

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

“Metodología para Verificación de Espesores en Tuberías Curvadas y Sometidas a Presión Interna para Transporte de Hidrocarburos Líquidos.”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Examen Complexivo

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Eduardo Marcos Villavicencio Sañay

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTO

A Dios, mi madre y mi Padre que hicieron posible mi educación y me guiaron en cada momento de mi vida.

A mis amigos que de una u otra manera colaboraron con la realización de este TFG.

DEDICATORIA

A DIOS

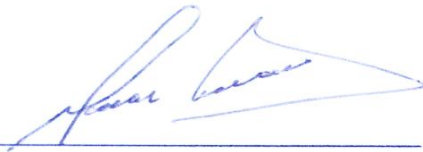
A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI FAMILIA

A MIS AMIGOS

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



VOCAL
Ing Omar Serrano V.




VOCAL
Ing. Jorge Marcial H.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de examen complejo me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Eduardo Villavicencio Sañay

RESUMEN

Existen proyectos en que la ingeniería es desarrollada por una determinada empresa y la construcción del proyecto por otra empresa, esta situación da como consecuencia que la ingeniería del proyecto sea revisada durante el proceso de construcción. En el caso de la construcción de un poliducto se encuentra con el problema, en el que deben desarrollar una metodología para verificar si los espesores de tubería en los planos constructivos son los correctos para soportar los esfuerzos circunferenciales generados por la presión interna de operación y ángulo real de curvatura.

El material usado para este análisis es tubería del tipo X 56 fabricado según API 5L. Para la determinación de los espesores se tomó en consideración un perfil altimétrico donde se detalla las presiones de la prueba hidrostática, y lo descrito en los códigos ASME B31.4, y la especificación API 5L

Además se analizó la variación de los esfuerzos circunferenciales en la sección transversal de la tubería curvada.

Finalmente las conclusiones y recomendaciones están basadas en el análisis de los resultados obtenidos y la experiencia obtenida en el campo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	
1. CÁLCULO DE ESPESORES Y ESFUERZOS PERMISIBLES EN TUBERIAS SOMETIDAS A PRESIÓN INTERNA EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN POLIDUCTO	2
1.1. Antecedente	2
1.1.1 Descripción del problema	3
1.1.2 Objetivo	4
1.2. Diseño por presión interna de tuberías con espesores de pared Delgada curvadas en frio	4
1.3 Consideraciones para la fabricación de tuberías de acuerdo al código API 5L	7
1.3.1 Espesores de pared	7
1.3.2 Presión de prueba	7

1.4. Consideraciones para la selección del espesor de una tubería curvada según el código ASME B 31.4	10
1.5 Consideraciones para la selección del espesor de una tubería curvada según el código ASME B 31.3	14

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGIA	17
2.1. Metodología para el código ASME B31.4	17
2.2. Metodología para el código ASME B31.3	19
2.3. Metodología a seguir para verificar los esfuerzos máximos circunferenciales	21
2.4. Determinación de la presión interna a partir del perfil altimétrico	22

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS	30
3.1. Verificación del espesor de tubería curvada según ASME B 31.4	30
3.2. Verificación del espesor de tubería curvada según ASME B 31.3	31
3.3. Variación del esfuerzo circunferencial en una tubería Curvada	33
3.4 Determinación de los espesores aplicando el código ASME B31.4 y La presión de trabajo tomada del perfil altimétrico.	36

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
-----------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
API	American petroleum institute.
ASME	The American Society of Mechanical Engineers.
PSI	Pounds-force per square inch
TFG	Trabajo formal de graduación

SIMBOLOGÍA

S	Esfuerzo permisible
Sh	Esfuerzo circunferencial
Pi	Presión interna de diseño
t	Espesor de pared de la tubería
Sl	Esfuerzo longitudinal
α	Angulo alrededor de la sección transversal de la tubería
Sy	Resistencia de fluencia del material
E	Factor de junta soldada longitudinal
X56	Grado de tubería según API 5L
tn	Espesor de pared mínimo según ASME B 31.4
tm	Espesor de pared mínimo según ASME B 31.3
A	Suma de tolerancias permitidas según ASME B 31.4
C	Suma de tolerancias permitidas según ASME B 31.3
γ	Coefficiente de corrección según ASME B 31.3

