

Saipem Fano, Italia

Analisi Leak vs Break Tubazioni

Doc. No. 20020-R Rev. 2 – Gennaio 2019

Rev.	2
Descrizione	Revisione
Preparato da	G. Malatesta
Controllato da	-
Approvato da	E. Mecozzi
Data	25/01/2019

Analisi Leak vs Break Tubazioni



Rev.	Descrizione	Preparato da	Controllato da	Approvato da	Data
		<i>G. Malatesta</i>		<i>E. Mecozzi</i>	
0	Prima Emissione	G. Malatesta	---	E. Mecozzi	11/07/2018
1	Revisione	G. Malatesta	---	E. Mecozzi	16/10/2018
2	Revisione	G. Malatesta	---	E. Mecozzi	21/01/2019

Tutti i diritti, traduzione inclusa, sono riservati. Nessuna parte di questo documento può essere divulgata a terzi, per scopi diversi da quelli originali, senza il permesso scritto di RINA Consulting Centro Sviluppo Materiali S.p.A.

INDICE

	Pagina
LISTA DELLE TABELLE	1
LISTA DELLE FIGURE	1
ABBREVIAZIONI E ACRONIMI	2
EXECUTIVE SUMMARY	3
1 SCOPO DEL LAVORO	6
2 ATTIVITÀ	7
2.1 SELEZIONE DEL MODELLO <i>LEAK VS BREAK</i>	8
2.1.1 Battelle NG-18	8
2.1.2 BS7910:2013 e API 579:2007	9
2.2 CALOLO <i>LEAK VS BREAK</i>	11
2.2.1 Derating causato dalla temperatura	11
2.2.2 Leak vs break per il foro da 25,4 mm	12
2.2.3 Calcolo del max leak	14
2.3 CORRELAZIONI SEMPLIFICATE PER IL CALCOLO DEL MAX LEAK	16
2.3.1 Correlazioni	16
3 CONCLUSIONI	20
4 RIFERIMENTI	22

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 2.1: Geometrie e condizioni operative da analizzare.	7
Tabella 2.2: Intervallo dati delle prove sperimentali.	9
Tabella 2.3: Leak vs break per il foro con diametro da 25,4 mm.	12
Tabella 2.4: Dimensioni max leak.	14
Tabella 2.5: Coefficienti della correlazione per le classi di tubazione analizzate.	19

LISTA DELLE FIGURE

Figura 2.1: Failure Assessment Diagram (FAD).	10
Figura 2.2: Riduzione dello snervamento del materiale in funzione della temperatura per acciai C-Mn, 13Cr, 22Cr e 25 Cr.	11
Figura 2.3: FAD per i fori con diametro 25,4 mm.	13
Figura 2.4: FAD per i fori con diametro 25,4 mm e max leak.	15
Figura 2.5: Correlazione per la classe 2500#.	17
Figura 2.6: Correlazione per la classe 1500#.	17
Figura 2.7: Correlazione per la classe 900#.	18
Figura 2.8: Correlazione per la classe 600#.	18
Figura 2.9: Correlazione per la classe 300#.	19

ABBREVIAZIONI E ACRONIMI

2c	Lunghezza leak
ϕ	Diametro foro
DN	Diametro nominale esterno tubo
FAD	Failure Assessment Diagram
OD	Diametro esterno tubo
p	Pressione interna
SMYS	Specified Minimum Yield Stress
SMUTS	Specified Minimum Ultimate Tensile Stress
t	Spessore
T	Temperatura fluido
YS_T	Snervamento alla temperatura di servizio
UTS_T	Carico massimo alla temperatura di servizio

EXECUTIVE SUMMARY

Il presente lavoro è stato effettuato per verificare l'eventualità che una rottura parziale (*leakage*) in una tubazione possa evolvere sino alla rottura completa delle tubazioni che Stogit utilizza normalmente nei propri impianti. In particolare, per tali tubazioni si è analizzato il caso di leakage equivalente ad un foro di diametro pari a 1" (25,4 mm). La scelta di tali dimensioni del foro deriva dalle API 581 – 2016 in cui le rotture casuali vengono statisticamente raggruppate nei fori da 0,5", 1" e 4".

Il caso di *leakage* pari a 4" è stato escluso a priori dallo studio in quanto associabile unicamente ad un impatto di tipo meccanico. Si è scelto quindi di considerare un foro iniziale da 1", ovvero 25,4 mm.

Le tubazioni analizzate ricoprono svariate classi (da 2500# a 300#), ovvero le normali classi operative, alle loro condizioni di progetto. Sono state inoltre analizzate due tipologie di materiali, le più comunemente usate, considerando conservativamente le loro proprietà nominali, e non quelle derivanti dai certificati di produzione, che sono generalmente più elevate. L'obiettivo finale è quello di trovare delle correlazioni di massimo leak (ossia dimensione del leak più grande che può essere sostenuto dalla tubazione, senza che possa evolvere in rottura totale della stessa), in funzione di vari parametri geometrici, metallurgici e operativi della tubazione, al fine di estendere i risultati anche ai casi non direttamente coperti dal presente studio, ma che rientrano nel metodo di calcolo definito dalle ASME B31.3 e ASME B16.5. I dati utilizzati hanno riguardato la geometria dei tubi, le condizioni operative di design e le caratteristiche nominali del materiale.

Allo scopo del lavoro, sono stati analizzati tre metodi di valutazione *leak vs break*:

- Formulazione Battelle NG-18 (come da PDAM, *Pipeline Defect Assessment Manual*): formula semiempirica per il calcolo della stabilità di un difetto (*leak o break*). Si assume un difetto tipo cricca passante in direzione parallela all'asse del tubo e sollecitato da sola pressione interna. Il modello è validato per spessori fino a 21,9 mm, e quindi non risulta adatto al presente lavoro per via delle limitazioni sullo spessore;
- BS 7910: valutazione del *leak vs break* con approccio basato sulla meccanica della frattura, assumendo un difetto tipo cricca. Non applicabile se il rapporto tra il raggio medio e lo spessore è inferiore a 5 (come in alcuni casi del presente lavoro);
- API 579: stesso approccio della BS7910, ma applicabile ad un vasto intervallo di geometrie del tubo. Copre tutti i casi di interesse nel presente lavoro.

In base a quanto sopra, è stato quindi deciso di adottare la procedura descritta nell'API 579 per la valutazione *leak vs break*.

In tale valutazione, in accordo alla norma API 579, sono state considerate le proprietà nominali dei materiali, assumendo un difetto tipo cricca passante in direzione parallela all'asse del tubo (rettilineo e senza curve) e sollecitato dalla sola pressione interna. Nessun altro tipo di carico è stato considerato nel calcolo. L'effetto della temperatura è stato introdotto riducendo le proprietà nominali del materiale stesso (snervamento e carico massimo) in funzione della temperatura di design e in accordo con la DNVGL-ST-F101 – 2017.

Per ognuno dei 27 casi indicati in tabella, sono state effettuate le seguenti valutazioni:

1. Leak o break nel caso di foro con diametro 25,4 mm;
2. Diametro del massimo leak (max leak), ossia la dimensione del leak più grande che può essere sostenuto dalla tubazione nelle sue condizioni operative.

Tutti i casi con foro con diametro 25,4 mm danno luogo a leak. Il massimo leak è compreso tra 64,1 mm (caso 1) e 124,0 mm (caso 25).

Tabella riassuntiva dei casi per la valutazione *leak vs break*.

