

# ANÁLISIS COMPARATIVO TENSIONAL EN CODOS DE SISTEMAS DE CAÑERÍAS APLICANDO EL MARGEN NORMATIVO DE SEGURIDAD<sup>1</sup>

Alejandro José Giudici<sup>2</sup>, Nicolás Federico Wechselberg<sup>3</sup>,  
José Enrique Stuardi<sup>4</sup>, Guillermo Daniel Chiappero<sup>5</sup>

**RESUMEN:** Los codos son componentes en los sistemas de tuberías cuya función principal es lograr un cambio en la dirección del flujo. Su estudio es relevante, ya que presentan niveles de tensión superiores a los observados en tramos rectos. Las primeras investigaciones determinaron que esto es causado por el efecto de ovalización y la presencia de momentos externos. La capacidad de ovalización de una sección transversal cuando se aplican cargas externas da como resultado una mayor flexibilidad de los codos al disminuir el momento de inercia en comparación con una tubería recta. En este trabajo se estudian los niveles de tensión en codos provocados por momentos externos y presiones internas. Como caso de estudio se propone una serie de codos de varios diámetros y espesores con características adecuadas para la comprensión del fenómeno de la ovalización y la comparación de diferentes metodologías de cálculo. Los esfuerzos obtenidos aplicando los códigos ASME B31.1 y ASME B31.3 se comparan con los obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, a través de un novedoso indicador denominado Margen Normativo de Seguridad. Este indicador considera los esfuerzos admisibles establecidos por las especificaciones para los materiales de los accesorios. Aplicando el Código B31.1 se obtienen márgenes normativos de seguridad superiores a los obtenidos con el B31.3. Para toda la serie en estudio y todo tipo de cargas aplicadas, se obtuvieron menores márgenes normativos de seguridad cuando los accesorios son más flexibles.

**Palabras claves:** codos, Margen Normativo de Seguridad, métodos numéricos, normas, ovalización

## COMPARATIVE STRESS ANALYSIS OF ELBOWS IN PIPING SYSTEMS APPLYING THE NORMATIVE SAFETY MARGIN

**ABSTRACT:** Elbows are components in piping systems whose primary function is to achieve a change in flow direction. Their study is relevant, since they present higher stress levels than those observed in straight sections. Early investigations determined that this effect is caused by the ovalization effect and the presence of external moments. The capacity of a cross section to ovalize when external loads are applied results in increased flexibility of the elbows by decreasing the moment of inertia compared to a straight pipe. In this work, stress levels in elbows caused by external moments and internal pressure are studied. As a case study, a series of elbows of various diameters and thicknesses with suitable characteristics for understanding the phenomenon of ovalization and the comparison of different calculation methodologies is proposed. The stresses obtained by applying the ASME B31.1 and ASME B31.3 codes are compared with those obtained by a numerical model of finite elements, through a novel indicator called the Normative Safety Margin. This indicator considers the admissible stresses established by the specifications for the materials of the accessories. Applying B31.1 Code, higher normative safety margins are obtained than those obtained with B31.3. For the entire series under study and all types of applied loads, lower normative safety margins were obtained when the accessories are more flexible.

**Keywords:** elbows, Normative Safety Margin, numerical methods, standards, ovalization

<sup>1</sup> Artículo recibido el 10 de agosto de 2022 y aceptado para publicación el 13 de abril de 2023.

<sup>2</sup> Profesor Titular, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina. E-mail: ajjudici@unc.edu.ar

<sup>3</sup> Aspirante a Adscripto, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: nicolas.wechselberg@mi.unc.edu.ar

<sup>4</sup> Profesor Titular, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: jose.stuardi@unc.edu.ar

<sup>5</sup> Profesor Adjunto, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: guillermo.chiappero@unc.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

Los codos y curvas se utilizan en los sistemas de cañerías y su función principal es lograr un cambio de dirección del flujo. Es habitual que en estos elementos se presenten niveles de tensión superiores a los observados en los tramos rectos, por ello en la bibliografía de esta temática, se recomienda un análisis tensional más detallado.

Los estudios realizados por Von Kármán (1911) sobre estos accesorios determinaron que una de las causas principales de los elevados niveles de tensión es el efecto de ovalización provocado por la presencia de momentos externos. La ovalización de la sección transversal cuando se aplican cargas externas da como resultado un aumento de la flexibilidad de los codos y curvas en comparación con la cañería recta, y su consecuente aumento de las deformaciones y de los niveles de tensión. Von Kármán introdujo las nociones de "factor de flexibilidad" y "factor de intensificación de la tensión" para comparar estos aumentos de flexibilidad y tensión respecto a las de una cañería recta equivalente. Clark y Reissner (1951) y Rodabaugh y George (1957), formalizaron los factores de flexibilidad e intensificación de tensiones que se introdujeron en el análisis convencional de los sistemas de cañerías. Códigos y normas, tales como los ASME B31.1 y ASME B31.3, consideran el efecto de la ovalización de los codos y curvas de la tubería mediante el uso de estos factores, los cuales permanecen sin cambios hasta la actualidad. Es importante destacar que estos factores se obtuvieron para el caso específico de un momento flector de cierre en el plano y presión interna; pero se utilizan, generalmente sin modificación, para momentos flectores de apertura en el plano, momentos flectores fuera del plano y momentos torsores.

A lo largo de las últimas décadas, se presentaron numerosos trabajos que comparan las tensiones en codos y curvas calculadas con los factores de intensificación normativos con valores experimentales y/o determinados por el método de los elementos finitos (MEF). En general estos trabajos, tratan casos específicos, tanto en la geometría de los accesorios como en las cargas aplicadas, por ello sus resultados se limitan a los casos tratados (Sobel, 1977; Quezon, 1984, Matzen y Yu, 1998; Lubis y Boyle, 2004, Shi et al., 2010, Kireev et al., 2013, Abdulhameed et al., 2017, Jacimovic, 2018, Jacimovic et al., 2021).

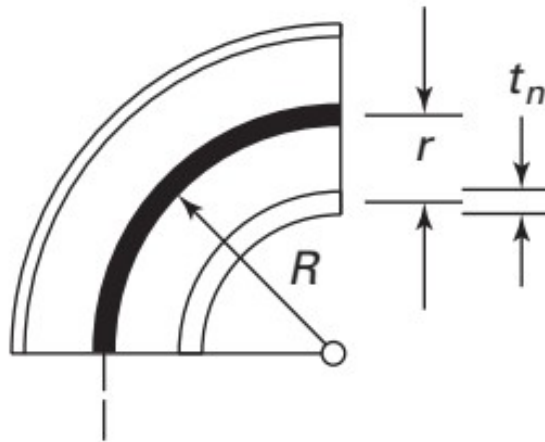
## OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo es estudiar los estados tensionales en codos provocados por la presencia de momentos externos y presión interna del fluido que transportan los sistemas de cañerías.

Se plantea como caso de estudio una serie de codos de diversos diámetros y espesores de pared que presentan características adecuadas para el análisis y comprensión de fenómeno de la ovalización, la comparación de las metodologías de cálculo y la discusión de los resultados obtenidos. Se comparan los resultados calculados mediante la aplicación de los códigos y normas vigentes con aquellos obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, a fin de profundizar el estudio de los estados tensionales en estos elementos y determinar los márgenes de seguridad que se obtienen de esa comparación, según las cargas aplicadas.