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Tubería de poliducto en proceso de bajado	2
Figura 1.2	Terminal de almacenamiento y distribución de GLP en Proceso de construcción.	3
Figura 1.3	Representación de los esfuerzos circunferenciales h , radiales r , y longitudinales l en una tubería sometida a presión interna.	4
Figura 1.4	Representación de los esfuerzos circunferenciales en una sección transversal de la tubería.	6
Figura 1.5	Tubería de diámetro 10.75 in y espesor 0.279 in. Con el valor de presión de prueba hidrostática en fabrica indicada sobre la misma. 2500 psi.	9
Figura 2.1	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 0+000 Hasta abscisa 7+761	22
Figura 2.2	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 7+761 Hasta abscisa 14+000	23
Figura 2.3	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 14+000 Hasta abscisa 22+000	23
Figura 2.4	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 22+000 Hasta abscisa 30+190	24
Figura 2.5	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 30+190 Hasta abscisa 36+000	24
Figura 2.6	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 36+000 Hasta abscisa 43+000	25
Figura 2.7	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 43+000 Hasta abscisa 51+000	25

Figura 2.8	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 51+000 Hasta abscisa 59+000	26
Figura 2.9	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 59+000 Hasta abscisa 67+377	26
Figura 2.10	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 67+377 Hasta abscisa 73+000	27
Figura 2.11	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 73+000 Hasta abscisa 80+000	27
Figura 2.12	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 80+000 Hasta abscisa 88+000	28
Figura 2.13	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 88+000 Hasta abscisa 96+000	28
Figura 2.14	Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 96+000 Hasta abscisa 101+893.12	29
Figura 2.15	Nomenclatura de plano altimétrico para prueba hidrostática desde Abscisa 0+000 hasta abscisa 101+893.12	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Tolerancias para espesores de pared	7
Tabla 2.	Porcentaje de la resistencia mínima de fluencia asignado al valor del esfuerzo circunferencial que genera la presión interna en la prueba hidrostática de la tubería en fábrica.	8
Tabla 3.	Dimensiones de tubería, peso por unidad de longitud, y presiones de prueba	9
Tabla 4.	Tabulación de ejemplos de esfuerzos permisibles para usar como referencia en sistemas de tuberías dentro del campo de este código. Factores de calidad básicos para juntas longitudinales	11
Tabla 5.	Radio mínimo de curvatura	12
Tabla 6.	Esfuerzos permitidos básicos en tensión para metales.	16
Tabla 7.	Factores de calidad básicos para juntas longitudinales soldadas en tuberías, tubos y accesorios	16
Tabla 8.	Valores de γ para $D/t < 6$	16

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 1 se describe el antecedente del proyecto, los fundamentos básicos para el análisis de tuberías de espesor delgado sometidas a presión interna, y los requerimientos de los códigos ASME B 31.4, ASME B 31.3 API 5L.

En el capítulo 2 se realizará una metodología para la evaluación técnica del espesor y el cálculo de los esfuerzos circunferenciales, dando cumplimiento a los requerimientos de los códigos y especificaciones en mención.

Con estos antecedentes, y el uso del perfil altimétrico para prueba hidrostática en el capítulo 3 se realizará la verificación del espesor y cálculos de los esfuerzos circunferenciales.

Finalmente en el capítulo 4 se darán las respectivas conclusiones y recomendaciones de los resultados obtenidos con la metodología propuesta.

CAPÍTULO 1

1. CÁLCULO DE ESPESORES Y ESFUERZOS PERMISIBLES EN TUBERÍAS SOMETIDAS A PRESIÓN INTERNA EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN POLIDUCTO

1.1 Antecedentes

El presente trabajo toma como referencia la construcción de un poliducto para una empresa que se dedica al almacenamiento, distribución y transporte de combustibles y productos relacionados.

