

Stress Intensification Factors di giunti a tee senza rinforzo fabbricati con curve saldate su tubi dritti in acciaio al carbonio

L. Scano *

* Studio Scano Associato – Udine

1. Sommario

Nell'ambito delle valutazioni Fitness-For-Service (FFS) di tubazioni in acciaio al carbonio esercite a bassa pressione e temperatura, è possibile incontrare tee fuori standard, realizzati tramite saldatura di una curva, a guisa di branch-pipe, su un run-pipe dritto. Per tali giunti, il calcolo degli sforzi non è codificato, non essendo disponibili gli Stress Intensification Factors (SIF) nei principali codici di calcolo internazionali.

Nel presente lavoro è stata eseguita una estesa campagna di simulazioni FEM su differenti geometrie di giunzioni fabbricate con curve: sono stati considerati run-pipe di diametro variabile da DN80 a DN250 e branch-pipe aventi diametri compresi tra DN50 e DN250. Sono stati inoltre presi in esame tre Schedule: SCH10, SCH40 e SCH80, ritenuti significativi per i giunti di maggior riscontro nella pratica FFS. I SIF sono stati calcolati analiticamente e confrontati con quelli relativi ai normali giunti fabbricati con tubi dritti, questi ultimi valutati sia tramite FEA, sia con formule codificate. A tal proposito, è stato inoltre valutato l'impatto della flessibilità della curva sui SIF nel caso dei giunti aventi run-pipe e branch-pipe di egual diametro. Infine, è stata eseguita un'analisi parametrica modificando gli offset tra gli assi del run-pipe e della curva in modo da valutare l'impatto di questi sui SIF.

L'analisi ha mostrato come la geometria curva sia rilevante solo nel caso in cui i diametri dei tubi run e branch siano uguali. Sulla base dei risultati ottenuti è stata infine proposta una formula per calcolare i SIF dei collegamenti con branch curvi, a partire da quelli codificati relativi all'analogia geometria a tubi dritti. Tale formula è stata quindi con successo applicata a un case-study reale.

2. Nomenclatura

D	diametro esterno del run-pipe (mm)
d	diametro esterno del branch-pipe (mm)
FCA	margine di corrosione futura secondo API 579-1 (mm)
h	caratteristica di flessibilità del giunto a tee fabbricato senza rinforzo
i	Stress Intensification Factor
l	offset tra l'asse del run-pipe e quello della curva costituente il branch (mm)
k_e	fattore di flessibilità della curva secondo piping code
M	momento flettente agente sugli estremi del giunto (Nmm)
PS	pressione massima ammissibile (barg)
R_e	raggio mediano della curva costituente l'elbow-tee (mm)
T	spessore del run-pipe, al netto di FCA, se applicabile (mm)
t	spessore del branch-pipe, al netto di FCA, se applicabile (mm)
Z	modulo di resistenza flessionale della sezione del tubo (mm ³)
Δl	incremento di offset (mm)
δ	rapporto medio diametro su spessore tubi run e branch
σ_1	massimo sforzo principale agente sulla giunzione (MPa)

Pedici:

•b	branch pipe
•e	elbow, condotto curvo
•i	in-plane bending
•o	out-of-plane bending

3. Introduzione

I giunti a tee fabbricati senza rinforzo sono uno dei componenti più diffusi nei sistemi di tubazioni e, nella configurazione più semplice (non rinforzati), sono costruiti per saldatura diretta di un tubo branch a 90° su un tubo principale (run). Dal punto di vista meccanico strutturale, la giunzione ha un effetto di concentrazione degli sforzi indotti dai momenti esterni applicati e l'apertura introdotta nel run-pipe deve essere altresì verificata per l'azione della pressione interna, adottando i consueti metodi di compensazione delle aree. I principali codici di progettazione di tubazioni come la EN 13480-3 [1] o le ASME B31.1 [2] e B31.3 [3] forniscono delle formule per calcolare l'incremento degli sforzi longitudinali agenti sulla giunzione sotto l'azione dei momenti di estremità (Stress Intensification Factor, o SIF, indicato con il simbolo i). Queste correlazioni, fornite dalla normativa, non derivano da analisi di tipo statico, ma discendono direttamente da prove a fatica eseguite da Markl [4] alla fine degli anni cinquanta. In quel periodo infatti, il fine primo delle analisi di flessibilità di tubazioni era rivolto alla valutazione del range termico e quindi alla modalità di cedimento per mancato assestamento plastico (ratcheting), che è intrinsecamente un fenomeno legato al funzionamento ciclico. Successivamente, tuttavia, diversi studi e estese simulazioni FEM [5][6][7][8] hanno confermato la validità delle relazioni di Markl, che continuano ad essere implementate nei codici di progetto e sono con successo utilizzate dai progettisti di tubazioni in tutto il mondo.

Nell'ambito della valutazione di integrità strutturale tipo Fitness-For-Service di vecchi sistemi di tubazioni, ad esempio per applicazione dell'art. 16 del D.M. 329/04 [9], è abbastanza comune rilevare sul campo giunzioni a tee fuori standard, realizzate per intersezione di tubi diritti ad angoli diversi da 90° (laterals) oppure fabbricate per saldatura di una curva su un run-pipe diritto (elbow-branch connection). Un'analisi estensiva per la valutazione dei SIF dei tee laterali è stata recentemente proposta da Mair [10]. Un approccio analogo per i tee costruiti con gomiti è stato invece presentato dall'autore [11][12] e riassunto nella presente memoria.