## CASO DE ESTUDIO

Los codos de la serie que se estudian son de  $90^\circ$  y radio largo (RL) y dimensionalmente responden a la norma ASME B16.9 (2018). Se tomaron tres diámetros nominales típicos para cañería, 150 mm (6"), 300 mm (12") y 600 mm (24"). En la Figura 1 se muestra las dimensiones características de los codos, donde  $t_n$  es el espesor nominal del codo,  $R$  es el radio de curvatura y  $r$  es el radio medio del codo.



**Figura 1: Codo para soldar (ASME B31.1, 2020).**

En la Tabla 1 se detallan las características dimensionales de los codos seleccionados en la serie.

**Tabla 1: Codos de la serie de 90° y radio largo (RL).**

Diámetro nominal ( $D_n$ ) (mm/")	150 / 6		300 / 12		600 / 24	
Diámetro externo ( $D_o$ ) (mm)	168,3		323,8		610	
Espesor nominal ( $t_n$ ) (mm)	2,77	7,11	3,96	9,53	6,35	17,48
Denominación espesor	Sch.5	Sch.40 - STD	Sch.5	STD	Sch.10	Sch.40
Radio medio ( $r$ ) (mm)	82,8	80,6	159,9	157,1	301,8	296,3
Radio de curvatura $R$ (mm) (RL)	229,0		457,0		914,0	
Flexibilidad característica ( $h$ )	0,093	0,251	0,071	0,176	0,064	0,182

La flexibilidad característica  $h$  es un parámetro que indica la capacidad de flexionarse que tiene un codo, y se define como:

$$h = \frac{t_n R}{r^2} \quad (1)$$

En la Tabla 1 se puede observar que, para cada diámetro, se seleccionaron codos de “baja y alta” flexibilidad característica; esto para incluir en la serie un rango amplio de codos desde el punto de vista de su flexibilidad.

El material constitutivo de los codos de la serie es acero API 5L X52, típico de los sistemas de cañerías, cuya tensión de fluencia es  $S_y = 360$  MPa y tensión de rotura  $S_u = 455$  MPa. Además, se adopta como módulo de Young  $E = 206.000$  MPa y módulo de Poisson  $\nu = 0,3$ .

Las cargas aplicadas, tanto la presión interna  $P$  como los momentos  $M$ , son relacionadas con la tensión de fluencia considerando las tensiones que ellas provocan en el codo y evitando aplicar cargas excesivas.

Para determinar el rango de presiones a aplicar en el codo se utiliza la fórmula de Barlow, que define la tensión circunferencial  $S_c$  provocada sólo por la presión interna  $P$ :

$$S_c = \frac{P D_o}{2 t_n} \Rightarrow P = \frac{2 S_c t_n}{D_o} \quad (2)$$

El rango de tensiones circunferenciales propuesto y consecuentemente el rango de presiones adoptado es:

$$0 \leq S_c \leq 0,5 S_y \Rightarrow 0 \leq P \leq \frac{360 t_n}{D_o} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Para determinar el rango de momentos a aplicar en el codo se utiliza la fórmula de tensión simple (asumiendo en primera instancia la presencia de solo un momento flector) para determinar la tensión longitudinal  $S_l$ :

$$S_l = \frac{M}{Z} \Rightarrow M = S_l Z \quad (4)$$

donde  $Z$  es el módulo resistente de la sección anular del codo:  $Z = \pi r^2 t_n$

El rango tensiones longitudinales propuesto y consecuentemente el rango de momentos adoptados son:

$$0 \leq S_l \leq 0,2 S_y \Rightarrow 0 \leq M \leq 72 Z \text{ [Nmm]} \quad (5)$$

Es importante destacar que en este trabajo se adoptan los espesores nominales establecidos por la norma ASME B16.9 (2018) para determinar los parámetros geométricos y las tensiones establecidas por los códigos estudiados, si bien los espesores reales encontrados habitualmente en los codos fabricados exceden los nominales.

## DETERMINACIÓN DE TENSIONES APLICANDO LOS CÓDIGOS VIGENTES

En este punto se presenta la metodología utilizada para la determinación de las tensiones existentes en un codo de acuerdo con los rangos de presiones internas y momentos adoptados.

En los dos códigos estudiados, ASME B31.1 y ASME B31.3, las verificaciones previstas tratan las tensiones circunferenciales y longitudinales de manera independiente. A modo de ejemplo, se presenta la metodología para determinar las tensiones según el Código ASME B31.1, indicando que los resultados obtenidos para el otro código resultan de aplicar sus correspondientes verificaciones.

A partir de la verificación de la norma respecto al espesor mínimo requerido  $t_m$  para una curva, se determina la tensión circunferencial:

$$t_m = \frac{P D_o}{2(S E / I + P y)} + A \quad (6)$$

donde:  $S$  es la tensión admisible del material a la temperatura de diseño,  $E$  es el factor de eficiencia de junta, en este caso es  $E = 1$  teniendo en cuenta que estos accesorios son forjados;  $y$  es un factor que depende el tipo de material y la temperatura de trabajo, en este caso  $y = 0,4$ ;  $A$  es el espesor adicional, se adopta  $A = 0$  e  $I$  es el factor de multiplicación debido a la curvatura, que para la parte interna de la curva es:  $I = (4(R/D_o) - 1) / (4(R/D_o) - 2)$ .

De acuerdo con lo indicado, la tensión circunferencial puede ser despejada de la ecuación 6 considerando el espesor nominal de los codos  $t_n$ :

$$S_c = \left( \frac{P D_o}{2 t_n} - P y \right) I \quad (7)$$

Para la tensión longitudinal  $S_l$ , se adopta la siguiente expresión del código:

$$S_l = \frac{P D_o}{4 t_n} + \frac{C_i M}{Z} \quad (8)$$

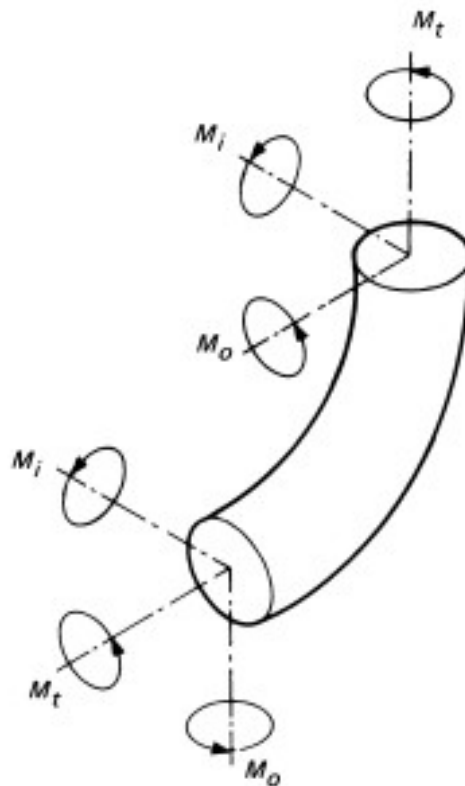
donde:  $C_i = \text{mayor}(1; 0,75 i)$ ,  $i$  es el factor de intensificación de tensiones y  $M$  es el momento resultante aplicado.