Para el diseño, construcción, operación y mantenimiento del poliducto se deberá usar el código ASME B 31.4. El cual en su alcance de aplicación está definido para usarse en sistemas de tuberías de transporte de hidrocarburos líquidos y otros líquidos.



Figura 1.1 Tubería de Poliducto en Proceso de Bajado.

Si el proyecto es la construcción de una planta de procesos. El código ASME B 31.3 se usara para diseñar sistemas de tuberías aplicados a procesos que se encuentran típicamente en las refinerías de petróleo, en plantas químicas, farmacéuticas, papeleras, de semiconductores y criogénicas, y en plantas y terminales relacionadas con el procesamiento.



Figura 1.2. Terminal de Almacenamiento y Distribución de GLP en Proceso de Construcción.

1.1.1 Descripción del problema

Existen proyectos en los cuales la ingeniería del mismo es desarrollada por una determinada empresa y la construcción del proyecto por otra empresa. Los ingenieros mecánicos se encuentran con el problema en el que deberán verificar si los espesores identificados en los planos constructivos son los correctos para soportar los esfuerzos que se generan debido a la presión interna y ángulo de curvatura real dada a la tubería.

1.1.2 Objetivo

Establecer una metodología de cálculo para verificar si el espesor de una tubería que será curvada y que usará en la construcción del poliducto es estructuralmente adecuado. La mencionada metodología estará basada en el uso de un perfil altimétrico para prueba hidrostática e información obtenida en el terreno. Con este objetivo, se tomarán como referencia el código ASME B 31.4, y la especificación API 5L; posteriormente, se realizara un ejemplo de cálculo de espesor aplicando el código ASME B31.3

1.2 Diseño por presión interna de tuberías con espesores de pared delgada curvadas en frío.

Esfuerzos debido a la presión interna en tubería recta:

La presión interna genera 3 esfuerzos principales en la pared de la tubería. Ver figura 3

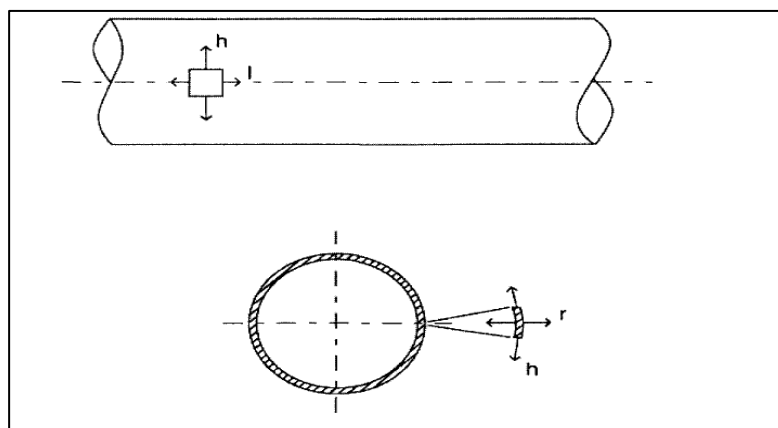


Figura 1.3. Representación de los Esfuerzos Circunferenciales h , Radiales r , y Longitudinales l en una Tubería Sometida a Presión Interna.

Los esfuerzos circunferenciales o tangenciales llamados así debido a que actúan tangentes a la superficie de la tubería (hoop stress) S_h , esfuerzos longitudinales o esfuerzos axiales S_l (actúan paralelo al eje de la tubería), esfuerzos radiales los cuales son despreciables para nuestro caso debido a que el espesor de la tubería a considerar es menor o igual que 1/10 de su radio interior. Para nuestro análisis los esfuerzos que se calculan son los siguientes:

$$\text{Esfuerzo circunferencial} \quad S_h = \frac{P_i D}{2t} \quad 1$$

Dónde:

P_i → Presión interna de diseño, psi

D → Diámetro exterior de la tubería, in

t → Espesor de pared de la tubería, in

$$\text{Esfuerzo longitudinal} \quad S_l = \frac{P_i D}{4t} \quad 2$$

Dónde:

P → Presión interna de diseño, psi

D → Diámetro exterior de la tubería, in

t → Espesor de pared de la tubería, in

Esfuerzos debido a la presión interna en tubería curva:

Si un codo o curva de tubería es presurizada los esfuerzos circunferenciales varían alrededor de la circunferencia como se muestra en la figura 4.