I tee fabbricati con curve risultano essere piuttosto comuni in tubazioni in acciaio al carbonio per impieghi a bassa pressione e temperatura costruite prima dell'introduzione della Direttiva PED [13], oppure in quelle da essa esenti. Posseggono il vantaggio idraulico di indurre minori perdite di carico durante il servizio con liquidi (acqua o olio) ma sono spesso utilizzati anche nell'impiego con gas tecnici, soprattutto aria, azoto, gas naturale o ossigeno (Figura 1, a-e). In ambito Fitness-For-Service e prendendo a riferimento il codice API 579-1 [14], le tubazioni sono classificate componenti "type-B" (non esiste una relazione diretta tra spessore delle membrature e pressione applicata) a causa dell'effetto degli sforzi longitudinali (sostenuti e termici) determinabili solo tramite stress analysis. Quest'ultima è quindi indispensabile nell'ambito di un assessment Level 2 in condizioni di spessore minimo al netto del margine di corrosione futura (Future Corrosion Allowance, FCA). Qualora siano presenti tee fabbricati con curve è necessario eseguire un'analisi Level 3 con modelli FE realizzati ad hoc, vista l'assenza dei relativi SIF all'interno delle principali norme di progetto [15]. Tali procedure sono efficienti ma estremamente onerose in termini di tempo e costi associati.

Fine del presente lavoro è stato quindi quello di determinare, tramite estese simulazioni FEM e relative analisi parametriche, le correlazioni esistenti tra i SIF dei tee fabbricati con curve (SIF_e) e quelli relativi ai giunti di medesima geometria ma di tipo standard (giunti equivalenti). In particolar modo, si è voluto valutare quando i SIF dei giunti standard equivalenti possono essere utilizzati conservativamente nell'analisi dei tee dotati di curve e, eventualmente, determinare una formula per il calcolo dei SIF_e a partire da quelli standard, nel caso in cui il loro impiego non sia cautelativo. In una prima fase dell'analisi sono state considerate unicamente giunzioni con run-pipe e elbow-branch coassiali (concentric elbow-

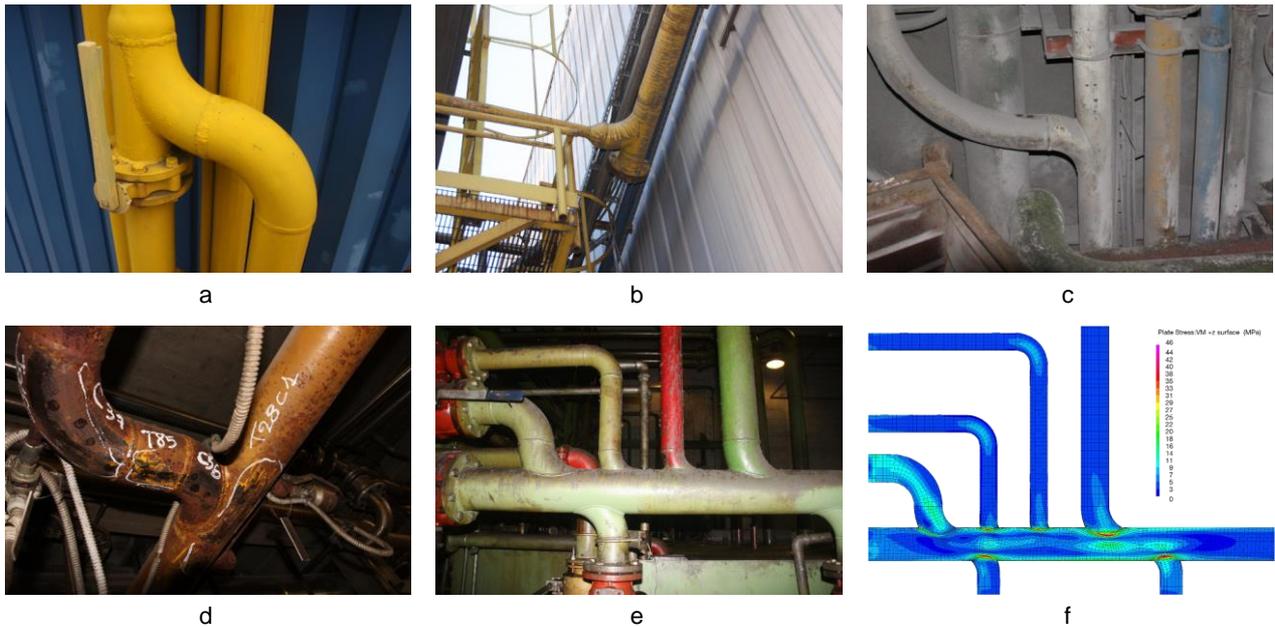


Figura 1 – Esempi applicativi di giunzioni fabbricate con curve (a-e) e FEA di dettaglio della tubazione “e” in ambito FFS (API 579-1 Level 3, f).

branch connection). Sono stati costruiti i modelli FE per 42 geometrie di comune riscontro impiantistico e tutti i modelli sono stati realizzati nella configurazione con curva e in quella equivalente standard. Il rapporto tra i SIF_e dei tee con curva e quelli equivalenti è risultato significativamente superiore a 1 solo nel caso di rapporto unitario tra i diametri branch e run ($d/D = 1$) e per caricamento out-of-plane. Tale comportamento è stato direttamente correlato all'effetto della flessibilità k_e della curva sulla giunzione, indagato parametricamente. Successivamente, è stato investigato il ruolo dell'offset l tra curva e run-pipe (Figura 2, non-concentric elbow-branch connection) considerando 144 geometrie ad offset crescente. Un aumento di offset, soprattutto per i SIF_e calcolati lato branch, ha comportato una diminuzione degli sforzi sul giunto, anche in questo caso in particolar modo per caricamento fuori dal piano della giunzione. Al termine dell'analisi è stata infine ricavata una formula per il calcolo dei SIF dei giunti con curva a partire da quelli a codice del relativo tee fabbricato equivalente.