El factor de intensificación de tensiones  $i$  se define:

$$i = \frac{0,9}{h^{2/3}} \quad (9)$$

El momento resultante aplicado  $M$  resulta de considerar todos los posibles momentos presentes en la sección en estudio: el momento en el plano del codo  $M_i$ , el momento flector fuera de plano del codo  $M_o$  y el momento torsor  $M_t$  (ver Figura 2):

$$M = \sqrt{(M_i)^2 + (M_o)^2 + (M_t)^2} \quad (10)$$



**Figura 2: Momentos aplicados de los extremos del codo o curva (ASME B31.1, 2020).**

En codos y curvas de gran diámetro y de pared delgada, se debe considerar que la presión interna puede disminuir el factor de intensificación de tensiones  $i$ . En tal caso se aplica el factor de intensificación de tensiones ajustado  $i_p$ :

$$i_p = \frac{i}{1 + 3,25 (P/E_Y) (r/t_n)^{5/2} (R/r)^{2/3}} \quad (11)$$

donde  $E_Y$  es el módulo de Young.

Tanto la tensión circunferencial  $S_c$  como la tensión longitudinal  $S_l$  deben resultar menores o iguales a la tensión admisible a máxima temperatura de trabajo  $S_h$ :

$$S_c \leq S_h \quad ; \quad S_l \leq S_h \quad (12)$$

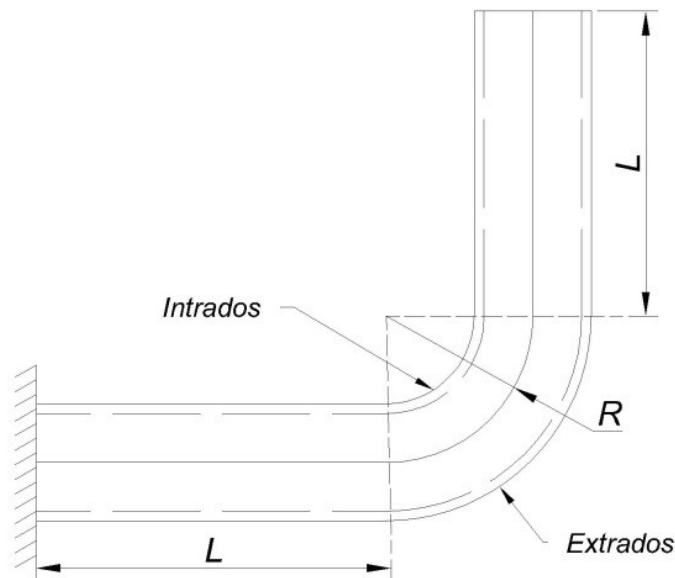
En este trabajo se adopta como máxima temperatura de trabajo la correspondiente a la temperatura de ambiente, entonces  $S_h = S$ .

Las tensiones admisibles para los materiales establecidas en este Código ASME B31.1, sigue los lineamientos adoptados en el Apéndice 1 de la Parte D del Código ASME BPVC.II (2021). Para el tipo de acero adoptado para los codos de la serie estudiada (API 5L X52), la tensión admisible es:

$$S = \frac{S_u}{3,5} \Rightarrow S = 130 \text{ [MPa]} \quad (13)$$

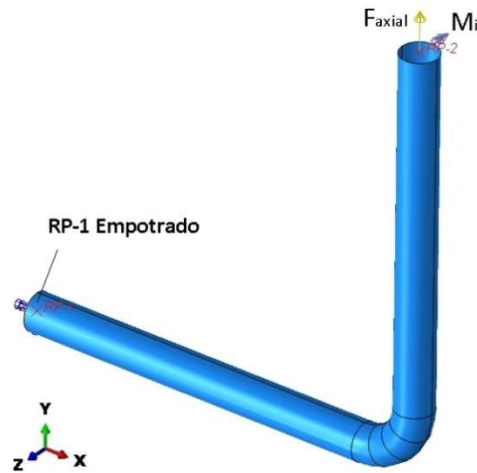
### DETERMINACIÓN DE TENSIONES APLICANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

Para el análisis numérico de la serie de codos en estudio se utilizó el método de los elementos finitos (MEF) empleando un software comercial. La configuración utilizada en este trabajo es un codo de 90° de RL que está unido en sus extremos a dos tramos de cañería recta (ver la Figura 3). Esta configuración es frecuentemente utilizada para estudiar el comportamiento mecánico de codos y curvas (Abdulhameed et al., 2017). La longitud de cada uno de los tramos rectos  $L$  es diez veces el diámetro exterior de la cañería ( $L = 10 D_o$ ), de modo que el codo no sea afectado por las condiciones de apoyo de los extremos del modelo (Matzen y Yu, 1998).

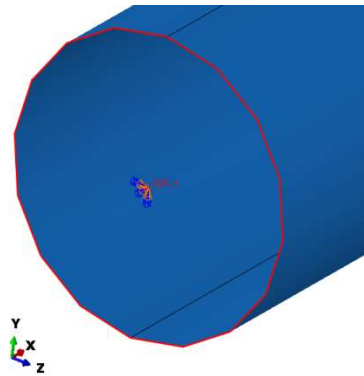


**Figura 3: Configuración adoptada para el análisis numérico.**

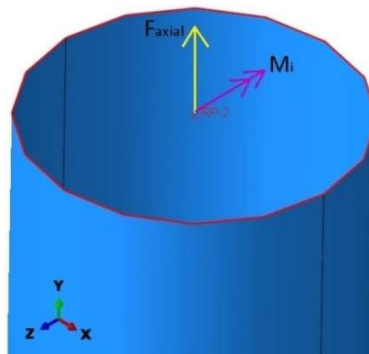
Para facilitar la definición de las condiciones de borde se generaron dos puntos de referencia RP-1 y RP-2 situados en el eje longitudinal y en las respectivas secciones transversales de apoyo, como se muestra en la Figura 4. Estos puntos están vinculados a cada una de las secciones extremas del modelo (bordes rojos) mediante una restricción de acoplamiento cinemático, que permite el desplazamiento radial de las secciones finales de la cañería (ver Figuras 5 y 6).