#	Rating	Piping class	DN	Materiale	Tipo	P _{design}	T _{design}	t	φ _{25,4 mm}	φ _{max leak}
						(bar)	(°C)	(mm)	(leak/ break)	(mm)
1	2500	98F	8	ASTM A333/6	SMLS	295	171	28,1	Leak	64,1
2			12					39,9	Leak	71,7
3			16					49,2	Leak	76,4
4			20	API 5L/X65	SAW			46,1	Leak	98,6
5			24					54,5	Leak	103,4
6			30					67,0	Leak	108,7
7			32					71,1	Leak	110,1
8	1500	06E	8	ASTM A333/6	SMLS	220	171	25,4	Leak	80,0
9			12					33,3	Leak	80,7
10			20	API 5L/X65	SAW			38,1	Leak	108,7
11			24					46,0	Leak	118,4
12			32					52,6	Leak	104,4
13	900	03D	6	ASTM A333/6	SMLS	144	80	14,3	Leak	75,6
14			12					22,2	Leak	78,9
15			20	API 5L/X65	SAW			25,4	Leak	103,4
16			24					30,2	Leak	110,6
17			32					38,2	Leak	115,4
18	600	04C	8	ASTM A333/6	SMLS	95	80	12,7	Leak	81,7
19			12					15,9	Leak	79,9
20			20	API 5L/X65	SAW			19,1	Leak	112,3
21			24					22,2	Leak	118,0
22			32					27,0	Leak	117,5
23	300	B52S	8	ASTM A333/6	SMLS	48	80	8,2	Leak	92,0
24			12					10,3	Leak	93,8
25			20	ASTM A671 CC70 CL 22	SAW			16,1	Leak	124,0
26			24					17,5	Leak	119,2
27			30					19,1	Leak	109,8

A quanto sopra, si aggiunge lo sviluppo di correlazioni che permettano di collegare le caratteristiche della tubazione con il max leak che può essere sopportato dalla tubazione stessa. Tali correlazioni sono state investigate per ciascuna classe di tubazione (rating) e si applicano ai casi della tabella precedente.

Bisogna premettere che la procedura nella API 579 per il calcolo del max leak è piuttosto complessa e coinvolge molti parametri della tubazione (geometria e materiale) e operativi (temperatura, pressione). Per questa ragione non è semplice individuare un correlazione di rapido utilizzo per la valutazione del max leak. Tuttavia è possibile individuare correlazioni semplificate utili allo scopo del presente lavoro, una volta vincolati tra loro alcuni parametri in accordo a specifiche norme di progettazione (ASME B31.3 e ASME B16.5).

In particolare, per ciascuna classe di tubazione e in base ai dati nella tabella precedente, è stato possibile individuare delle correlazioni tra la dimensione del max leak e il diametro della tubazione. In queste correlazioni, il rapporto tra il diametro del max leak e il diametro del tubo, è funzione del diametro del tubo stesso.

Tali correlazioni sono polinomi di secondo grado che hanno mostrato una buona corrispondenza con i dati usati in input. L' R^2 , misura del *fitting*, varia da 0.9075 a 0.9510 conferma della bontà delle correlazioni ($R^2=1$ significa *fitting* perfetto).

È bene sottolineare che le correlazioni qui proposte sono correlazioni semplificate e sviluppate a partire dalla API 579 assumendo implicitamente la sussistenza di vincoli progettuali come specificato nella ASME B31.3 e nella ASME B16.5 tra il rapporto diametro/spessore della tubazione, la pressione e la temperatura di design, le caratteristiche del materiale.

In sintesi, dal lavoro effettuato si può concludere quanto segue:

- Valutazione *leak vs break* nel caso di foro circolare passante da 25,4 mm: in tutti i casi analizzati il difetto dà luogo a leak e non a break, cioè non evolve sino alla rottura totale della tubazione;
- Valutazione del massimo leak che può essere sopportato dalla tubatura nelle condizioni di esercizio: il max leak varia da 64,1 mm (caso 1) a 124,0 mm (caso 25);
- Sono state estrapolate le correlazioni tra dimensione del difetto e diametro della tubazione, distinguendo per classi di tubazione (rating). Per ogni classe è stata determinata una correlazione (in forma di polinomio di secondo grado) valida per quella sola classe. Le correlazioni sono relazioni semplificate sviluppate a partire dalla API 579 assumendo implicitamente la sussistenza di vincoli progettuali come specificato nella ASME B31.3 e nella ASME B16.5, che legano la determinazione dello spessore di una tubazione al suo materiale, al diametro, alla pressione e alla temperatura di design.

1 SCOPO DEL LAVORO

Il presente lavoro è stato effettuato per verificare l'eventualità che un *leakage* originatosi in una tubazione possa evolvere sino a provocare una rottura completa delle tubazioni che Stogit utilizza normalmente nei propri impianti.

E' infatti noto che un difetto passante in una tubazione in pressione, a seconda della sua estensione, della geometria della tubazione stessa e delle proprietà del materiale (acciaio) di cui è costituita la tubazione, può rimanere un leak (ovvero un foro/difetto passante) o può degenerare in un break (rottura a bocca piena della condotta). L'individuazione di questa condizione di soglia si ottiene attraverso i modelli che permettono di valutare la condizione di leak o break della condotta stessa.

Le tubazioni analizzate ricoprono svariate classi (da 2500# a 300#), ovvero le normali classi operative, alle loro condizioni di progetto e due tipologie di materiali, le più comunemente usate, considerando conservativamente le proprietà nominali, e non quelle da certificati di produzione (che sono generalmente migliori di quelle nominali).

In particolare, per tali tubazioni si è analizzato il caso con il foro iniziale di 25,4 mm, per valutare se possa evolvere o meno in rotture a bocca piena della tubazione (da leak a break).

Inoltre, è stato eseguito il calcolo del max leak che può essere sopportato nei vari casi analizzati, per verificare quale ne sia la dimensione minima in generale e se è possibile trovare correlazioni, semplificate rispetto alla procedura completa descritta nella API 579, tra il diametro del max leak e le condizioni operative della tubazione, nonché delle sue caratteristiche nominali in modo da poter estendere i risultati anche a casi non coperti dal presente studio.

2 ATTIVITÀ

Le attività principali svolte in questo lavoro sono:

1. Calcolo del leak o break nel caso di foro con diametro 25,4 mm per tutti i casi indicati in Tabella 2.1;
2. Calcolo del max leak per tutti i casi per tutti i casi indicati in Tabella 2.1;
3. Individuazione di una correlazione semplificata tra dimensioni del max leak e le caratteristiche meccaniche e operative della condotta.

Tabella 2.1: Geometrie e condizioni operative da analizzare.

#	Rating	Piping class	DN	Materiale	Tipo	SMYS	SMUTS	Resilienza	P _{design}	T _{design}	t
						(MPa)	(MPa)	(J)	(bar)	(°C)	(mm)
1	2500	98F	8	ASTM A333/6	SMLS	240	415	27	295	171	28,1
2			12								39,9
3			16								49,2
4			20	API 5L/X65	SAW	450	535	34			46,1
5			24								54,5
6			30								67,0
7			32								71,1
8	1500	06E	8	ASTM A333/6	SMLS	240	415	27	220	171	25,4
9			12								33,3
10			20	API 5L/X65	SAW	450	535	34			38,1
11			24								46,0
12			32								52,6
13	900	03D	6	ASTM A333/6	SMLS	240	415	27	144	80	14,3
14			12								22,2
15			20	API 5L/X65	SAW	450	535	34			25,4
16			24								30,2
17			32								38,2
18	600	04C	8	ASTM A333/6	SMLS	240	415	27	95	80	12,7
19			12								15,9
20			20	API 5L/X65	SAW	450	535	34			19,1
21			24								22,2
22			32								27,0
23	300	B52S	8	ASTM A333/6	SMLS	240	415	27	48	80	8,2
24			12								10,3
25			20	ASTM A671 CC70 CL 22	SAW	260	485	27			16,1
26			24								17,5
27			30								19,1

2.1 SELEZIONE DEL MODELLO LEAK VS BREAK

Per prevedere la modalità di cedimento (*leak* o *break*) di un difetto non passante con una data orientazione e condizione di carico, servono due criteri:

1. Un criterio per il cedimento del difetto non-passante (cedimento del *ligament* residuo);
2. Un criterio di cedimento per il difetto passante conseguente.

Se la tensione di cedimento di un difetto non-passante è maggiore o uguale alla tensione di cedimento di un difetto passante della stessa lunghezza, allora il difetto non-passante cederà dando luogo ad un *break*, e, al contrario, se la tensione di cedimento del difetto non-passante è minore, allora darà luogo ad un *leak*.

Di conseguenza, si usa un criterio di cedimento per il difetto passante per predire la modalità di cedimento (*leak* o *break*) di un difetto non-passante. Questo principio generale è stato dimostrato in vari test in piena scala di difetti non-passanti sottili (tipo cricca), orientati longitudinalmente, con fondo piatto e con un profilo rettangolare, soggetti alla sola pressione interna [1].