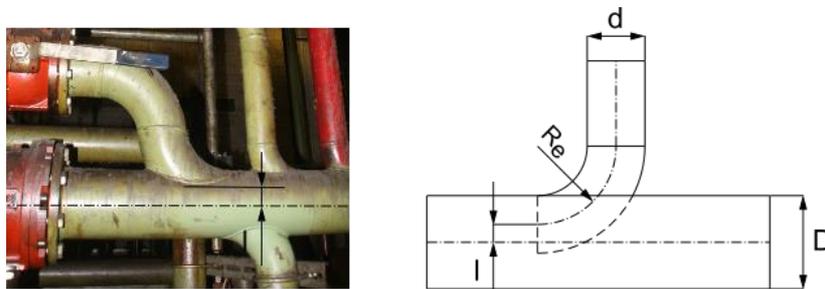


Figura 2 – Geometria rilevante di un elbow-branch non-concentrico di offset l .

4. Geometrie analizzate

Sono state considerate due serie di geometrie per giunzioni di tipo concentrico e non-concentrico ad offset crescente, per un totale di 186 differenti tipologie di giunto. Nella scelta, si è cercato di includere le caratteristiche, in termini di diametri, spessori e tipo di

curve, di maggior riscontro nella pratica relativa all'integrità strutturale di tubazioni in acciaio al carbonio operanti a bassa pressione e temperatura.

Per l'analisi degli elbow-tee concentrici sono state prese in esame 42 differenti geometrie aventi diametro del tubo run variabile da DN80 a DN250 e del tubo branch da DN50 a DN250. Gli spessori sono stati invece scelti in riferimento agli Schedule 10, 40 e 80 e sono state incluse nello studio unicamente curve del tipo "Long Radius". Nel caso dei giunti non-concentrici sono state analizzate 144 geometrie originate da 24 configurazioni di base aventi diametri del run-pipe variabili da DN100 a DN250, del branch da DN50 a DN150, e spessori di nuovo Schedule 10, 40 e 80. In questi casi l'offset è stato fatto variare da 0 a $[(D-d)/2 - t]$ in 5 intervalli di estensione pari a Δl . La Tabella 1 riassume il complesso delle geometrie analizzate. I casi indicati come "N.I." sono stati esclusi in quanto l'elevata curvatura della gomito comportava l'introduzione di un punto di concentrazione non presente nelle altre geometrie, rendendo quindi impossibile il confronto tra i SIF_e relativi.

D	d	Re	SCH 10		SCH 40		SCH 80		Δl	l
			T	t	T	t	T	t		
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
273.0	273.0	381.0	4.2	4.2	9.3	9.3	15.1	15.1	9.1	45.3
	219.1	304.8	4.2	3.8	9.3	8.2	15.1	12.7		
	168.3	228.6	4.2	3.4	9.3	7.1	15.1	11.0		
	114.3	152.4	4.2	3.0	9.3	6.0	15.1	8.6		
219.1	219.1	304.8	3.8	3.8	8.2	8.2	12.7	12.7	9.3	46.4
	168.3	228.6	3.8	3.4	8.2	7.1	12.7	11.0		
	114.3	152.4	3.8	3.0	8.2	6.0	12.7	8.6		
	88.9	114.3	3.8	3.0	8.2	5.5	12.7	7.6		
168.3	168.3	228.6	3.4	3.4	7.1	7.1	11.0	11.0	6.8	34.2
	114.3	152.4	3.4	3.0	7.1	6.0	11.0	8.6		
	88.9	114.3	3.4	3.0	7.1	5.5	11.0	7.6		
	73.0	95.2	3.4	3.0	7.1	5.2	11.0	7.0		
114.3	114.3	152.4	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	3.1	15.5
	88.9	114.3	3.0	3.0	5.5	5.5	7.6	7.6		
	73.0	95.2	3.0	3.0	5.5	5.2	7.6	7.0		
	60.3	76.2	3.0	2.8	5.5	3.9	7.6	5.5		
88.9	88.9	114.3	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	4.6	23.1
	73.0	95.2	3.0	3.0	5.2	5.2	7.0	7.0		
	60.3	76.2	3.0	2.8	5.2	3.9	7.0	5.5		

Tabella 1 – Geometrie degli elbow-branch concentrici inclusi nello studio.