**Figura 4: Modelo para el análisis numérico.**



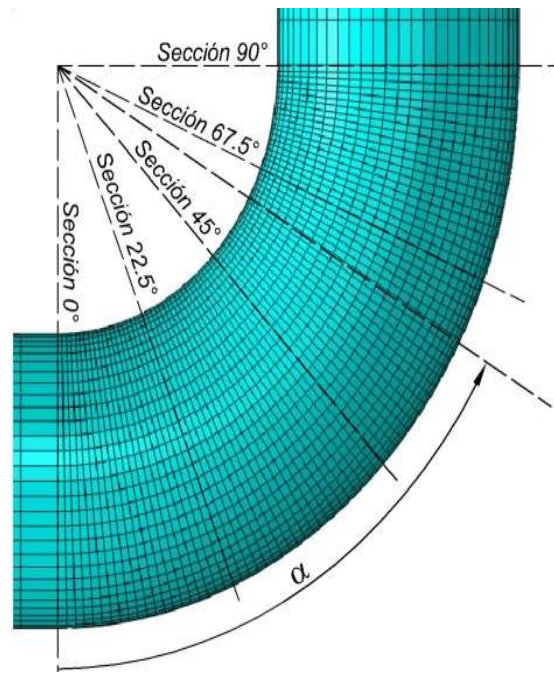
**Figura 5: Detalle condición de apoyo. RP-1 empotrado.**



**Figura 6: Detalle condición de borde. Cargas aplicadas en RP-2.**

Respecto a los apoyos y las cargas, el punto de referencia RP-1 se lo define como empotrado, mientras que en el punto de referencia RP-2 se aplican los momentos externos. La presión se incorpora en la cara interior del conjunto. Es importante destacar que la aplicación de la presión en la cara interna del codo genera una fuerza que tiende a “enderezar” el modelo, esto se lo conoce como “efecto Bourdon”. El origen de esta fuerza es la mayor superficie expuesta a la presión interna que tiene el codo en su parte exterior, “extrados” respecto a la parte interior “intrados” (ver Figura 3). Para equilibrar la componente vertical de esta fuerza se aplica una fuerza axial en el punto de referencia RP-2 y la componente horizontal se equilibra en el punto de empotramiento RP-1.

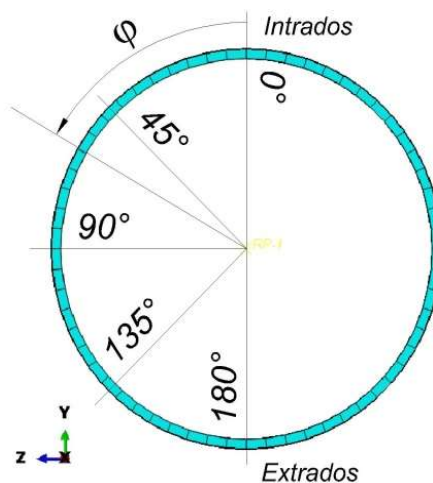
Tanto el codo como los tramos rectos se modelan utilizando elementos de cáscara cuadrilátero de cuatro nodos con integración reducida. El tamaño de la malla se densifica en el codo para captar más adecuadamente las variaciones en deformaciones y tensiones (ver Figura 7). Se utiliza un material elástico lineal para el modelo en estudio.



**Figura 7: Detalle del modelo del codo y sus secciones transversales con indicación del ángulo  $\alpha$ .**

Las tensiones que se consideran para este trabajo son las circunferenciales, longitudinales y de Von Mises obtenidas del modelo en las distintas secciones perpendiculares al desarrollo del codo (Cook y Young, 1999). Además, se analizan las tensiones en las fibras exteriores, interiores e intermedias según el espesor de elemento para las distintas secciones  $\alpha$  en el plano XY y para distintos puntos de su sección transversal (ver Figura 7).

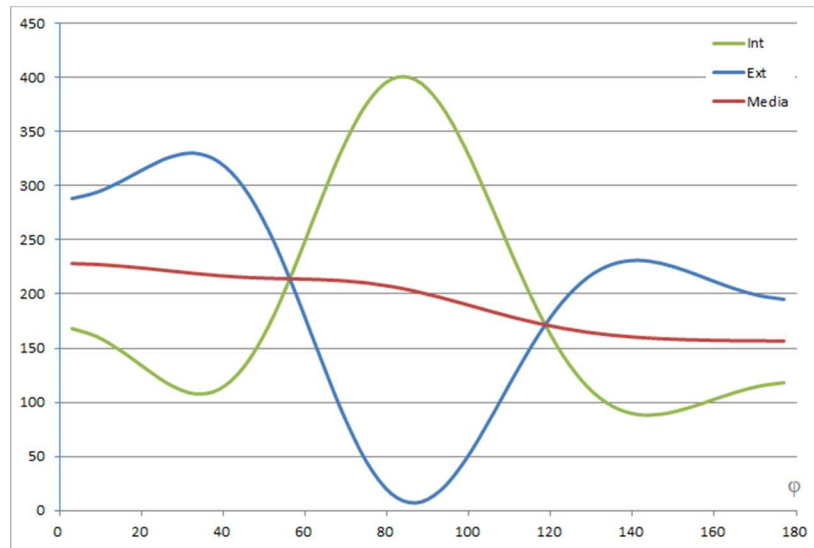
La Figura 8 representa una sección del codo, donde el sector interior (intradós) se lo ubica a  $\varphi = 0^\circ$  y el exterior (extradós) a  $\varphi = 180^\circ$ .



**Figura 8: Sección del codo con indicación del ángulo  $\varphi$ .**

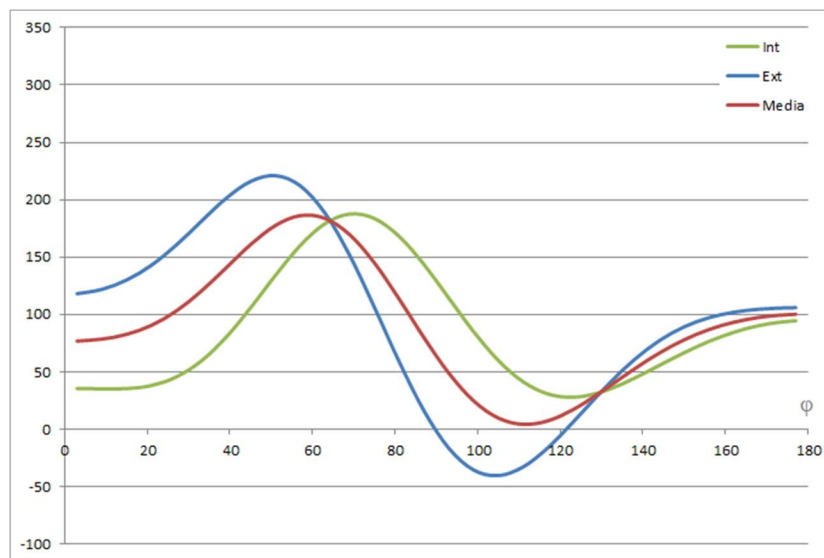


Para las distintas configuraciones de la serie en estudio, la sección más comprometida del codo es la sección  $\alpha = 45^\circ$ . En las Figuras 9, 10 y 11 se muestran las tensiones circunferenciales, longitudinales y de Von Mises presentes en la sección  $\alpha = 45^\circ$  de un codo de  $D_n = 300$  mm (12"),  $t_n = 9,53$  mm, con un momento flector en el plano del codo de  $M_i = 2,66 \times 10^7$  N mm (corresponde a  $M = 36 Z$ , según la ecuación 5), que provoca la apertura del conjunto (ver Figura 4), presión interna  $P = 10,6$  MPa (corresponde a  $P = 360 t_n / D_o$ , según la ecuación 3) y como fuerza axial  $F = 8,71 \times 10^5$  N. Con color verde se indica las tensiones en las fibras interiores, con color azul las tensiones en las fibras exteriores y con rojo las tensiones de las fibras medias.