Non esistono studi di dettaglio sul *leak* o *break* di difetti di forma irregolare (come la corrosione). Tuttavia, l'evidenza sperimentale mostra che il profilo di un difetto ha delle conseguenze sulla sua modalità di cedimento; pertanto per casi di questo tipo, l'assunzione che il difetto abbia profondità pari alla profondità massima e fondo piatto è conservativa.

Per quanto sopra, nel presente lavoro i difetti analizzati nel confronto *leak vs break* non sono stati considerati come fori circolari ma sono stati assimilati ad un difetto sottile (tipo cricca) orientato longitudinalmente, che è la condizione più sfavorevole nel caso di sollecitazione da pressione interna. In altre parole, i difetti circolari con diametro 1" (25,4 mm) sono stati considerati come se fossero delle cricche passanti lunghe 1" e orientate parallelamente all'asse del tubo.

I criteri analizzati in questo lavoro sono:

1. Battelle NG-18 [1, 2, 3];
2. BS7910 [4];
3. API 579 [5].

Tutti i criteri sopracitati si rifanno ad alla stessa impostazione adottata per lo sviluppo delle equazioni Battelle NG-18. Tuttavia, mentre il primo punto si riferisce al modello stesso, il secondo e il terzo si riferiscono a norme che lo hanno adottato.

In questo caso, utilizzare una norma, come la BS7910 o la API 579, permette di analizzare i casi in Tabella 2.1 secondo una procedura standard che include fattori di sicurezza utili ad assicurare un risultato adeguatamente conservativo, facendo inoltre tesoro dell'esperienza acquisita per sviluppare la norma stessa. Pertanto l'applicazione di una norma, peraltro riconosciuta a livello internazionale, facilita notevolmente l'analisi richiesta.

I tre modelli sono brevemente illustrati nel seguito.

2.1.1 Battelle NG-18

I primi studi sul comportamento dei difetti nei tubi in acciaio sono stati intrapresi dal Battelle Memorial Institute [2, 3].

Il modello per difetti passanti deriva dall'accoppiamento dalla soluzione elastico-lineare per un difetto passante in un piastra infinita più una correzione per la plasticità dovuta alla cricca (basata sulla meccanica della frattura elasto-plastica), e con un fattore sviluppato da Folias per includere l'effetto del rigonfiamento dovuto alla pressione interna (basato sulla meccanica della frattura lineare elastica) [1], e un parametro definito come *flow stress* per tener conto dell'incrudimento del materiale.

Il criterio semi-empirico esiste sia nella forma *toughness dependent*, sia nella forma *flow stress dependent*. Senza scendere nel dettaglio delle formulazioni, è importante sapere che i due criteri hanno formulazioni diverse e il primo si applica per materiali con tenacità bassa, il secondo per materiali con tenacità alta.

Il Battelle Memorial Institute ha condotto diversi test sperimentali per mettere a punto le formulazioni [2, 3], e i risultati sono stati approfonditi nel PDAM (*Pipeline Defect Assessment Manual*) [1], valutando l'errore di previsione di diversi modelli con i dati sperimentali disponibili in letteratura, che sono riassunti in Tabella 2.2.

Tabella 2.2: Intervallo dati delle prove sperimentali.

Grandezza	Unità	Min	Max
Diametro	mm	167,6	1219,2
Spessore	mm	4,9	21,9
Diametro/spessore	---	26,4	114,8
Grado (API 5L)	---	A	100
Snervamento	MPa	220,6	735,0
Carico Massimo	MPa	337,9	908,1
Charpy 2/3	J	13,6	90,9
Lunghezza difetto	mm	25,4	508,0

Dalla Tabella 2.2 si vede come il campo di validazione sia limitato a spessori inferiori a 21,9 mm che, confrontato con quanto riportato in Tabella 2.1, non sarebbe applicabile a tutti i casi.

2.1.2 BS7910:2013 e API 579:2007

La BS7910 [4] e l'API579 [5] trattano il *leak vs break* di un difetto passante. Il modello adottato deriva dal modello NG-18 (sezione precedente), ma se ne discosta per una serie di fattori di scurezza da utilizzare nei calcoli e per limiti di applicabilità diversi.

Entrambe le norme adottano una valutazione basata sul FAD (*Failure Assessment Diagram*) in base al quale si delimita un'area di sicurezza in un grafico. Il caso analizzato è rappresentato da un punto: se il punto si trova nell'area di sicurezza, allora è accettabile e rimane *leak*, altrimenti sviluppa in un *break* (Figura 2.1).

Entrambe le norme prevedono il calcolo del *leak vs break*, e contemplano l'uso dei PSF (*Partial Safety Factor*).

All'atto pratico, significa avere a disposizione due modalità di calcolo distinte:

1. Calcolo con i valori nominali. Si utilizzano i valori nominali per le prestazioni del materiale, la lunghezza del difetto e i carichi applicati. In questo caso si assume che i valori siano conservativi e si omettono i PSF;
2. Calcolo con i valori effettivi. Si utilizzano i valori effettivi per le proprietà del materiale, la lunghezza del difetto e i carichi applicati. In questo caso tali valori (che sono la media delle misurazioni) sono corretti con i PSF per tenere conto della variabilità della misura sperimentale.

Considerati gli obiettivi del presente lavoro, i casi di Tabella 2.1 sono stati esaminati considerando le sole proprietà nominali.

Tuttavia, è necessario sottolineare che la BS7910 presenta dei limiti di applicabilità per il rapporto tra il raggio medio e lo spessore del tubo. Detto rapporto deve essere maggiore di 5, condizione che non è verificata per tutti i casi nel presente studio.

Invece la API579 non presenta limitazioni geometriche e può essere applicata a tutti i casi di Tabella 2.1.

Per quanto sopra, nei calcoli del *leak vs break*, è stata adottata la norma API579, con i risultati riportati nei prossimi capitoli.

In Figura 2.1 si riporta un esempio di FAD: sono identificate le aree leak e break. In ascissa si riporta il parametro proporzionale al carico applicato (L_{rp}), ottenuto come rapporto tra la tensione applicata e la tensione di snervamento alla temperatura operativa. In ordinata si riporta il parametro proporzionale alla tenacità (K_r), ed è espresso come rapporto tra il fattore di intensificazione degli sforzi per i carichi applicati e la tenacità del materiale alla temperatura operativa.