5. Modelli FE, FEA e analisi parametrica

I modelli FE dei tee sono stati costruiti tramite il software commerciale Straus7 rel. 2.4.6 utilizzando elementi shell quadratici a 8 nodi. Sono stati realizzati nel complesso 42 modelli di elbow-tee concentrici, 42 modelli di giunti a tee fabbricati equivalenti e 144 modelli di elbow-tee non-concentrici, per un totale di 228 modelli FE complessivi. In tutti i casi, i rapporti d/t e D/T sono sempre risultati inferiori a 20, giustificando l'ipotesi di parete sottile e l'adozione di elementi bidimensionali lineari nello spessore. La mesh di ogni modello è stata adeguatamente raffinata sulla linea di intersezione, mantenendo una dimensione media degli elementi pari alla metà dello spessore minimo collegato, così come suggerito dalla letteratura tecnica relativa alla modellazione FEM delle giunzioni tra cilindri [5][9][16]. Le

mesh sono state infine automaticamente verificate dal software per distorsioni, warping e aspect-ratio degli elementi.

Il caricamento dei modelli è stato eseguito vincolando una estremità del run-pipe e applicando i momenti flettenti ai rimanenti terminali in modo da originare un'azione complessiva in-plane e out-of-plane. Non sono stati considerati i momenti torcenti, non essendo questi vincolanti per il calcolo dei SIF e le verifiche a codice. I SIF sono stati valutati, a partire dai risultati di una FEA elastica lineare, utilizzando il valore del massimo sforzo principale sulla giunzione:

$$i = \frac{\sigma_1}{2M/Z} \quad (1)$$

dove il termine al denominatore indica lo sforzo equivalente che si avrebbe su un tubo saldato diritto dotato dello stesso modulo di resistenza Z e sottoposto al medesimo momento flettente M . Il coefficiente 2 tiene conto della concentrazione degli sforzi (ricavata dai test di Markl a fatica [4]) che si origina in un tratto rettilineo a causa della saldatura. Si sottolinea come il modulo dei momenti applicati, e quindi la magnitudo degli sforzi risultanti, sia del tutto arbitraria, essendo rilevanti, ai fini della presente, unicamente il rapporto adimensionale espresso dall'Equazione (1).

I SIF indicati dai codici di calcolo sono invece tipicamente forniti in funzione della caratteristica di flessibilità del giunto h , e.g., per ASME B31.3 e EN 13480-3:

$$h = \frac{2T}{(D-T)} \quad (2)$$

$i_o = \frac{0.9}{h^{2/3}} \quad i_i = 0.75 \cdot i_o + 0.25$	$i_o = \frac{0.9}{h^{2/3}} \quad i_i = \frac{0.75}{h^{2/3}}$
ASME B31.3	EN13480-3

Un estratto dei risultati delle simulazioni FEM è presentato alla Figura 3. Nella parte superiore è illustrato l'andamento dello sforzo di Von Mises alla superficie esterna dei tubi per caricamento in-plane e out-of-plane nella configurazione $d/D = 1$ e $d = D = 273$ (DN250, SCH40). Vengono confrontati l'elbow-tee e il relativo tee fabbricato equivalente. In quella inferiore è presentato invece lo stesso sforzo per la geometria di elbow-branch con riduzione DN250-DN150, SCH40. Il confronto in questo caso è eseguito tra la configurazione ad offset minimo $l = \Delta l$ e quella ad offset massimo $l = 5 \cdot \Delta l$.

Dall'analisi dei risultati appare immediatamente evidente, come già noto nel caso dei tee fabbricati standard, che il caricamento out-of-plane al lato branch-pipe è quello più oneroso in termini di sforzo indotto nelle membrature. Il codice ASME B31.1, ad esempio, considera unicamente il suo contributo per la determinazione dei SIF al fine delle verifiche di progetto. Si osserva inoltre come lo stato di sforzo in-plane si mantenga pressoché inalterato, sia come modulo che come distribuzione di massima, nelle configurazioni del giunto con e senza curva. Nel caso di tee con riduzione, inoltre, anche la variazione dell'offset nel caso di elbow-branch non modifica sostanzialmente lo stato di sforzo prodotto dai carichi nel piano. Se i momenti agiscono invece fuori dal piano, si nota immediatamente un brusco aumento dello stato di sforzo nel giunto fabbricato con la curva rispetto al caso standard equivalente quando $d/D = 1$. Se $d/D < 1$ la differenza in termini di sforzo risulta essere invece minima. La Figura 4 presenta l'andamento parametrico dei SIF massimi determinati tramite FEA (caricamento out-of-plane, lato branch) in funzione del parametro $\delta = (D/T + d/t)/2$ e del rapporto dei diametri d/D nel caso di giunto fabbricato con e senza curva.