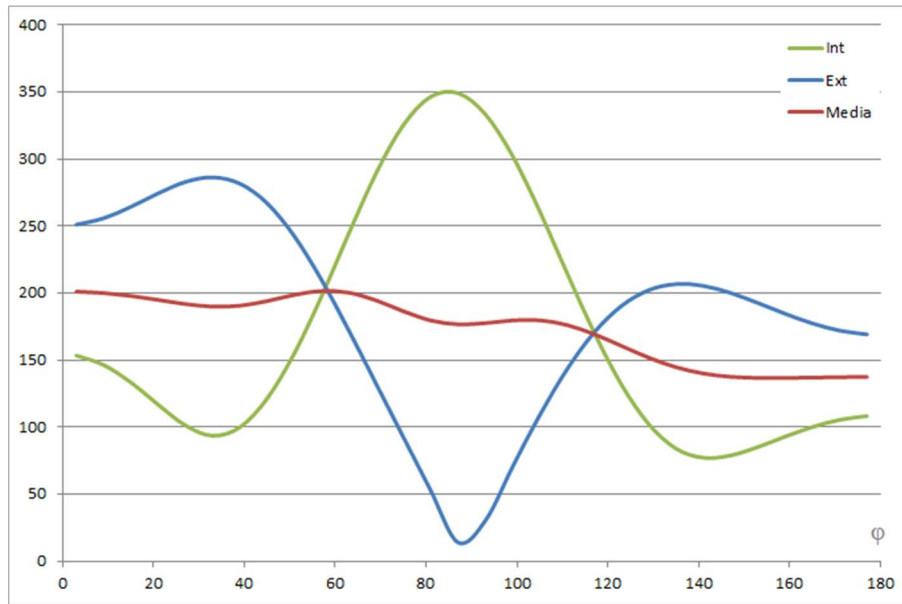


**Figura 9: Tensiones circunferenciales (MPa) en codo de 300 mm (sección  $\alpha = 45^\circ$ ).**

Cuando el momento flector aplicado tiende a cerrar el conjunto, es decir es de sentido opuesto al caso anterior, las tensiones circunferenciales y longitudinales, tienen la misma magnitud, pero de signo opuesto, es decir que las curvas resultantes se presentan espejadas respecto al eje de abscisas para las Figuras 9 y 10, mientras que las tensiones de Von Mises presentan el mismo comportamiento que el mostrado en la Figura 11.

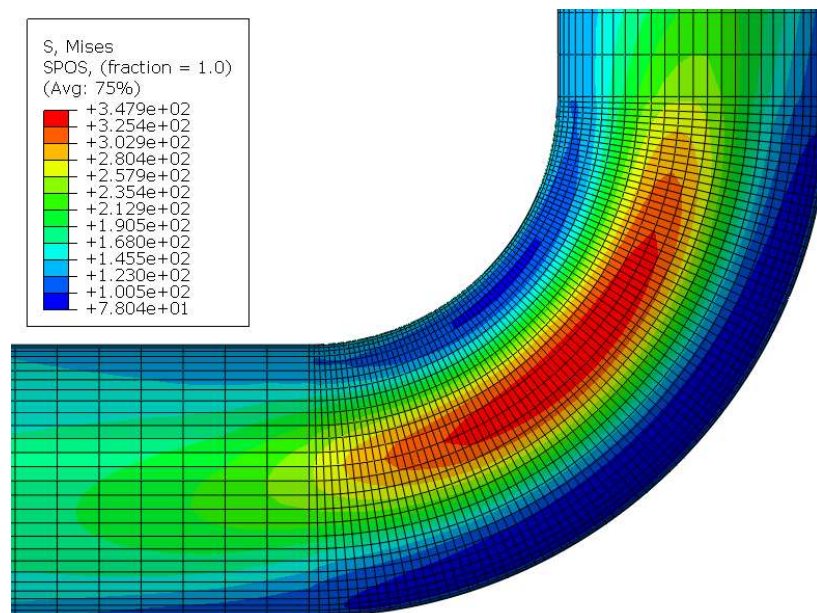


**Figura 10: Tensiones longitudinales (MPa) en codo de 300 mm (sección  $\alpha = 45^\circ$ ).**

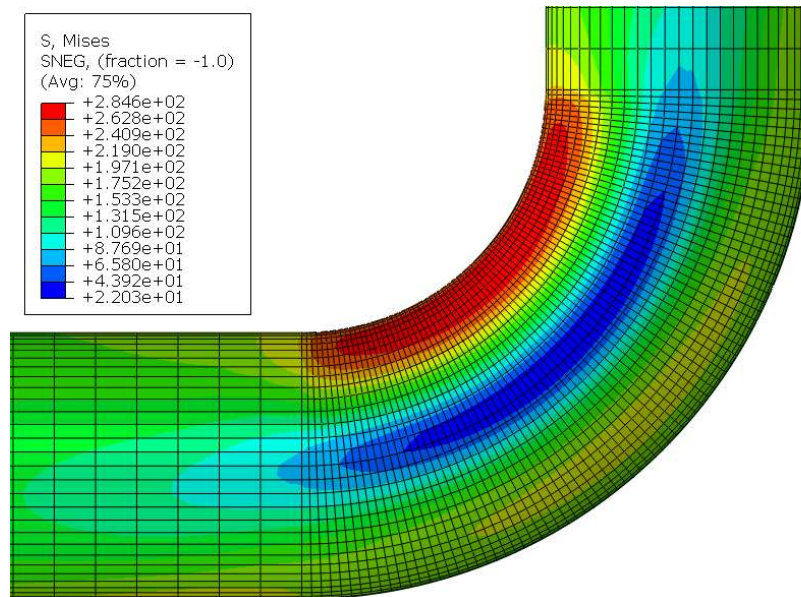


**Figura 11: Tensiones de Von Mises (MPa) en codo de 300 mm (sección  $\alpha = 45^\circ$ ).**

En la Figura 12, se presenta el codo de 300 mm donde se muestra las tensiones de Von Mises en las fibras internas; mientras que en la Figura 13, se muestra las tensiones de Von Mises en las fibras externas.



**Figura 12: Detalle del codo y las tensiones de Von Mises en las fibras internas.**



**Figura 13: Detalle del codo de 300 mm y las tensiones de Von Mises en las fibras externas.**

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para comparar los resultados calculados mediante la aplicación de los códigos AB31.1 o ASME B31.3 con aquellos obtenidos por el MEF se define un indicador que llamaremos Margen Normativo de Seguridad (*MNS*). Este índice compara dos relaciones de tensiones, en el numerador la relación calculada por la aplicación del código y en el denominador la relación que incluye la tensión obtenida por MEF, de la siguiente manera:

$$MNS = \frac{\text{mayor}(S_c, S_l)/S}{S_{VM}/S_u} \quad (14)$$

La relación correspondiente al código considera la mayor de las tensiones, circunferencial  $S_c$  o longitudinal  $S_l$ , calculadas en un punto del codo frente a la tensión admisible  $S$  establecida por dicho código (ver ecuaciones 12 y 13). La relación en el denominador considera la tensión obtenida por el MEF respecto a la tensión de rotura  $S_u$  del material.