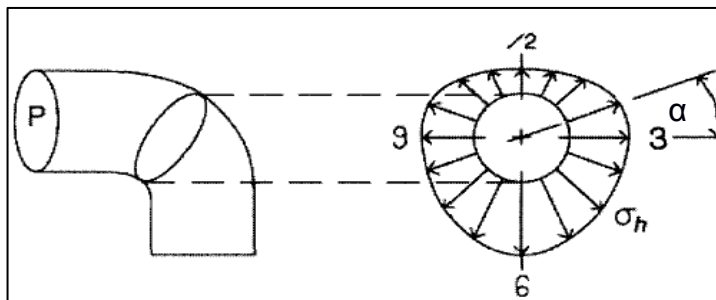


Figura 1.4. Representación de los Esfuerzos Circunferenciales en una Sección Transversal de la Tubería.

Y se los calcula con la siguiente expresión:

$$Sh = \frac{Pi * D}{4t} \left(\frac{2R + r \operatorname{seno}\alpha}{R + r \operatorname{seno}\alpha} \right) \quad 3$$

Sh ➔ esfuerzos circunferenciales en la tubería curvada, psi

Pi ➔ presión interna de diseño, psi

D ➔ diámetro exterior de la tubería, in

t ➔ espesor de pared de la tubería, in.

R ➔ radio de curvatura de la tubería, in

r ➔ radio interior de la tubería, in

α ➔ Ángulo alrededor de la sección transversal.

1, 2,3 A.Antaki, G. (2003). *Piping and pipeline Engineering*. New york: Marcel Dekker.

1.3 Consideraciones para la fabricación de tuberías de acuerdo al código API 5L

Para nuestro análisis la tubería seleccionada es del tipo X 56 y las consideraciones a tomar en cuenta son las siguientes:

1.3.1 Espesor de pared

El espesor de pared debe estar dentro de las tolerancias descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Tolerancias para Espesores de Pared

Tolerancia (porcentaje de espesor de pared especificado)		%	%
Diámetro de tubería (pulgadas)	Tipo de tubería	Grado B o más bajo	Grado X42 o más alto
$\leq 2 \frac{7}{8}$	todos	+20.0, -12.5	+15.0, -12.5
$>2 \frac{7}{8}$ y <20	todos	+15.0, -12.5	+15.0, -12.5
≥ 20	soldada	+17.5, -12.5	+19.5, -8.0
≥ 20	Sin costura	+15.0, -12.5	+17.5, -10.0

Fuente: código API 5L edición 42 (2000) (7.3 wall thickness-table 9 tolerances for wall thickness).

Cualquier imperfección que tenga una profundidad mayor al 12.5% del espesor especificado debe ser considerado un defecto.

1.3.2 Presión de prueba

El valor de La presión de prueba de la tubería en la fábrica donde ha sido elaborada de acuerdo al código API 5L, es la presión que genera esfuerzos circunferenciales cuyo valor es un porcentaje de la resistencia mínima de fluencia del material ver tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de la resistencia mínima de fluencia asignado al valor del esfuerzo circunferencial que genera la presión interna en la prueba hidrostática de la tubería en fábrica.

Grade	Size	Percent of Specified Minimum Yield Strength	
		Standard Test Pressure	Alternative Test Pressure
A25	$5^{9/16}$ ^a	60	—
A	$\geq 2^{3/8}$ ^b	60	75
B	$\geq 2^{3/8}$ ^b	60	75
X42 through X80	$\leq 5^{9/16}$	60 ^c	75 ^d
	$> 5^{9/16}$ and $\leq 8^{5/8}$	75 ^c	75 ^d
	$> 8^{5/8}$ and < 20	85 ^c	85 ^d
	≥ 20	90 ^c	90 ^d

Fuente: código API 5L edición 42 (2000) (9.4.3 test Pressure)

- a** Las pruebas de presión fueron limitadas a 2800 psi la prueba de presión para otros tamaños fueron establecidas arbitrariamente.
- b** Las pruebas de presión fueron limitadas a 2500psi para ≤ 3.5 in y 2800 para mayores a 3.5 in.
- c** Las pruebas de presión para X42 hasta X80 fueron limitadas a 3000 psi para dar cabida a limitaciones del ejecutor
- d** Las pruebas de presión para grados X42 hasta X80 fueron limitadas a 7620 psi para < 16 in. Y 3630 psi para ≥ 16 in.