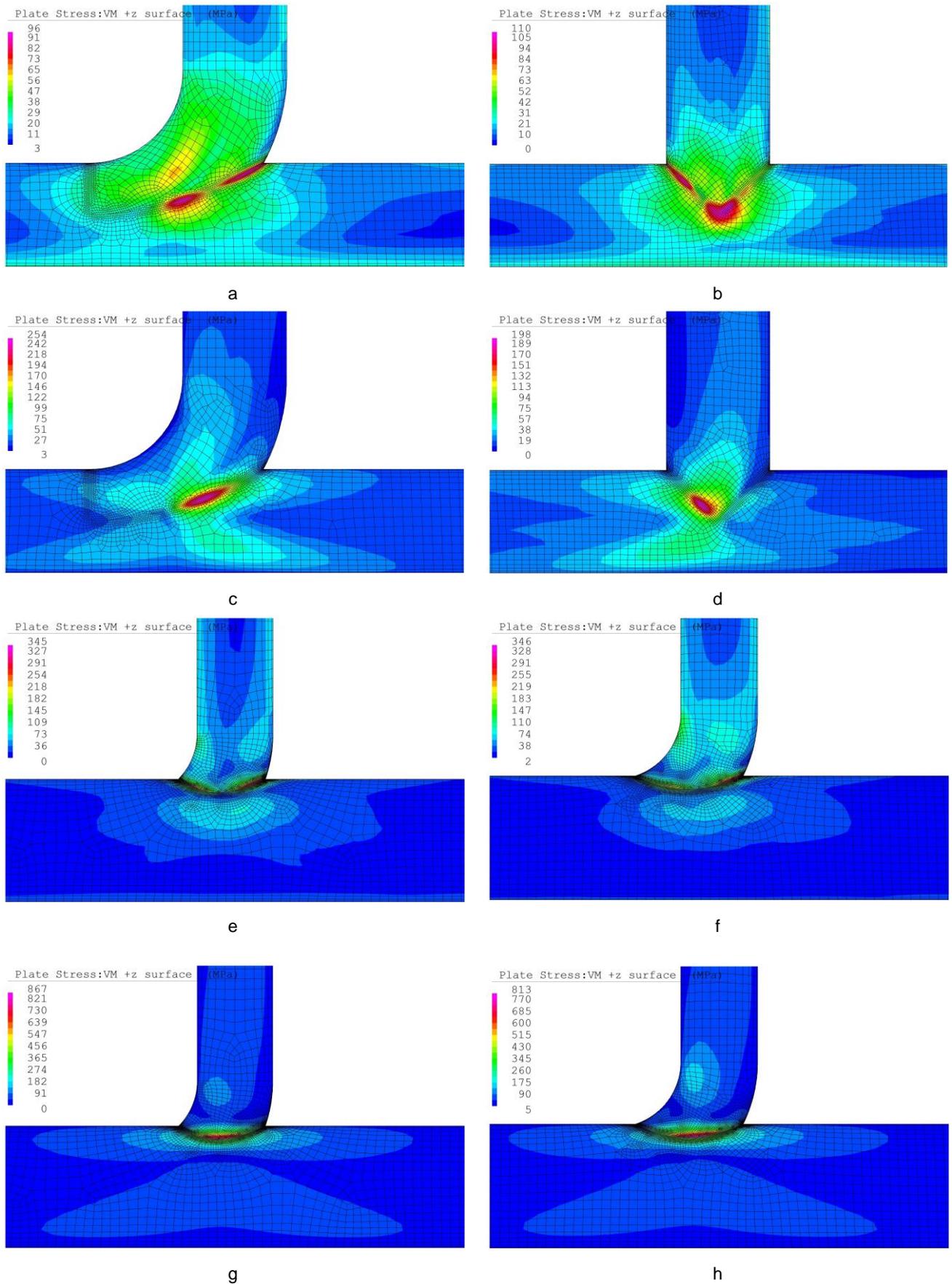


Figura 3 – Sforzi di Von Mises al diametro esterno: giunti DN250-DN250, SCH40 (a-d) e DN250-DN150, SCH40 (e-f); in-plane bending (a-b, e-f) e out-of-plane bending (c-d, g-h); offset minimo $l = \Delta l$ (e, g) e massimo $l = 5 \cdot \Delta l$ (f, h).

Si può osservare un andamento quasi lineare dei SIF con δ e si nota chiaramente l'incremento netto dei valori per $d/D = 1$ nel caso di giunzione fabbricata con curva. In tal caso il rapporto SIF_e / SIF è sempre superiore a 1 e variabile da 1.1 a 1.35.

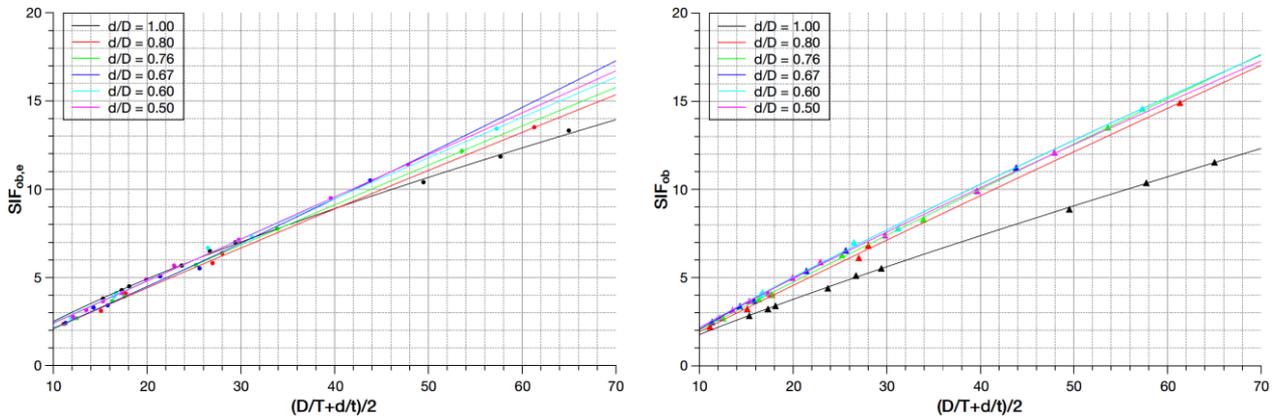


Figura 4 – SIF out-of-plane lato branch per tee con curva (sinistra) e standard (destra) in funzione del fattore δ e del rapporto d/D .