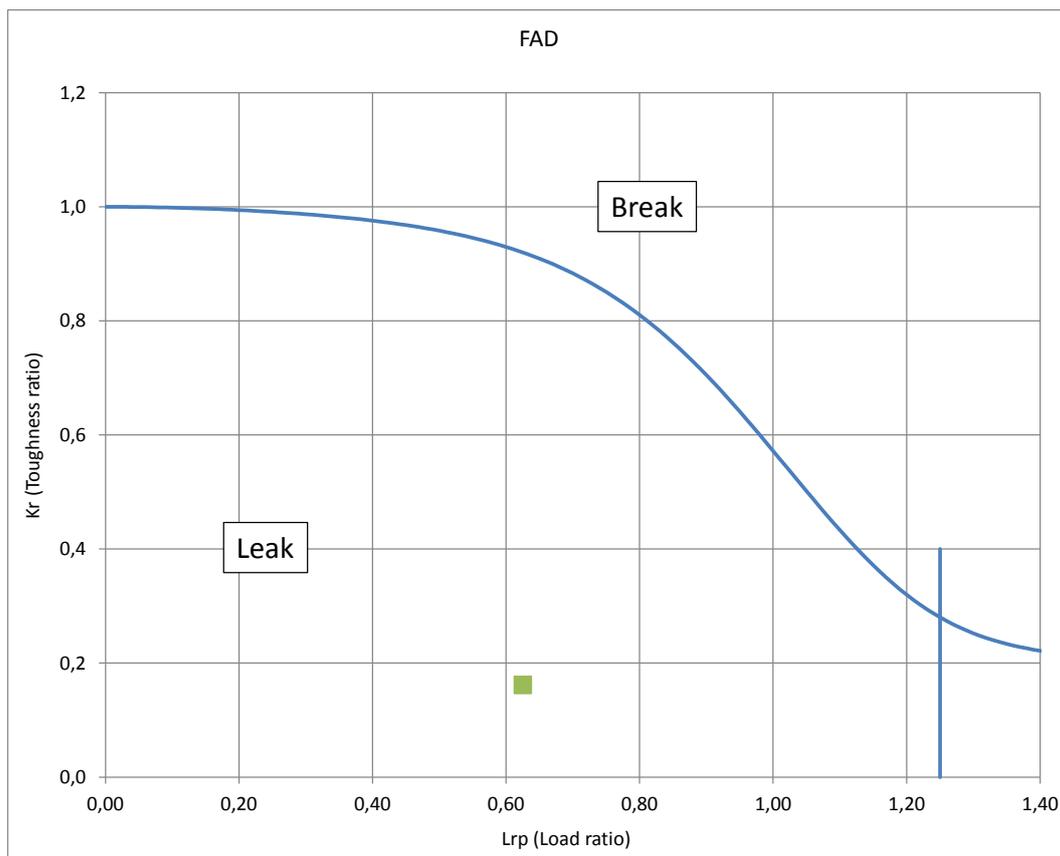


Figura 2.1: Failure Assessment Diagram (FAD).

2.2 CALOLO LEAK VS BREAK

Nel seguito si riportano i risultati ottenuti per i calcolo del *leak vs break* per tutti i casi di Tabella 2.1, sia considerando il caso del foro con diametro 25,4 mm, sia considerando il max leak che può essere sopportato dalla tubazione.

L'effetto della temperatura è stato considerato riducendo le proprietà nominali del materiale stesso (snervamento e carico massimo) in funzione della temperatura di design e in accordo con la DNVGL-ST-F101 – 2017 [6], come qui di seguito illustrato.

2.2.1 Derating causato dalla temperatura

Le caratteristiche meccaniche del materiale, in particolare snervamento e carico massimo, diminuiscono all'aumentare della temperatura, ed è necessario includere questo effetto nei calcoli mostrati nelle sezioni seguenti.

In letteratura è possibile trovare correlazioni tra la temperatura di esercizio del materiale e la riduzione di prestazioni meccaniche. In questa attività, è stata usata la correlazione proposta nella DNVGL-ST-F101 – 2017 [6], e mostrata in Figura 2.2.

Per i calcoli qui condotti, è stata utilizzata la curva più in basso, quella relativa agli acciai C-Mn.

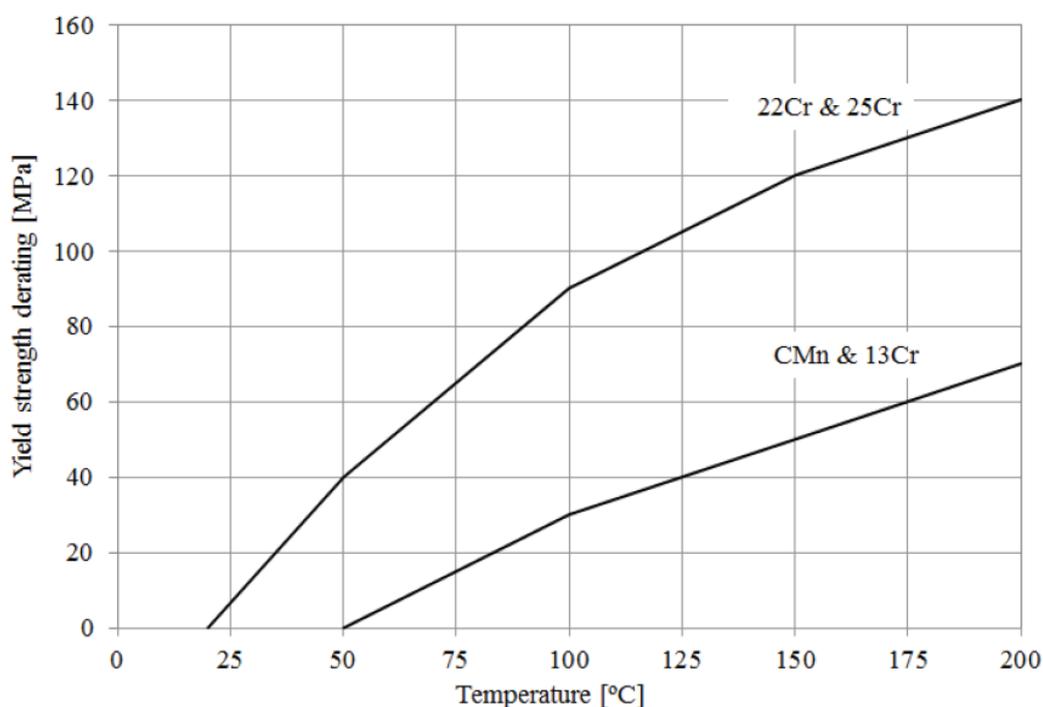


Figura 2.2: Riduzione dello snervamento del materiale in funzione della temperatura per acciai C-Mn, 13Cr, 22Cr e 25 Cr.

2.2.2 Leak vs break per il foro da 25,4 mm

I risultati delle valutazioni dei 27 casi in Tabella 2.1 con il foro da 25,4 mm sono riportati in Tabella 2.3. In tutti i casi, il foro da 25,4 mm dà luogo ad un leak.

Tabella 2.3: Leak vs break per il foro con diametro da 25,4 mm.

#	Rating	Piping class	DN	Materiale	Tipo	P	T	t	Leak vs Break
						(bar)	(°C)	(mm)	
1	2500	98F	8	ASTM A333/6	SMLS	295	171	28,1	Leak
2			12					39,9	
3			16					49,2	
4			20	API 5L/X65	SAW			46,1	
5			24					54,5	
6			30					67,0	
7			32					71,1	
8	1500	06E	8	ASTM A333/6	SMLS	220	171	25,4	
9			12	33,3					
10			20	API 5L/X65	SAW			38,1	
11			24					46,0	
12			32					52,6	
13	900	03D	6	ASTM A333/6	SMLS	144	80	14,3	
14			12	22,2					
15			20	API 5L/X65	SAW			25,4	
16			24					30,2	
17			32					38,2	
18	600	04C	8	ASTM A333/6	SMLS	95	80	12,7	
19			12	15,9					
20			20	API 5L/X65	SAW			19,1	
21			24					22,2	
22			32					27,0	
23	300	B52S	8	ASTM A333/6	SMLS	48	80	8,2	
24			12	10,3					
25			20	ASTM A671 CC70 CL 22	SAW			16,1	
26			24					17,5	
27			30					19,1	

L'effetto della temperatura è stato considerato riducendo le proprietà nominali del materiale stesso (snervamento e carico massimo) in funzione della temperatura di design e in accordo con la DNVGL-ST-F101 – 2017 [6].

Nel FAD (Failure Assessment Diagram) i punti nella Tabella 2.3 si dispongono come riportato in Figura 2.3.

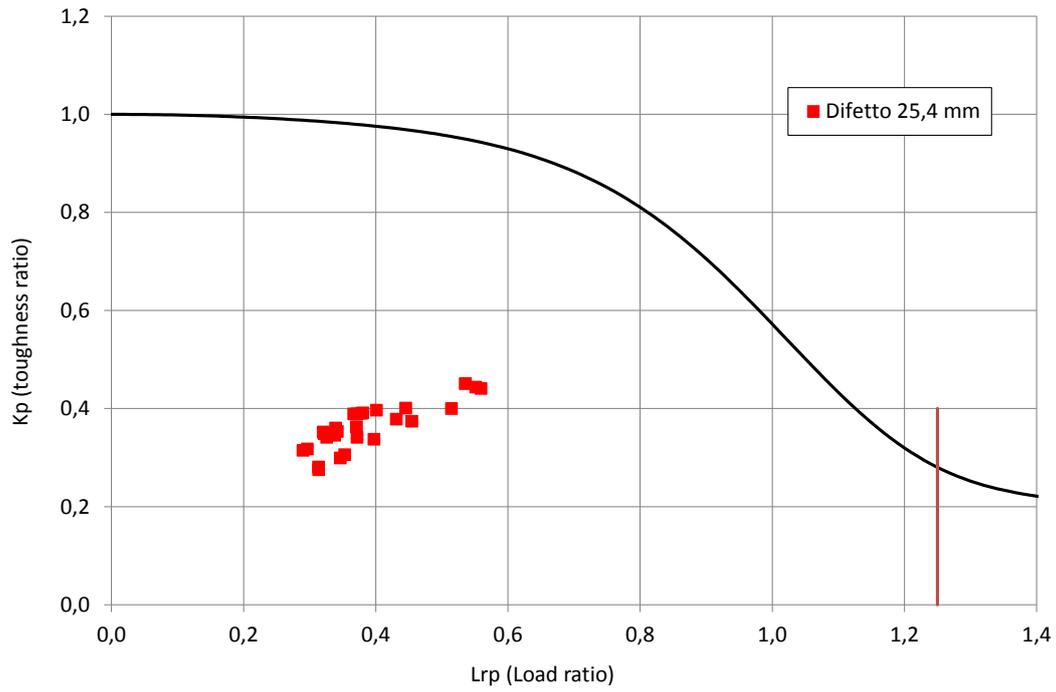


Figura 2.3: FAD per i fori con diametro 25,4 mm.