Size (tamaño) es dado en pulgadas (in.)

Los valores tabulados de la presión de prueba en fábrica lo se pueden encontrar en la tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de Tubería, Peso por Unidad de Longitud, y Presiones de Prueba.

(1) Size	(2) Specified Outside Diameter <i>D</i> (in.)	(3) Specified Wall Thickness <i>t</i> (in.)	(4) Plain-End Weight per Unit Length <i>w_{pe}</i> (lb/ft)	(5) Calculated Inside Diameter ^a <i>d</i> (in.)	(6) - (15) Minimum Test Pressure (psi) ^b																			
					Grade A		Grade B		Grade X42		Grade X46		Grade X52		Grade X56		Grade X60		Grade X65		Grade X70		Grade X80	
					Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.	Std.	Alt.
8 ⁵ / ₈	8.625	1.000	81.51	6.625	Std.	2800	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000		
10 ³ / ₄ ^c	10.750	0.156	17.67	10.438	Std.	520	610	1040	1130	1280	1380	1480	1600	1730	1970									
10 ³ / ₄ ^c	10.750	0.188	21.23	10.374	Alt.	650	760	1040	1130	1280	1380	1480	1600	1730	1970									
10 ³ / ₄ ^c	10.750	0.203	22.89	10.344	Std.	630	730	1250	1370	1550	1660	1780	1930	2080	2380									
10 ³ / ₄ ^c	10.750	0.219	24.65	10.312	Alt.	790	920	1250	1370	1550	1660	1780	1930	2080	2380									
10 ³ / ₄	10.750	0.250	28.06	10.250	Std.	680	790	1350	1480	1670	1800	1930	2090	2250	2570									
10 ³ / ₄	10.750	0.279	31.23	10.192	Alt.	850	990	1350	1480	1670	1800	1930	2090	2250	2570									
10 ³ / ₄	10.750	0.307	34.27	10.136	Std.	730	860	1450	1590	1800	1940	2080	2250	2420	2770									
10 ³ / ₄	10.750	0.344	38.27	10.062	Alt.	920	1070	1450	1590	1800	1940	2080	2250	2420	2770									
10 ³ / ₄	10.750	0.365	40.52	10.020	Std.	840	980	1660	1820	2060	2210	2370	2570	2770	3000									
10 ³ / ₄	10.750	0.438	48.28	9.874	Alt.	1050	1220	1660	1820	2060	2210	2370	2570	2770	3160									
10 ³ / ₄	10.750	0.500	54.79	9.750	Std.	930	1090	1850	2030	2290	2470	2650	2870	3000	3000									
					Alt.	1170	1360	1850	2030	2290	2470	2650	2870	3090	3530									
					Std.	1030	1200	2040	2230	2520	2720	2910	3000	3000	3000									
					Alt.	1290	1500	2040	2230	2520	2720	2910	3160	3400	3880									
					Std.	1150	1340	2280	2500	2830	3000	3000	3000	3000	3000									
					Alt.	1440	1680	2280	2500	2830	3050	3260	3540	3810	4350									
					Std.	1220	1430	2420	2660	3000	3000	3000	3000	3000	3000									
					Alt.	1530	1780	2420	2660	3000	3230	3460	3750	4040	4620									
					Std.	1470	1710	2910	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000									
					Alt.	1830	2140	2910	3190	3600	3880	4160	4500	4850	5540									
					Std.	1670	1950	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000									

Fuente: código API 5L edición 42 (2000) (table 6c).