Una possibile origine di tale incremento nel caso $d/D = 1$ è da ricercarsi nella flessibilità della curva, quantificabile con un fattore di flessibilità k_e definito a codice come:

$$k_e = \frac{1.65}{h_e} = \frac{1.65(d-t)^2}{4tR_e} \quad (3)$$

L'andamento dei SIF_e in funzione di k_e è riportato alla Figura 5. Si nota immediatamente il forte incremento dei SIF_e sul branch pipe per caricamento out-of-plane che trova poi riscontro nell'aumento dello stato di sforzo riportato in Figura 3c.

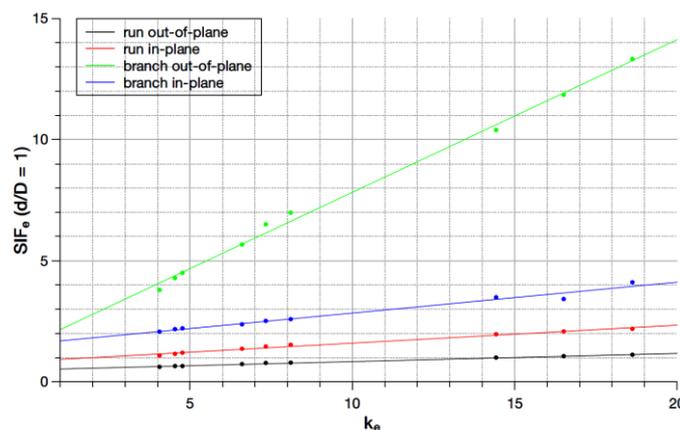


Figura 5 – Andamento dei SIF rispetto al fattore di flessibilità della curva per gli elbow-tee con $d/D = 1$.

Il ruolo dell'offset l tra asse del tubo run e asse del condotto curvo è stato valutato tramite analisi parametrica per i 144 casi di tee con riduzione e i risultati ottenuti sono riportati in Figura 6. Si osserva come per valori di $\delta < 20$ non ci sia praticamente nessuna variazione dei SIF_e dominanti al variare dell'offset. Essi invece tendono a diminuire con l per $\delta > 20$ con un decremento massimo pari al 13% del loro valore iniziale.

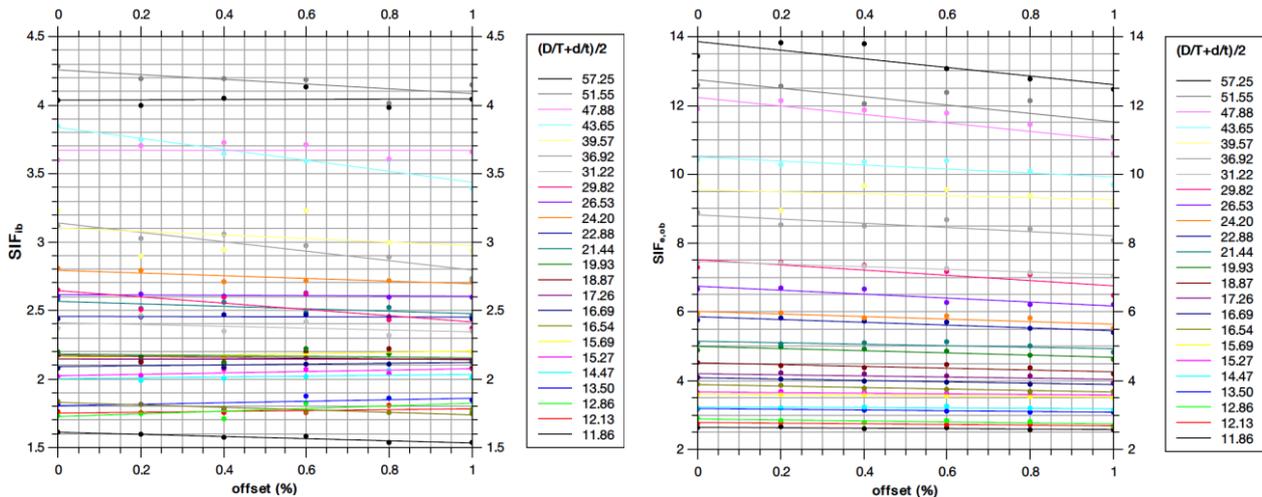


Figura 6 – SIF in-plane e out-of-plane lato branch per tee con curva al variare di l e in funzione di δ .

In funzione dei dati ottenuti tramite FEA, sono stati messi in correlazione i SIF_e relativi ai tee fabbricati con curve e i SIF_{code} forniti a codice per i relativi giunti standard equivalenti. Il confronto è stato eseguito rispetto al SIF dominante (out-of-plane, lato branch) in tutti i casi in cui $SIF_e > SIF_{code}$ ed è riportato in Figura 7.

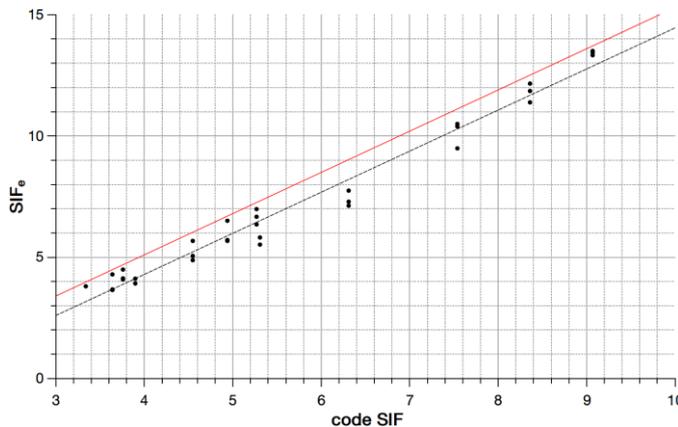


Figura 7 – Confronto SIF_e vs. SIF_{code} .