2.2.3 Calcolo del max leak

Per tutti i casi di Tabella 2.1 è stato calcolato il max leak che può essere sopportato dalla tubazione nelle condizioni operative indicate. I risultati sono mostrati in Tabella 2.4.

Tabella 2.4: Dimensioni max leak.

#	Rating	Piping class	DN	Materiale	Tipo	P	T	t	$\phi_{\max \text{ leak}}$
						(bar)	(°C)	(mm)	(mm)
1	2500	98F	8	ASTM A333/6	SMLS	295	171	28,1	64,1
2			12					39,9	71,7
3			16					49,2	76,4
4			20	API 5L/X65	SAW			46,1	98,6
5			24					54,5	103,4
6			30					67,0	108,7
7			32					71,1	110,1
8	1500	06E	8	ASTM A333/6	SMLS	220	171	25,4	80,0
9			12					33,3	80,7
10			20	API 5L/X65	SAW			38,1	108,7
11			24					46,0	118,4
12			32					52,6	104,4
13	900	03D	6	ASTM A333/6	SMLS	144	80	14,3	75,6
14			12					22,2	78,9
15			20	API 5L/X65	SAW			25,4	103,4
16			24					30,2	110,6
17			32					38,2	115,4
18	600	04C	8	ASTM A333/6	SMLS	95	80	12,7	81,7
19			12					15,9	79,9
20			20	API 5L/X65	SAW			19,1	112,3
21			24					22,2	118,0
22			32					27,0	117,5
23	300	B52S	8	ASTM A333/6	SMLS	48	80	8,2	92,0
24			12					10,3	93,8
25			20	ASTM A671 CC70 CL 22	SAW			16,1	124,0
26			24					17,5	119,2
27			30					19,1	109,8

La dimensione minima di massimo leak è 64,1 mm, ed è ottenuta per il caso 1.

L'effetto della temperatura è stato considerato riducendo le proprietà nominali del materiale stesso (snervamento e carico massimo) in funzione della temperatura di design e in accordo con la DNVGL-ST-F101 – 2017 [6].

Nel FAD (Failure Assessment Diagram) i punti nella Tabella 2.4 si dispongono come riportato in Figura 2.4.

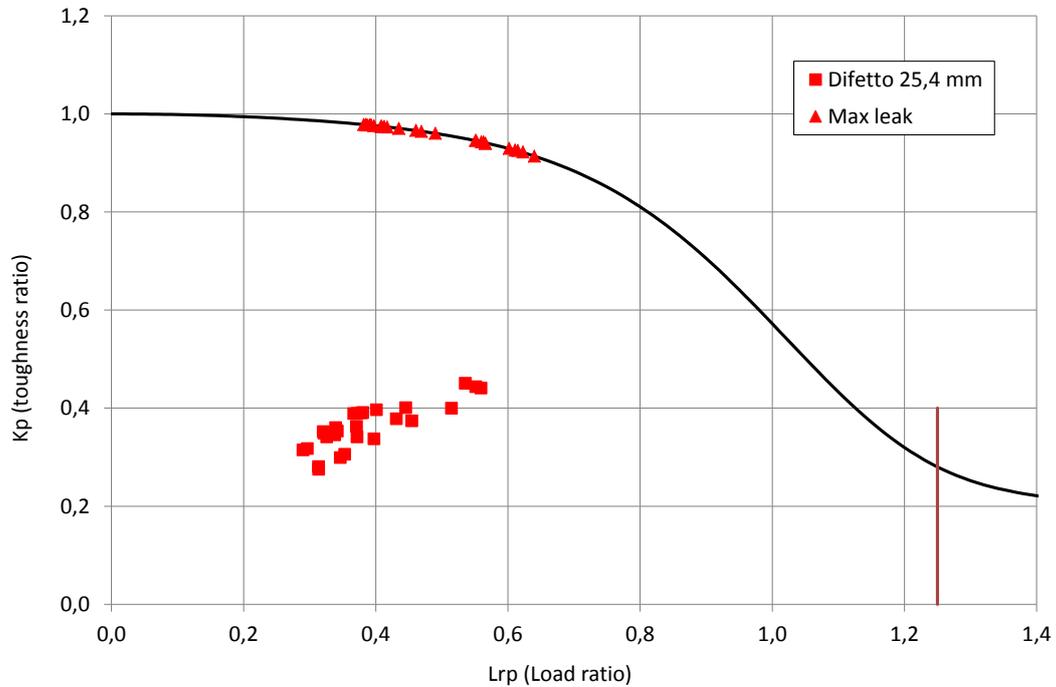


Figura 2.4: FAD per i fori con diametro 25,4 mm e max leak.

2.3 CORRELAZIONI SEMPLIFICATE PER IL CALCOLO DEL MAX LEAK

La procedura per il calcolo del max leak, così come riportata nella API 579 [5], è piuttosto complessa e include molti parametri della tubazione (geometria e materiale) e operativi (temperatura, pressione). Per questa ragione non è facile individuare un correlazione di rapido utilizzo per la valutazione del max leak.

Tuttavia è possibile individuare correlazioni semplificate utili allo scopo del presente lavoro, una volta vincolati tra loro alcuni parametri in accordo a specifiche norme di progettazione (ANSI/ASME B31.3 e ANSI/ASME B16.5). In particolare, per ciascuna classe di tubazione e in base ai dati in Tabella 2.4, è stato possibile individuare delle correlazioni tra la dimensione del max leak e il diametro della tubazione.

È bene sottolineare che tali correlazioni sono semplificazioni sviluppate a partire dalla API 579 assumendo implicitamente la sussistenza di vincoli progettuali come specificato nella ANSI/ASME B31.3 e nella ANSI/ASME B16.5 tra il rapporto diametro/spessore della tubazione, la massima pressione applicabile, la temperatura di lavoro e le caratteristiche del materiale. Pertanto le correlazioni trovate si applicano laddove sono verificate le condizioni appena citate.

L'espressione della correlazione trovata è la stessa per ogni classe di tubazione, ed ha la forma di un'equazione di secondo grado, che lega la dimensione del max leak al diametro della tubazione, come segue:

$$\frac{\phi_{max\ leak}}{OD} = \alpha OD^2 + \beta OD + \gamma \quad \text{Eq. 2-1}$$

Dove:

- $\phi_{max\ leak}$: diametro max leak (mm);
- OD : diametro esterno del tubo (mm).

Si tratta di un polinomio di secondo grado che correla il rapporto $\phi_{max\ leak}/OD$ con OD stesso.

I parametri α , β e γ sono i parametri di fitting dell'equazione e sono diversi per ogni classe di tubazione, ricavati per ottenere la miglior sovrapposizione tra dati (Tabella 2.4) e funzione (Eq. 2-1).

2.3.1 Correlazioni

Per ogni classe di tubazione (2500#, 1500#, 900#, 600#, 300#), è stata calcolata una correlazione tra il diametro del max leak, espresso come rapporto $\phi_{max\ leak}/OD$ (diametro max leak / diametro tubazione), e il diametro della tubazione (OD).