Así definido, el *MNS* es un parámetro de control que permite evaluar el nivel de seguridad de los códigos estudiados frente a los resultados numéricos de los casos de estudio. En un punto del accesorio, si el *MNS* es mayor a uno se puede asegurar que cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código que se está aplicando, la tensión de Von Mises no supera la tensión de rotura  $S_u$  del material. Por otra parte, el *MNS* menor a uno indica que la tensión de Von Mises ha superado la tensión de rotura  $S_u$  del material aun cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código.

En primera instancia se comparan los resultados obtenidos por la aplicación de los códigos estudiados, ASME B31.1 y ASME B31.3 y los correspondientes al MEF, para el caso del codo de  $D_n = 300$  mm (12”), espesores  $t_n$  igual a 3,96 mm y 9,53 mm, con presión interna  $P$  y un momento flector en el plano del codo ( $M$ ) variables en el rango de estudio.

En las Tablas 2 y 3 se comparan las tensiones resultantes de la aplicación creciente de las cargas externas. En la columna 1 se indica la presión interna aplicada creciente en el codo dentro del rango establecido en la ecuación 3 y en la columna 2 se presenta el momento flector aplicado creciente dentro del

rango establecido en la ecuación 5. En las columnas 3 y 4 se muestran las tensiones circunferenciales y longitudinales determinadas por el Código ASME B31.1 y la relación de la mayor de ellas (columna 5) con la tensión admisible del material (columna 6). Para este código la tensión admisible es  $S = 130$  MPa, según la ecuación 13. Además, se incluye las máximas tensiones de Von Mises  $S_{VM}$ , en el codo obtenidas por el MEF (columna 7) y su relación con la tensión de rotura del material  $S_u = 455$  MPa (columna 8). En la columna 9 se presenta el  $MNS$  que surge de la relación entre las columnas 6 y 8

**Tabla 2: Comparación de tensiones en codos de  $D_n = 300$  mm (12”) y  $t_n = 3,96$  mm – Código ASME B31.1 y MEF.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ (MPa)	$M_i$ (Nmm)	$S_c$	$S_l$	mayor ( $S_c, S_l$ ) (a)	(a) / $S$ (%) (b)	$S_{VM}$	$S_{VM} / S_u$ (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	71	71	55%	179	39%	1,39
	36 Z	0	142	142	109%	358	79%	1,39
	54 Z	0	213	213	164%	536	118%	1,39
	72 Z	0	284	284	218%	714	157%	1,39
90 $t_n/D_o$	0	56	23	56	43%	50	11%	3,90
	18 Z	56	75	75	58%	216	47%	1,22
	36 Z	56	127	127	98%	395	87%	1,12
	54 Z	56	179	179	138%	573	126%	1,09
	72 Z	56	231	231	178%	750	165%	1,08
180 $t_n/D_o$	0	111	45	111	85%	101	22%	3,86
	18 Z	111	86	111	85%	253	56%	1,53
	36 Z	111	127	127	98%	433	95%	1,03
	54 Z	111	168	168	129%	610	134%	0,96
	72 Z	111	209	209	161%	787	173%	0,93
270 $t_n/D_o$	0	167	67	167	128%	151	33%	3,88
	18 Z	167	101	167	128%	291	64%	2,01
	36 Z	167	135	167	128%	470	103%	1,24
	54 Z	167	169	169	130%	647	142%	0,91
	72 Z	167	203	203	156%	825	181%	0,86
360 $t_n/D_o$	0	223	90	223	172%	201	44%	3,88
	18 Z	223	119	223	172%	330	73%	2,36
	36 Z	223	148	223	172%	508	112%	1,54
	54 Z	223	177	223	172%	685	150%	1,14
	72 Z	223	206	223	172%	862	189%	0,91

**Tabla 3: Comparación de tensiones en codos de  $D_n = 300$  mm (12") y  $t_n = 9,53$  mm - Código ASME B31.1 y MEF.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ (MPa)	$M_i$ (Nmm)	$S_c$	$S_t$	mayor ( $S_c$ , $S_t$ ) (a)	(a) / $S$ (%) (b)	$S_{VM}$	$S_{VM} / S_u$ (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	39	39	30%	96	21%	1,42
	36 Z	0	77	77	59%	192	42%	1,40
	54 Z	0	116	116	89%	288	63%	1,41
	72 Z	0	155	155	119%	384	84%	1,41
$90 t_n/D_o$	0	55	23	55	42%	50	11%	3,81
	18 Z	55	58	58	45%	135	30%	1,51
	36 Z	55	93	93	72%	231	51%	1,41
	54 Z	55	128	128	98%	327	72%	1,37
	72 Z	55	164	164	126%	423	93%	1,36
$180 t_n/D_o$	0	110	45	110	85%	101	22%	3,82
	18 Z	110	77	110	85%	174	38%	2,21
	36 Z	110	110	110	85%	270	59%	1,43
	54 Z	110	142	142	109%	366	80%	1,36
	72 Z	110	175	175	135%	462	101%	1,33
$270 t_n/D_o$	0	165	67	165	127%	151	33%	3,81
	18 Z	165	98	165	127%	213	47%	2,71
	36 Z	165	128	165	127%	309	68%	1,87
	54 Z	165	157	165	127%	404	89%	1,43
	72 Z	165	188	188	145%	500	110%	1,32
$360 t_n/D_o$	0	220	90	220	169%	202	44%	3,81
	18 Z	220	118	220	169%	253	56%	3,05
	36 Z	220	146	220	169%	348	76%	2,21
	54 Z	220	174	220	169%	444	97%	1,74
	72 Z	220	202	220	169%	539	119%	1,43

En las tablas anteriores están resaltadas en verde aquellas celdas entre las cuales se alcanza la tensión admisible a medida que crecen las cargas aplicadas. A partir de las celdas mencionadas se obtiene el  $MNS$  para las distintas combinaciones de cargas (en azul). Se aprecia que el  $MNS$  varía entre 1,03 y 1,41. Como se indicó precedentemente, estos valores en el  $MNS$  aseguran que ningún punto del codo llegará a la tensión de rotura  $S_u$  del material. Para los casos donde la presión interna es  $P = 270 t_n/D_o$  o  $P = 360 t_n/D_o$ , la tensión calculada por el código supera la tensión admisible (celdas en amarillo) por lo cual en estos tramos no se realiza la comparación.

En las Tablas 4 y 5 se comparan los resultados obtenidos por la aplicación del Código B31.3 y los correspondientes al MEF. Se observa que el  $MNS$  varía entre 0,82 y 1,21 cuando se alcanza la tensión admisible según este código. La tensión admisible establecida por este Código ASME B31.3 para el material adoptado API 5L X52 es  $S = 152$  MPa.