Interpolando linearmente i dati ottenuti e considerando l'upper-limit conservativo della distribuzione (retta rossa in Figura 7), si è giunti alla seguente relazione:

$$i_e = 1.7 \cdot i - 1.7 \quad (4)$$

dove i è il SIF fornito a codice per il tee fabbricato di tipo standard.

L'Eq. (4) permette, in maniera semplice, rapida e conservativa, di calcolare il SIF_e di un elbow-tee ai fini di una stress analysis in ambito FFS, a partire dal dato codificato reperibile nei piping code.

L'Eq. (4) è inoltre utilizzabile, in maniera conservativa, anche in tutti i casi di elbow-tee ridotti con offset, tendendo a diminuire i tassi di sforzo con l in tali casi (Figura 6). Una formula meno conservativa dell'Eq. (4), che tiene effettivamente conto anche del ruolo dell'offset l , è comunque riportata in [12].

6. Applicazione ad un caso pratico di elbow-tee

Si riporta, a titolo esemplificativo, un case study di interesse affrontato dall'autore durante l'analisi FFS di una tubazione dedicata al trasporto di gas naturale all'interno di uno stabilimento industriale (DN150, PS = 3.0 barg) nell'ambito della valutazione dello stato di conservazione ed efficienza di cui all'art. 16 del D.M. 329/04 e alla circolare applicativa ISPESL A00-09/0005411/08 [17].

La tubazione è presentata in Figura 8 e consiste in un tratto di by-pass dotato di 2 giunti a tee fabbricati con curve tipo "Long Radius" e $d/D = 1$. Il giunto superiore possiede spessore di calcolo del branch, corretto del fattore FCA previsto dalla API 579-1, pari a 4.15 mm,

quello inferiore invece possiede $t = 4.02$ mm. I SIF_{code} massimi (out-of-plane) previsti dalla EN 13480-3 (Eq. (2)) risultano pari a 6.256 e 6.518, rispettivamente. Utilizzando la formula (4), i SIF_e per i due elbow-tee risultano pari invece a 8.935 e 9.381, con un incremento superiore al 40% rispetto ai valori forniti dal piping code per tee fabbricati standard.



Figura 8 – Case study: tubazione reale dotata di due elbow-tee e stress analysis con modellazione tramite branch-connection standard e SIF_e calcolati tramite l'Eq. (4).

Per testare la validità dell'Eq. (4) è stata eseguita una stress analysis standard della tubazione tramite software commerciale Bentley AutoPipe rel. 10.01.00.08, modellando gli elbow-tee come giunti standard equivalenti dotati di SIF_e calcolato tramite la formula. È stato quindi determinato lo sforzo longitudinale massimo per la combinazione di carico data dall'azione dei pesi propri, della pressione e del range termico (-30 °C). I valori massimi ottenuti sono risultati 30 MPa al giunto superiore e 31 MPa a quello inferiore. Essi sono stati quindi confrontati con quelli forniti dall'analisi FEM completa tipo API 579-1 Level 3 il cui andamento è presentato in Figura 9.

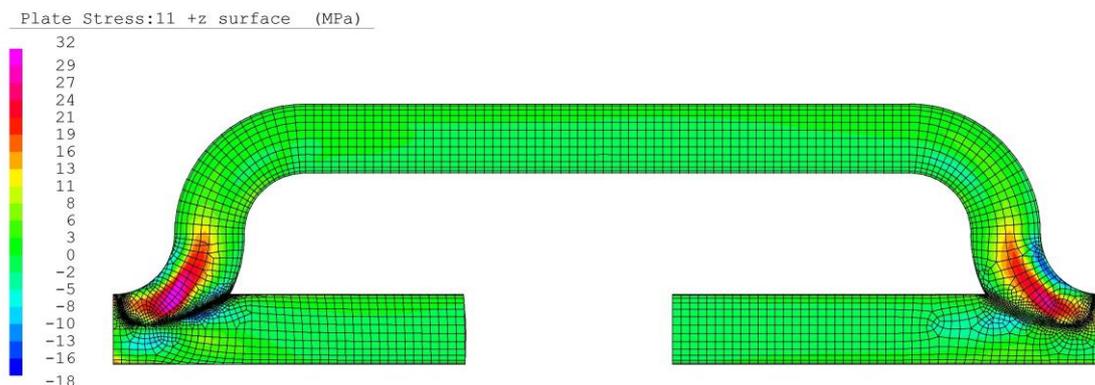


Figura 9 – Andamento del massimo sforzo principale nella tubazione tramite FEA (API 579-1 Level 3).

I valori massimi di sforzo sono risultati pari a 32 e 27 MPa all'elbow-tee superiore e inferiore, rispettivamente, compatibili con quelli ottenuti tramite l'analisi semplificata e l'Eq. (4).

Utilizzando i SIF_{code} , gli sforzi sarebbero stati calcolati come 21 MPa al giunto superiore e 20 MPa a quello inferiore, con una sottostima netta superiore al 30%.

7. Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati calcolati, tramite FEA, gli Stress Intensification Factor di un peculiare tipo di giunto a tee fabbricato senza rinforzo e realizzato utilizzando una curva saldata a guisa di branch-pipe. Tali connessioni non sono codificate per l'utilizzo con nuovi progetti ma possono essere incontrati durante le valutazioni Fitness-For-Service di vecchie tubazioni in acciaio al carbonio esercite a bassa pressione e temperatura. In questi casi, un'assessment API 579-1 Level 3 è spesso necessario, non essendo disponibili a codice i SIF dei giunti da utilizzare nella stress analysis in condizioni ultime di spessore (API 579-1 Level 2).

Sono state esaminate 186 geometrie di elbow-tee, con diametri variabili da DN80 a DN250 lato run-pipe, da DN50 a DN250 lato branch-pipe, e spessori degli Schedule 10, 40 e 80. È stata valutata sia la geometria avente $d/D = 1$ che quella relativa ai tee con riduzione. Sono state studiate sia giunzioni concentriche, per le quali è stato eseguito un confronto diretto con il relativo tee standard equivalente, anch'esso calcolato tramite FEA, che giunti non-concentrici, per i quali è stato esplicitamente indagato il ruolo dell'offset l tra run-pipe e elbow-branch.

L'analisi FEM e il confronto con i tee standard equivalenti per elbow-tee concentrici hanno evidenziato come, rispetto al SIF dominante (out-of-plane, lato branch), gli elbow-tee siano caratterizzati da tassi di sforzo analoghi a quelli dei giunti standard se e solo se $d/D < 1$. Nel caso $d/D = 1$, invece, i SIF_e sono risultati superiori fino al 35% rispetto ai SIF equivalenti. Nel caso di elbow-tee ridotti ($d/D < 1$), un aumento dell'offset (giunti non-concentrici) è risultato benefico, con una diminuzione degli sforzi fino al 13% rispetto al caso dei tee concentrici.

Sulla base dei risultati ottenuti è stata ricavata, su basi conservative, una formula per calcolare i SIF_e delle giunzioni con curva a partire dai SIF_{code} reperibili a codice. Tale formula, applicata con successo ad un case-study reale, permette di valutare il comportamento strutturale degli elbow-tee direttamente in una stress-analysis standard con elementi monodimensionali, con un netto risparmio di tempo e costi rispetto ai più onerosi metodi di calcolo FEM inseriti in assessment tipo API 579-1 Level 3.

8. Bibliografia

[1] European Committee for Standardization, "EN 13480-3 Metallic industrial piping - Part 3: design and calculation", European Standard, Brussels, 2010

[2] ASME, "B31.1 Power Piping", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2014

[3] ASME, "B31.3 Process Piping", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2014

[4] ASME, "Piping-Flexibility Analysis", Transactions of the ASME for February, 1955, pp. 127-149, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1955

[5] Rodabaugh, E.C., "Accuracy of Stress Intensification Factors for Branch Connections", WRC Bulletin 329, Welding Research Council, New York, 1987

- [6] Wais E., Rodabaugh E.C., "Stress Intensification Factors and Flexibility Factors for Unreinforced Branch Connections, EPRI Technical Report 110996, Palo Alto, California, 1998
- [7] Vu P.Q., "Revision of B31 Code Equations for Stress Intensification Factors and Flexibility Factors for Intersections", Proceeding, ASME ECTC Conference 2011, Fayetteville, AR, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2011
- [8] Bhattacharya A., "A Finite Element Based Study on Stress Intensification Factors (SIF) for Reinforced Fabricated Tees", NWC11-140, Proceeding, NAFEMS World Congress 2011, Boston, NAFEMS, Glasgow, 2011
- [9] D.M. 1/12/2004 n. 329 "Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle apparecchiature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del Decreto Legislativo 25 Febbraio 2000, n. 93"
- [10] Mair D., "Stress Intensification Factors for Fabricated Lateral Piping Connections", PVP2013-97220, Proceeding, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 14-18, 2013, Paris, France, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2013
- [11] Scano L., "Stress Intensification Factors for Unreinforced Elbow Branch Connections in Old Carbon-Steel Pipelines", PVP2014-28528, Proceeding, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 20-24, 2014, Anaheim, California, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2014
- [12] Scano L., "Stress Intensification Factors for Non-Concentric Elbow Branches in Old Carbon-Steel Pipelines", PVP2015-45541, Proceeding, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 19-23, 2015, Boston, Massachusetts, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2015
- [13] Directive 97/23/EC of the European Parliament and of the Council of 29 May 1997 on the approximation of the laws of the Member States concerning pressure equipment
- [14] ASME, "API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2007
- [15] Scano L., Gurnari G., "Analisi Fitness-For-Service di Tubazioni in Impianti Complessi nell'Ambito dell'Art. 16 del D.M. 329/04", SAFAP 2012, 14-15 Giugno 2012, Napoli, INAIL, 2012
- [16] Xue L., Widera G. E. O., Sang Z., "Flexibility Factors for Branch Pipe Connections Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Moments, Journal of Pressure Vessel Technology", Vol. 128. pp. 89-94, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2006
- [17] Circolare ISPESL A00-09/0005411/08 "Procedura ISPESL per la denuncia e la valutazione di recipienti per liquidi e tubazioni già esistenti alla data del 12/2/2005 e comunque commercializzati fino al 29/5/2002 e non certificati PED, in accordo all'art. 16 del D.M. 329/04."