Tutte le correlazioni trovate sono del tipo polinomiale di secondo grado, e riportate nelle figure che seguono (da Figura 2.5 a Figura 2.9).

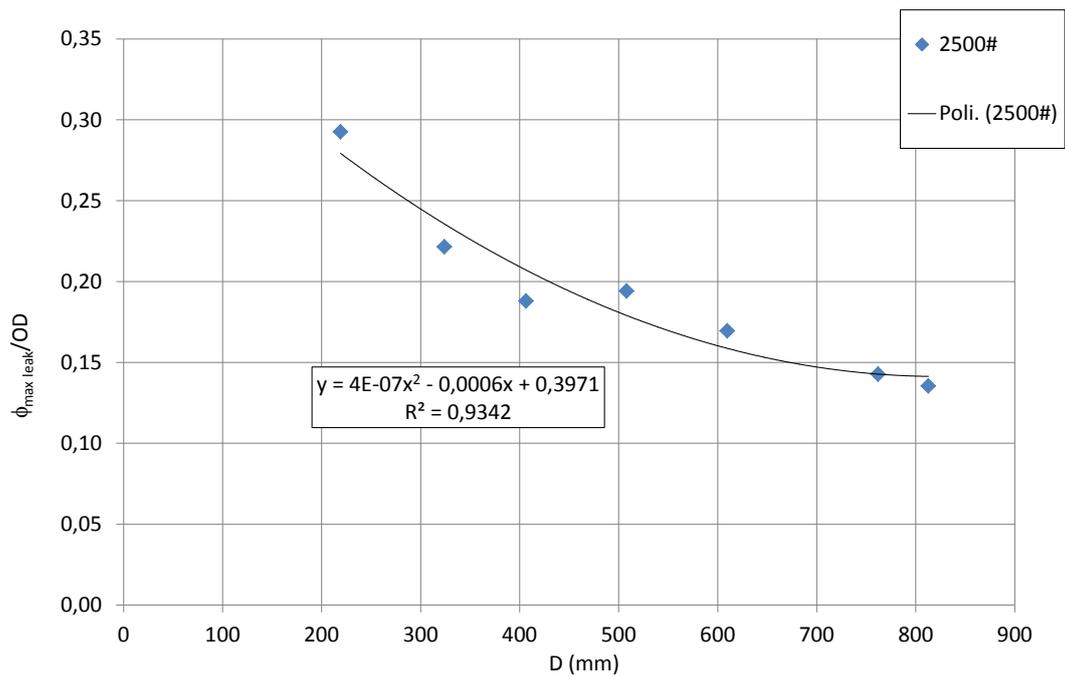


Figura 2.5: Correlazione per la classe 2500#.

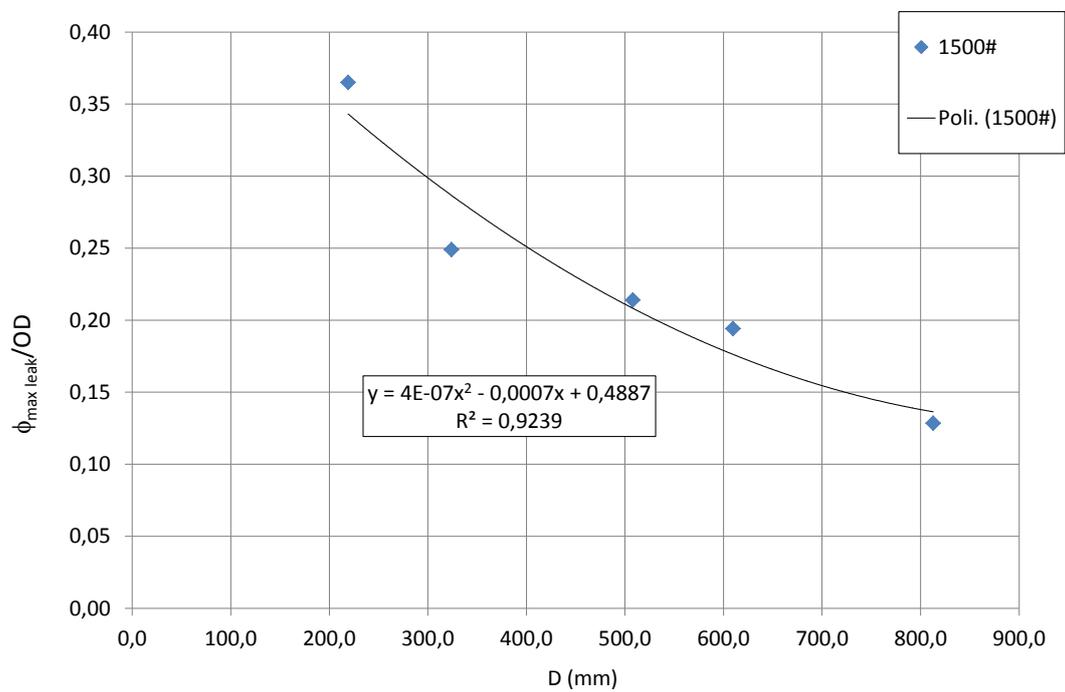


Figura 2.6: Correlazione per la classe 1500#.

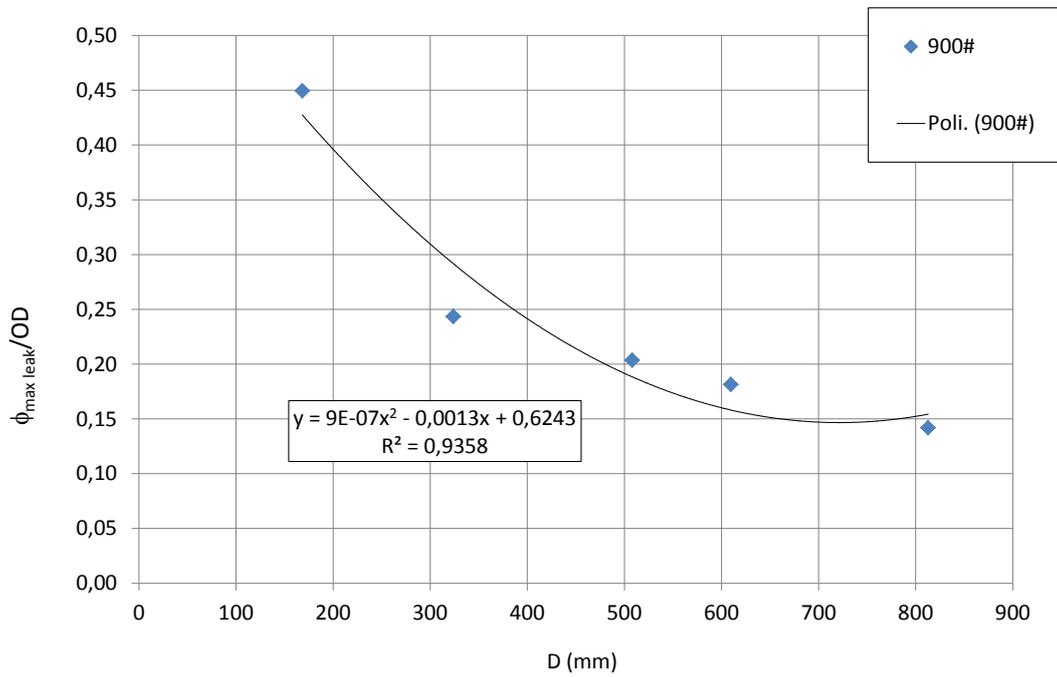


Figura 2.7: Correlazione per la classe 900#.