**Tabla 4: Comparación de tensiones en codos de  $D_n = 300$  mm (12") y  $t_n = 3,96$  mm – Código ASME B31.3 y MEF.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ (MPa)	$M_i$ (Nmm)	$S_c$	$S_l$	mayor ( $S_c, S_l$ ) (a)	(a) / $S$ (%) (b)	$S_{VM}$	$S_{VM} / S_u$ (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	71	71	47%	179	39%	1,19
	36 Z	0	142	142	93%	358	79%	1,19
	54 Z	0	213	213	140%	536	118%	1,19
	72 Z	0	284	284	187%	714	157%	1,19
$90 t_n/D_o$	0	56	23	56	37%	50	11%	3,33
	18 Z	56	75	75	49%	216	47%	1,04
	36 Z	56	127	127	84%	395	87%	0,96
	54 Z	56	179	179	118%	573	126%	0,94
	72 Z	56	231	231	152%	750	165%	0,92
$180 t_n/D_o$	0	111	45	111	73%	101	22%	3,30
	18 Z	111	86	111	73%	253	56%	1,31
	36 Z	111	127	127	84%	433	95%	0,88
	54 Z	111	168	168	111%	610	134%	0,82
	72 Z	111	209	209	138%	787	173%	0,79
$270 t_n/D_o$	0	167	67	167	110%	151	33%	3,31
	18 Z	167	101	167	110%	291	64%	1,72
	36 Z	167	135	167	110%	470	103%	1,06
	54 Z	167	169	169	111%	647	142%	0,78
	72 Z	167	203	203	134%	825	181%	0,74
$360 t_n/D_o$	0	223	90	223	147%	201	44%	3,32
	18 Z	223	119	223	147%	330	73%	2,02
	36 Z	223	148	223	147%	508	112%	1,31
	54 Z	223	177	223	147%	685	150%	0,97
	72 Z	223	206	223	147%	862	189%	0,77

El mismo estudio se realiza para los casos de codos de: a)  $D_n = 150$  mm (6"), espesores  $t_n$  igual a 2,77 mm y 7,11 mm y b)  $D_n = 600$  mm (24"), espesores  $t_n$  igual a 6,35 mm y 17,48 mm, con presión interna  $P$  y un momento flector en el plano del codo ( $M_i$ ) variables en los rangos de estudio.

En la Tabla 6 se presentan los rangos del  $MNS$ , para los Códigos ASME B31.1 y ASME B31.3, obtenidos en los codos de diámetros, espesores y flexibilidad característica  $h$ , indicados en la Tabla 1, con cargas aplicadas de presión interna  $P$  y momento flector en el plano del codo ( $M_i$ ), variables en los rangos de estudio.

**Tabla 5: Comparación de tensiones en codos de  $D_n = 300$  mm (12") y  $t_n = 9,53$  mm - Código ASME B31.3 y MEF.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ (MPa)	$M_i$ (Nmm)	$S_c$	$S_i$	mayor ( $S_c, S_i$ ) (a)	(a) / $S$ (%) (b)	$S_{VM}$	$S_{VM} / S_u$ (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	39	39	26%	96	21%	1,21
	36 Z	0	77	77	51%	192	42%	1,20
	54 Z	0	116	116	76%	288	63%	1,20
	72 Z	0	155	155	102%	384	84%	1,21
$90 t_n/D_o$	0	55	23	55	36%	50	11%	3,26
	18 Z	55	58	58	38%	135	30%	1,29
	36 Z	55	93	93	61%	231	51%	1,21
	54 Z	55	128	128	84%	327	72%	1,17
	72 Z	55	164	164	108%	423	93%	1,16
$180 t_n/D_o$	0	110	45	110	72%	101	22%	3,26
	18 Z	110	77	110	72%	174	38%	1,89
	36 Z	110	110	110	72%	270	59%	1,22
	54 Z	110	142	142	93%	366	80%	1,16
	72 Z	110	175	175	115%	462	101%	1,14
$270 t_n/D_o$	0	165	67	165	109%	151	33%	3,26
	18 Z	165	98	165	109%	213	47%	2,32
	36 Z	165	128	165	109%	309	68%	1,60
	54 Z	165	157	165	109%	404	89%	1,22
	72 Z	165	188	188	124%	500	110%	1,12
$360 t_n/D_o$	0	220	90	220	145%	202	44%	3,26
	18 Z	220	118	220	145%	253	56%	2,61
	36 Z	220	146	220	145%	348	76%	1,89
	54 Z	220	174	220	145%	444	97%	1,48
	72 Z	220	202	220	145%	539	119%	1,22

**Tabla 6: Rangos del margen normativo de seguridad ( $MNS$ ), con presión interna  $P$  y un momento flector en el plano del codo ( $M_i$ ), variables en los rangos de estudio.**

Diámetro nominal ( $D_n$ ) (mm")	150 / 6		300 / 12		600 / 24	
Diámetro externo ( $D_o$ ) (mm)	168,3		323,8		610	
Espesor nominal ( $t_n$ ) (mm)	2,77	7,11	3,96	9,53	6,35	17,48
Denominación espesor	Sch.5	Sch.40 – STD	Sch.5	STD	Sch.10	Sch.40
Flexibilidad característica $h$	0,093	0,251	0,071	0,176	0,064	0,182
Rangos $MNS$ – ASME B31.1	1,20 -1,41	1,42 -1,48	1,03 -1,39	1,36 -1,41	0,93 -1,38	1,36 -1,40
Rangos $MNS$ – ASME B31.3	0,97 -1,20	1,20 -1,24	0,82 -1,19	1,16 -1,21	0,74 -1,18	1,15 -1,20

Para completar el estudio, se aplica el rango de momentos no solo en el plano del codo ( $M_i$ ), sino momentos flectores aplicados fuera del plano ( $M_o$ ), momentos torsores ( $M_t$ ) y una combinación de los tres momentos mencionados anteriormente. La combinación de momentos corresponde al caso cuyos módulos son  $|\overline{M}_j| = \sqrt{3}/3$  por lo tanto el vector final se ubica a  $45^\circ$  de los ejes principales.

En la Tabla 7 se presentan los rangos del *MNS*, para los Códigos ASME B31.1 y ASME B31.3, obtenidos para el diámetro  $D_n = 300$  mm (12”), con cargas aplicadas de presión interna  $P$  y un momento según lo indicado precedentemente.

**Tabla 7: Rangos del margen normativo de seguridad (*MNS*), con presión interna  $P$ , momento flector aplicado fuera del plano ( $M_o$ ), momento torsor ( $M_t$ ) y combinaciones de los tres momentos, variables en los rangos de estudio.**

Diámetro nominal ( $D_n$ ) (mm/”)	300 / 12					
Diámetro externo ( $D_o$ ) (mm)	323,8					
Espesor nominal ( $t_n$ ) (mm)	3,96	9,53	3,96	9,53	3,96	9,53
Denominación espesor	Sch.5	STD	Sch.5	STD	Sch.5	STD
Flexibilidad característica $h$	0,071	0,176	0,071	0,176	0,071	0,176
Carga aplicada	Momento flector fuera del plano ( $M_o$ )		Momento torsor ( $M_t$ )		Combinación de los tres momentos ( $M_i$ , $M_o$ y $M_t$ )	
Rangos <i>MNS</i> – ASME B31.1	1,45 -2,28	1,83 -2,12	1,45 -2,28	1,82 -2,12	1,35 -2,07	1,87 -2,16
Rangos <i>MNS</i> – ASME B31.3	1,09 -1,63	1,36 -1,51	0,49 -0,76	0,84 -0,99	0,98-1,36	1,38 -1,47

De la observación de las Tablas 6 y 7, surge en primera instancia que los *MNS* obtenidos con el Código B31.1 son mayores respecto a los del Código B31.3. En casi todos los casos estos son mayores a uno (con la única excepción correspondiente a los codos de 600 mm (24”) de mayor flexibilidad), llegando a valores mayores a 2 cuando las cargas son momento flector fuera del plano  $M_o$ , momento torsor  $M_t$  o combinación de los tres momentos ( $M_i$ ,  $M_o$  y  $M_t$ ).