Figura 1.5. Tubería de Diámetro 10.75 in y Espesor 0.279 in. Con el Valor de Presión de Prueba Hidrostática en Fabrica Indicada Sobre la Misma. 2500 psi.

1.4 Consideraciones para la selección del espesor de una tubería curvada según el código ASME B 31.4

Presión interna de diseño

El código ASME B31.4 establece que los componentes de tubería en cualquier punto del sistema del poliducto deben ser diseñados para una presión de diseño interna que no sea menor que la máxima presión de operación en estado estable en ese punto del poliducto. Es necesario resaltar que la máxima presión de operación en estado estable debe ser la suma del cabezal estático de presión más la presión para superar las pérdidas por fricción y cualquier contrapresión aplicada. Adicionalmente los incrementos de presión eventuales no deben exceder la presión de diseño interna por más del 10 % en el mencionado punto donde ocurre el incremento de presión. Extendiéndose este criterio a todo el poliducto.

Esfuerzo permisible

De acuerdo al ASME B 31.4 se calcula con la expresión:

$$S = 0.72 S_y E$$

S_y = resistencia de fluencia mínima especificada.

E = factor de junta de soldadura

0.72 = factor de diseño sugerido por el código. Este factor puede tomar un valor menor, considerando su condición de operación o ubicación.

Una explicación de la selección del factor de diseño es que los esfuerzos que corresponden al 90% de S_y generados por la presión de prueba hidrostática fue reducido por 12,5% que es la tolerancia en la que puede disminuir el espesor durante el proceso de fabricación de la tubería y todo esto dividido para el 110% para compensar el aumento de la sobrepresión transiente permitida $(0.9S_y)(0.875)/1.1 = 0.72 S_y$.

Los valores de resistencia mínima de fluencia S_y y del factor de junta de soldadura E se lo obtienen de la tabla 4.

Tabla 4. Tabulación de Ejemplos de Esfuerzos Permisibles para Usar como Referencia en Sistemas de Tuberías dentro del Campo de este Código.

Specification	Grade	Specified Min. Yield Strength, psi (MPa)	Weld Joint Factor, E	Allowable Stress Value, S , -20°F to 250°F (-30°C to 120°C), psi (MPa)
Seamless				
API 5L	A25	25,000 (172)	1.00	18,000 (124)
API 5L, ASTM A53, ASTM A106	A	30,000 (207)	1.00	21,600 (149)
API 5L, ASTM A53, ASTM A106	B	35,000 (241)	1.00	25,200 (174)
API 5L	X42	42,000 (289)	1.00	30,250 (208)
API 5L	X46	46,000 (317)	1.00	33,100 (228)
API 5L	X52	52,000 (358)	1.00	37,450 (258)
API 5L	X56	56,000 (386)	1.00	40,300 (278)
API 5L	X60	60,000 (413)	1.00	43,200 (298)
API 5L	X65	65,000 (448)	1.00	46,800 (323)
API 5L	X70	70,000 (482)	1.00	50,400 (347)
API 5L	X80	80,000 (551)	1.00	57,600 (397)
ASTM A106	C	40,000 (278)	1.00	28,800 (199)
ASTM A333	6	35,000 (241)	1.00	25,200 (174)
ASTM A524	I	35,000 (241)	1.00	25,200 (174)
ASTM A524	H	30,000 (207)	1.00	21,600 (149)

Fuente: código ASME B 31.4 (2012).

Curvas de campo

Es un tubo curvado que formara parte del poliducto. Esta curvatura del tubo se la realiza generalmente en el terreno usando una maquina curvadora portátil y deben estar libres de pandeo fisuras u otro daño mecánico.

El radio mínimo de las curvas de campo dobladas en frio según ASME B 31.4 se lo puede ver en la Tabla 5

Tabla 5. Radio mínimo de curvatura.

Diámetro nominal de la tubería	radio mínimo de curvado en diámetros de tubería.
12" y más pequeños	18D
14"	21D
16"	24D
18"	27D
20" y más grande	30D

Fuente: Código ASME B 31.4 2012.