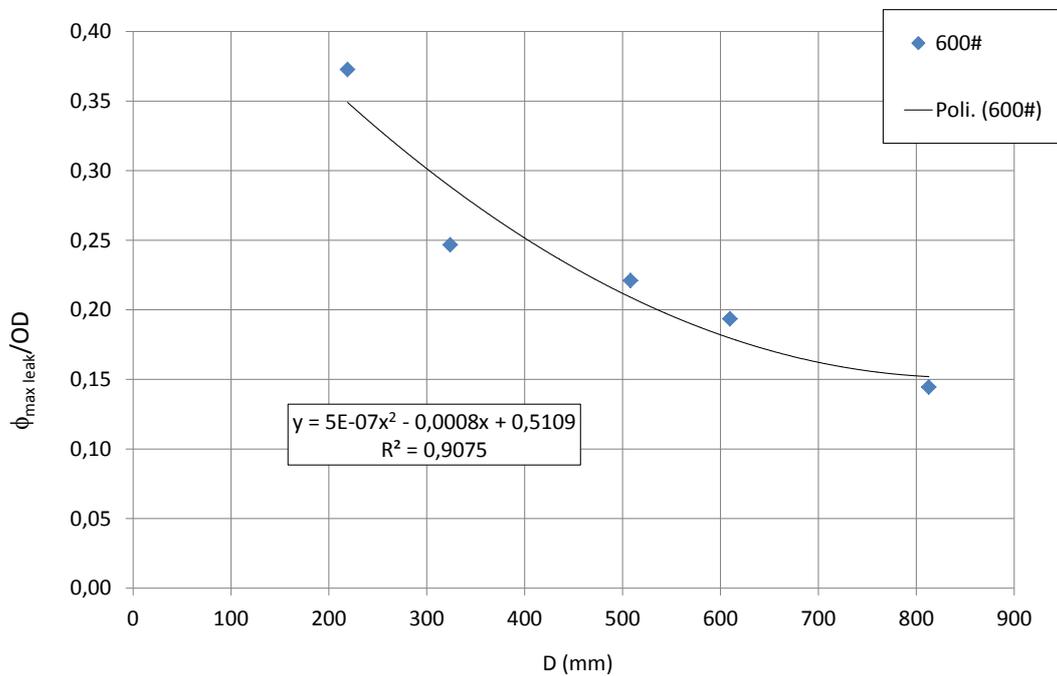


Figura 2.8: Correlazione per la classe 600#.

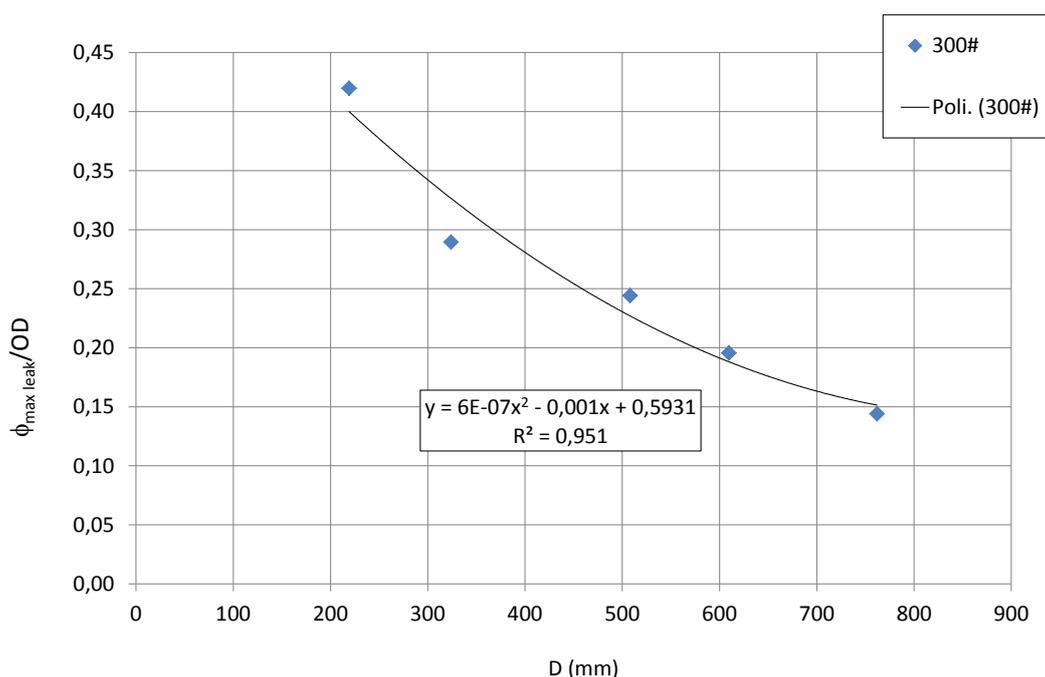


Figura 2.9: Correlazione per la classe 300#.

In ogni grafico è riportata l'equazione della correlazione e il valore di R^2 . R^2 è una misura dell'errore della correlazione rispetto ai dati di riferimento e varia nell'intervallo [0,1]. Tanto più il suo valore è prossimo ad 1, tanto migliore è la capacità della correlazione di descrivere i dati di riferimento. In teoria, per $R^2 = 1$, i dati di riferimento e la curva sono perfettamente sovrapposti, e quindi la correlazione individuata descrive i dati senza errore.

Come si vede, in tutti i casi R^2 è molto prossimo all'unità, il valore più basso è 0,9075 per la classe 300#, ed è indice di un'ottima correlazione tra i dati di input e la curva.

Inoltre, in base ai risultati ottenuti, non si osservano effetti dovuti ai diversi materiali investigati, in quanto nel calcolo delle correlazioni non è stata fatta distinzione tra i materiali analizzati (ASTM A333/6, API 5L/X65, ASTM A671 CC70 CL 22), essendo stati raggruppati nello stesso insieme di dati per ogni singola classe di rating. In altre parole, le correlazioni trovate non hanno bisogno di applicare distinzioni in base al materiale della tubazione.

I coefficienti α , β , e γ dell'Eq. 2-1 e il valore di R^2 sono riportati in Tabella 2.5 per ognuna delle classi della tubazione.

Tabella 2.5: Coefficienti della correlazione per le classi di tubazione analizzate.

Classe	α	β	γ	R^2
2500#	$4,0 \times 10^{-7}$	-0,0006	0,3971	0,9342
1500#	$4,0 \times 10^{-7}$	-0,0007	0,4887	0,9239
900#	$9,0 \times 10^{-7}$	-0,0013	0,6243	0,9358
600#	$5,0 \times 10^{-7}$	-0,0008	0,5109	0,9075
300#	$6,0 \times 10^{-7}$	-0,0010	0,5931	0,9510

3 CONCLUSIONI

L'analisi *leak vs break*, è stata svolta basandosi sulla procedura descritta nella API 579 [5], nella quale si adotta un approccio basato sulla meccanica della frattura, assumendo un difetto tipo cricca orientato in direzione parallela all'asse del tubo.

Nel presente lavoro è stata effettuata la valutazione *leak vs break* per i 27 casi riassunti nella tabella seguente, considerando solo le proprietà nominali dei materiali, assumendo un difetto tipo cricca passante in direzione parallela all'asse del tubo (rettilineo e senza curve) e sollecitato dalla sola pressione interna. Nessun altro tipo di carico è stato considerato nel calcolo. L'effetto della temperatura è stato introdotto riducendo le proprietà nominali del materiale stesso (snervamento, carico massimo e tenacità) in funzione della temperatura di design.

Tabella riassuntiva dei casi per la valutazione *leak vs break*.

#	Rating	Piping class	DN	Materiale	Tipo	P _{design}	T _{design}	t	φ _{25,4 mm}	φ _{max leak}
						(bar)	(°C)	(mm)	(leak/ break)	(mm)
1	2500	98F	8	ASTM A333/6	SMLS	295	171	28,1	Leak	64,1
2			12					39,9	Leak	71,7
3			16					49,2	Leak	76,4
4			20	API 5L/X65	SAW			46,1	Leak	98,6
5			24					54,5	Leak	103,4
6			30					67,0	Leak	108,7
7			32					71,1	Leak	110,1
8	1500	06E	8	ASTM A333/6	SMLS	220	171	25,4	Leak	80,0
9			12	33,3	Leak			80,7		
10			20	API 5L/X65	SAW			38,1	Leak	108,7
11			24	46,0	Leak			118,4		
12			32	52,6	Leak			104,4		
13	900	03D	6	ASTM A333/6	SMLS	144	80	14,3	Leak	75,6
14			12	22,2	Leak			78,9		
15			20	API 5L/X65	SAW			25,4	Leak	103,4
16			24	30,2	Leak			110,6		
17			32	38,2	Leak			115,4		
18	600	04C	8	ASTM A333/6	SMLS	95	80	12,7	Leak	81,7
19			12	15,9	Leak			79,9		
20			20	API 5L/X65	SAW			19,1	Leak	112,3
21			24	22,2	Leak			118,0		
22			32	27,0	Leak			117,5		
23	300	B52S	8	ASTM A333/6	SMLS	48	80	8,2	Leak	92,0
24			12	10,3	Leak			93,8		
25			20	ASTM A671 CC70 CL 22	SAW			16,1	Leak	124,0
26			24	17,5	Leak			119,2		
27			30	19,1	Leak			109,8		

Per ognuno dei casi indicati in tabella, sono state effettuate le seguenti valutazioni:

1. Leak o break nel caso di foro con diametro 25,4 mm;
2. Diametro del massimo leak (max leak), ossia la dimensione del leak più grande che può essere sostenuto dalla tubazione nelle sue condizioni operative.