Los *MNS* obtenidos con el Código B31.3 son menores a los del Código B31.1, siendo una de las causas principales, la mayor tensión admisible establecida por el Código B31.3 para el material seleccionado.

Además, los diferentes coeficientes de intensificación de tensiones (o su distinta aplicación) en los códigos en estudio, pueden dar como resultado tensiones de trabajo distintas, frente a la aplicación de las mismas cargas. Esto sucede cuando se aplica momento flector fuera del plano  $M_o$  o momento torsor  $M_t$ ; en estos casos aplicando el Código B31.1 se obtienen tensiones de trabajo mayores a los resultados obtenidos por el otro código. Esto trae como consecuencia que los *MNS* del Código B31.1 sean los mayores.



Por otra parte, para todos los diámetros de los codos y todos los tipos de cargas aplicadas, los *MNS* son menores cuando los accesorios presentan menor flexibilidad característica *h*. Esto indica que cuando los codos tienen más condiciones para la ovalización (menor *h*) los resultados obtenidos por los códigos son menos conservativos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron los estados tensionales en codos provocados por la presencia de momentos externos y presión interna del fluido que transportan los sistemas de cañerías.

Se planteó como caso de estudio una serie de codos de diversos diámetros y espesores de pared con características adecuadas para el análisis y comprensión del fenómeno de la ovalización. Se compararon los resultados obtenidos mediante la aplicación de los códigos ASME B31.1 y ASME B31.3 con los obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, con el objetivo de profundizar el estudio de los estados tensionales en estos elementos y visualizar los márgenes de seguridad presentes según las cargas aplicadas.

Se definió como margen normativo de seguridad (*MNS*) a la relación de tensiones establecida por los códigos ASME con la relación de tensiones de Von Mises calculadas por MEF y la tensión de rotura del material, de manera de definir un parámetro de control que indique la presencia de tensiones de rotura no detectadas mediante los cálculos normativos. De esta forma, un *MNS* mayor a uno asegura que cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código que se está aplicando, la tensión de Von Mises no supera la tensión de rotura  $S_u$  del material. En cambio, cuando el *MNS* es menor a uno indica que la tensión de Von Mises ha superado la tensión de rotura del material aun cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código.

Se concluyó que los márgenes normativos de seguridad obtenidos con el Código B31.1 son mayores respecto a los del Código B31.3, siendo una de las causas principales la mayor tensión admisible establecida por el Código B31.3 para el material seleccionado. Se determinó que los márgenes normativos de seguridad son afectados por los diferentes coeficientes de intensificación de tensiones (o su distinta aplicación) según el código en estudio, pudiendo dar como resultado tensiones de trabajo distintas, frente a la aplicación de las mismas cargas; en todos los casos aplicando el Código B31.1 se obtienen tensiones de trabajo mayores a los resultados obtenidos por el otro código.

Para toda la serie en estudio y todos los tipos de cargas aplicadas, se obtuvieron menores márgenes normativos de seguridad cuando los accesorios tenían menor flexibilidad característica, es decir cuando los codos tienen más condiciones para la ovalización. Se concluye que los códigos estudiados son menos conservativos para los accesorios más flexibles.

Como conclusión general se indica que en casi toda la serie de codos en estudio y con todos los tipos de cargas aplicadas, el cumplimiento de las verificaciones pedidas por el Código ASME B31.1 garantizó que en estos accesorios no se supere la tensión de rotura del material. Cuando se aplica el Código B31.3 se observó que, en los casos donde los codos son flexibles o la carga aplicada principal es momento torsor, se presentaron sectores en los codos que superan la tensión de rotura del material. La seguridad en estos casos quedaría librada a la existencia de sobre espesores, los que son habituales en la fabricación de los accesorios o a otros fenómenos, tal como la redistribución de tensiones. Por lo expuesto, se considera necesario tener en cuenta lo expuesto anteriormente y eventualmente realizar un análisis con métodos numéricos en aquellos casos donde los niveles de tensión obtenidos por el Código B31.3 superan el 80% de la tensión admisible, o cuando el esfuerzo predominante es la torsión.

## REFERENCIAS

- Abdulhameed D., Martens, M., Roger Cheng, J.J. y Adeeb, S. (2017). "Investigation of Smooth Pipe Bends under the Effect of In-Plane Bending". *Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference*. PVP2017 - 65818.
- ASME B16.9 (2018). "Factory-Made Wrought Butt Welding Fittings", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- ASME B31.1 (2020). "Power Piping", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- ASME B31.3 (2020). "Process Piping", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- ASME BPVC II (2021). "Boiler and Pressure Vessel Code, Section II", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- Clark, R.A. y Reissner, E. (1951). "Bending of Curved Tubes". *Advances in Applied Mechanics*. Vol. II, pp. 93-122.
- Cook, R.D. y Young, W.C. (1999). "Advanced Mechanics of Materials", Prentice Hall, New Jersey, NJ, USA.
- Jacimovic, N. (2018). "Analysis of Piping Stress Intensification Factors based of Numerical Models". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 163, pp. 8–14.
- Jacimovic, N., Ivancic, Z. y Ivosevic, M. (2021). "Finite element analysis of 90-degree pipe elbow sustained stress indices". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol.192, 104401.
- Kireev, O., Kireev, D. y Berkovsky, A. (2013). "Parametric Study of Flexibility Factor for Curved Pipe and Welding Elbows". *Transactions of 22<sup>nd</sup> Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, San Francisco, California, USA
- Lubis, A. y Boyle, J.T. (2004). "The Pressure Reduction Effect in Smooth Piping Elbows – Revisited". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 81, pp. 119–125.
- Matzen, B.C. y Yu, L. (1998). "Elbow Stress Indices using Finite Element Analysis". *Nuclear Engineering and Design*. Vol.181, pp. 257–65.
- Quezon, A.J. (1984). "Effect of Internal Pressure on Flexibility and Stress Intensification Factors for Pipe Elbows Analyzed by the Finite Element Method". Report DTNSRDC/CMLD-84/19, David Taylor Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Maryland, USA.
- Rodabaugh, E.C. y George, H.H. (1957). "Effect of internal pressure on flexibility and stress-intensification factors of curved pipes or welding elbows". *Transactions of the ASME*. Vol.79. pp. 939–948.
- Shi, J., Lee, G., Blythe, D., Buckland, J., Lie, Y. y Soanes, T. (2010). "Stress Predictions at Elbow Ends under Internal Pressure and System Moments". *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference*. PVP2010 - 25055.
- Sobel, L.H. (1977). "In Plane Bending of Elbow". *Computers & Structures*. Vol. I, pp. 701-715.
- Von Karman, Th. (1911). "Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleich Rohre", *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*. Vol. 55, Part 2. pp. 1889-1895