139	1984	7,9	7,4
14	29,36	415	355	2139	1984	7,9	7,4
15	12,7	415	355	925	858	3,4	3,2
16	14,3	460	400	1099	1023	4,1	3,8
17	20,62	415	355	1502	1393	5,6	5,2
18	14,3	460	400	1099	1023	4,1	3,8
19	12,7	460	400	976	909	3,6	3,4
20	20,62	415	355	1502	1393	5,6	5,2
21	12,7	460	400	976	909	3,6	3,4
22	17,5	460	400	1345	1252	5,0	4,6
23	10,31	415	355	751	697	2,8	2,6
24	15,1	460	400	1160	1080	4,3	4,0
25	23,83	415	355	1736	1610	6,4	6,0

Tabella 5 – analisi con escavatore massa 35 tonnellate,



Caso n°	Spessore [mm]	σ_{rott} T<50°C	σ_{rot} T=170 °C	Resistenza alla perforazione T< 50°C	Resistenza alla perforazione T= 170°C	Rp/F T < 50 °C	Rp/F T = 170 °C
		[Mpa]	[Mpa]	[kN]	[kN]		
1	16,8	520	460	1638	1532	4,6	4,3
2	22,2	535	475	2199	2059	6,1	5,7
3	22,2	520	460	2164	2024	6,0	5,6
4	38,1	415	355	3294	3055	9,2	8,5
5	11,9	520	460	1160	1085	3,2	3,0
6	26,97	415	355	2332	2162	6,5	6,0
7	26,97	415	355	2332	2162	6,5	6,0
8	19,1	520	460	1862	1742	5,2	4,8
9	15,1	460	400	1377	1282	3,8	3,6
10	19,1	520	460	1862	1742	5,2	4,8
11	19,1	520	460	1862	1742	5,2	4,8
12	29,36	415	355	2539	2354	7,1	6,6
13	29,36	415	355	2539	2354	7,1	6,6
14	29,36	415	355	2539	2354	7,1	6,6
15	12,7	415	355	1098	1018	3,1	2,8
16	14,3	460	400	1304	1214	3,6	3,4
17	20,62	415	355	1783	1653	5,0	4,6
18	14,3	460	400	1304	1214	3,6	3,4
19	12,7	460	400	1158	1078	3,2	3,0
20	20,62	415	355	1783	1653	5,0	4,6
21	12,7	460	400	1158	1078	3,2	3,0
22	17,5	460	400	1596	1486	4,4	4,1
23	10,31	415	355	891	827	2,5	2,3
24	15,1	460	400	1377	1282	3,8	3,6
25	23,83	415	355	2061	1911	5,7	5,3

Tabella 6 – analisi con escavatore massa 55 tonnellate,



Analisi dei risultati e conclusioni

La metodologia applicata permette di verificare se le prescrizioni poste da Stogit per l'esecuzione di lavori di scavo siano idonee a garantire l'integrità delle tubazioni a fronte dell'azione meccanica esterna applicata incidentalmente da un escavatore.

La tabella 5 riporta i risultati riferiti al caso in cui un escavatore della massa massima ammessa in centrale di 35 tonnellate equipaggiato con una benna dentata eserciti la massima forza sviluppabile sulla tubazione. In questa condizione il coefficiente di sicurezza minimo calcolato è pari a 2,6, e permette quindi di concludere che non possa verificarsi la penetrazione del dente all'interno della tubazione.

Il valore calcolato peraltro è riferito al caso puramente teorico in cui si trovi alla temperatura di 170 °C una linea che ha temperatura massima di progetto pari a 50 °C. Il valore calcolato per la medesima tubazione per temperature fino a 50 °C è pari a 2,8.

Inoltre si consideri che le prescrizioni impongono l'utilizzo di una benna senza denti e lo scavo manuale da un'altezza di 50 cm sopra la generatrice del tubo: ne consegue che le condizioni di calcolo considerate si riferiscono a uno scenario molto peggiorativo rispetto a quanto effettivamente ipotizzabile, portando alla conclusione che il rispetto delle prescrizioni imposte da Stogit garantisce la non credibilità di un evento di rottura della tubazione a seguito dell'azione meccanica di un escavatore.

In particolare il rispetto delle prescrizioni impedisce di applicare forze rilevanti alla tubazione, ma qualora per errore ciò avvenisse il limite imposto alla massa massima dell'escavatore (35 tonnellate) e il divieto di utilizzo di benne dentate impedisce che la forza applicata, qualunque essa sia in relazione ai limiti dell'escavatore, possa provocare la penetrazione del dente e la conseguente rottura del tubo.

I risultati riassunti nella tabella da 6 si riferiscono a scenari che si allontanano ulteriormente dalle prescrizioni, ipotizzando l'uso di escavatori con massa di 55 tonnellate, quindi molto maggiore rispetto al limite ammesso.

Sotto questa ipotesi si individua un coefficiente di sicurezza minimo di 2,3.

Tale coefficiente si riferisce peraltro all'ipotesi di applicare la forza massima dell'escavatore nel tentativo deliberato di provocare la perforazione della tubazione, e il risultato trovato conferma che anche in questo caso l'ipotesi di rottura della tubazione non sarebbe credibile alla luce dei limiti fisici e delle prescrizioni operative, ed evidenzia che la prescrizione Stogit di non utilizzare escavatori con massa superiore a 35 tonnellate è ampiamente cautelativa.