Tutti i casi con foro con diametro 25,4 mm danno luogo a leak. Il massimo leak è compreso tra 64,1 mm (caso 1) e 124,0 mm (caso 25).

A quanto sopra, si aggiunge lo sviluppo di correlazioni che permettano di collegare le caratteristiche della tubazione con il max leak che può essere sopportato dalla tubazione stessa. Tali correlazioni sono state investigate per ciascuna classe di tubazione (rating) e si applicano ai casi della tabella precedente.

Bisogna premettere che la procedura nella API 579 per il calcolo del max leak è piuttosto complessa e coinvolge molti parametri della tubazione (geometria e materiale) e operativi (temperatura, pressione). Per questa ragione non è semplice individuare un correlazione di rapido utilizzo per la valutazione del max leak. Tuttavia è possibile individuare correlazioni semplificate utili allo scopo del presente lavoro, una volta vincolati tra loro alcuni parametri in accordo a specifiche norme di progettazione (ASME B31.3 e ASME B16.5).

In particolare, per ciascuna classe di tubazione e in base ai dati nella tabella precedente, è stato possibile individuare delle correlazioni tra la dimensione del max leak e il diametro della tubazione. In queste correlazioni, il rapporto tra il diametro del max leak e il diametro del tubo, è funzione del diametro del tubo stesso.

Tali correlazioni sono polinomi di secondo grado che hanno mostrato una buona corrispondenza con i dati usati in input. L' R^2 , misura del *fitting*, varia da 0.9075 a 0.9510 a conferma della bontà delle correlazioni ($R^2=1$ significa *fitting* perfetto).

È bene sottolineare che le correlazioni qui proposte sono correlazioni semplificate e sviluppate a partire dalla API 579 assumendo implicitamente la sussistenza di vincoli progettuali come specificato nella ASME B31.3 e nella ASME B16.5 tra il rapporto diametro/spessore della tubazione, la pressione e la temperatura di design, le caratteristiche del materiale.

In sintesi, dalle analisi effettuate si può concludere quanto segue:

- Valutazione *leak vs break* nel caso di foro circolare passante da 25,4 mm: in tutti i casi analizzati il difetto dà luogo a leak e non a break, cioè non evolve sino alla rottura totale della tubazione;
- Valutazione del massimo leak che può essere sopportato dalla tubatura nelle condizioni di esercizio: il max leak varia da 64,1 mm (caso 1) a 124,0 mm (caso 25);
- Sono state estrapolate le correlazioni tra dimensione del difetto e diametro della tubazione, distinguendo per classi di tubazione (rating). Per ogni classe è stata determinata una correlazione (in forma di polinomio di secondo grado) valida per quella sola classe. Le correlazioni sono relazioni semplificate sviluppate a partire dalla API 579 assumendo implicitamente la sussistenza di vincoli progettuali come specificato nella ASME B31.3 e ASME B16.5. Pertanto le correlazioni trovate si applicano ai casi per i quali sono verificate dette condizioni, ovvero rientrano nella metodologia di calcolo degli spessori di una tubazione secondo tali norme dove lo spessore stesso ha dipendenza dal diametro della tubazione, dal tipo di materiale, dalla pressione e temperatura di progetto.

4 RIFERIMENTI

1. A. Cosham, "The leak-rupture behaviour of defects in pipelines in pipelines", Penspen Limited report n. NR99035/4238.1.711/R3, September 2002
2. MAXEY,W.A., KIEFNER,J.F., EIBER,R.J., and DUFFY,A.R.; "Ductile Fracture Initiation, Propagation and Arrest in Cylindrical Vessels", ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1972, pp. 70-81.
3. KIEFNER,J.F., MAXEY,W.A., EIBER,R.J., and DUFFY,A.R.; "The Failure Stress Levels of Flaws in Pressurised Cylinders", ASTM STP 536, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1973, pp. 461-481.
4. BS7910:2013, "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures", Dicembre 2013
5. API579-1/ASME FFS-1, "Fitness-For-Service", 2016
6. DNVGL-ST-F101, "Submarine Pipeline Systems", 2017

DICHIARAZIONE DI PROTEZIONE

Il contenuto del presente documento ha natura confidenziale e di informazione ed esperienza tutelata ai sensi degli artt. 98-99 del Codice della Proprietà Industriale (D. Lgs. N° 30 del 10.02.2005).

La conoscenza e la divulgazione di quanto contenuto nel presente documento è riservata al suo destinatario ufficiale, così come individuato da RINA Consulting – Centro Sviluppo Materiali S.p.A. e riportato sulla copertina del presente documento.

L'uso del contenuto del presente documento è riservato al suo destinatario e comunque deve intendersi espressamente limitato a quanto previsto nel contratto stipulato da RINA Consulting – Centro Sviluppo Materiali S.p.A. con il destinatario stesso.

STATEMENT ON DATA PROTECTION

The content of this document is confidential and its information and know-how are protected under articles 98-99 of the Code of Industrial Property (Legislative Decree no. 30 of 10.02.2005).

The knowledge and the disclosure of the content of this document is restricted to its official addressee as identified by RINA Consulting – Centro Sviluppo Materiali S.p.A. and written on the cover of the document itself.

The use of the contents of this document is restricted to its addressee and must be considered in any case limited to the extent set forth in the agreement signed by RINA Consulting – Centro Sviluppo Materiali S.p.A. and the addressee.

DISCLAIMER

Il Report è stato redatto sulla base dei documenti, dei materiali e delle informazioni messi a disposizione dal Cliente a Rina Consulting - Centro Sviluppo Materiali S.p.A. (CSM) e pertanto non contiene alcuna dichiarazione o garanzia, espressa o implicita, con riferimento alla completezza dell'analisi svolta e delle informazioni in esso contenute. La responsabilità per l'uso del Report e dei suoi contenuti e ogni derivante conseguenza connessa a tale uso sono poste a esclusivo carico del Cliente. CSM declina pertanto ogni e qualsivoglia responsabilità per danni diretti e/o indiretti (sia con riferimento al danno emergente che al lucro cessante) subiti dal Cliente e/o da terzi in relazione all'uso da parte del Cliente del Report e delle informazioni in esso contenute.

The Report has been redacted on the basis of documents, materials and information made available by the Customer to Rina Consulting - Centro Sviluppo Materiali S.p.A. (CSM) and it does not contain any declaration or guarantee, neither expressed nor implied, in relation to the completeness of the analysis carried out and of the reported results. The Customer assumes any and all liabilities and responsibilities in connection to the use of the Report and its contents. Any and all possibly deriving consequences connected to such use will be exclusively borne by the Customer. CSM declines any and all responsibilities and liabilities for direct and / or indirect damages, including but not limited to lost profits, lost savings, incidental, special and consequential damages, suffered by the Customer and / or any third parties in relation to the use of the Report and the information contained herein.



RINA Consulting - Centro Sviluppo Materiali S.p.A.

Società soggetta a direzione e coordinamento amministrativo e finanziario del socio unico RINA Consulting S.p.A.
Via di Castel Romano, 100 - 00128 Roma | P. +39 06 50551 | rinaconsulting@rinaconsulting.org | www.rinaconsulting.org
C.F. / R.I. Roma N. 00477510580 | P. IVA 00903541001 | Cap. Soc. € 1.050.000,00 i.v..