Las curvas deben ser hechas de tal manera que preserven la forma de la sección transversal de la tubería y deben estar libres de daño mecánico. El diámetro de la tubería no debe ser reducido en ningún punto por más del 2.5% del diámetro nominal, permitiendo el paso de una placa verificadora con esta medida.

Tangentes de dos metros en los extremos de la curva son recomendables para curvas dobladas en frio.

Cuando las curvas son realizadas en tuberías soldadas longitudinalmente. La soldadura longitudinal debe ser localizada muy cerca del eje neutro de la curva

Criterio para el espesor de pared

Tuberías rectas.

El espesor de pared nominal especificado t (tabla 3) tiene que ser mayor o igual que el espesor de pared requerido t_n .

El espesor de pared mínimo requerido t_n para secciones rectas de tuberías de acero, debe ser determinado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$t_n \geq t_r + A$$

Siendo

t_n → Espesor de pared mínimo que satisface los requerimientos de presión interna y tolerancias.

t_r → Espesor de pared calculado para la presión interna de diseño usando la ecuación.

$$t_r = \frac{P_i * D}{2 S}$$

D → Diámetro externo de la tubería, in (mm)

P_i → Presión interna de diseño, psi (bar)

S → Esfuerzo permisible aplicable, psi (Mpa)

A → suma de tolerancias permitidas que involucren una disminución del espesor de la tubería, por ejemplo roscado, ranurado, corrosión y erosión e *incrementos de espesor de pared si se usa como una medida de protección.*

Las tolerancias de espesor de pared para corrosión no son requeridas si las tuberías y componentes están protegidas contra la corrosión en acuerdo con los requerimientos y procedimientos prescritos en el capítulo VIII del código ASME B 31.4.

Tolerancias para ranurado y roscado de tubería debe ser incluido en el valor de A cuando sea permitido por este código. (Párrafo 404.8.3 ASME B31.4 2012).

Tuberías curvadas.

De acuerdo al código ASME B 31.4 este especifica que el mínimo espesor de pared de la tubería antes de ser curvada tiene que ser determinado como para tubería recta, es decir igual al espesor de pared nominal especificado t (tabla 3).

El código establece de manera mandatorio hacer una prueba de curvado de tubería, para determinar el procedimiento de curvado en campo, de tal manera que estas tuberías curvadas cumplan con los requerimientos de código y que el espesor de pared después del curvado no sea menor que el mínimo permitido por la especificación de la tubería.

1.5 Consideraciones para la selección del espesor para una tubería curvada según el código ASME B 31.3

El código ASME B 31.3 especifica que el espesor mínimo requerido t_m , de una curva, después del doblado, en su forma terminada debe calcularse usando las ecuaciones

$$t_m = t + C$$

Por lo tanto el espesor T para el tubo seleccionado, considerando la tolerancia negativa del fabricante no debe ser inferior a t_m . Se hace referencia a esto ya que de acuerdo al código API 5L podrían existir tuberías con espesores de pared inferiores al espesor nominal siempre y cuando los espesores de tubería estén dentro de la tolerancia negativa de la especificación. Ver Tabla 1.

t_m → Espesor de pared mínimo requerido.

t → Espesor de diseño por presión interna calculado con:

$$t = \frac{PD}{2\left[\left(\frac{SEW}{I}\right) + P\gamma\right]}$$

P → Presión de diseño interna

D → diámetro externo del tubo, de acuerdo con lo indicado en la tabla de las normas o especificaciones, o según lo medido.

S → Valor del esfuerzo del material obtenido de la tabla 6

E → Factor de calidad obtenido de la tabla 7

W → Factor de reducción de la resistencia de la junta de soldadura (solo se aplica en el área de soldadura).

γ → Coeficiente obtenido de la Tabla 8 válida para valores de $D/t < 6$

I → factor de corrección del valor SEW .

Para el radio interno de la curva Intrados $I = \frac{4\left(\frac{Ri}{D}\right) - 1}{4\left(\frac{Ri}{D}\right) - 2}$.

Para el radio externo de la curva extrados $I = \frac{4\left(\frac{Ri}{D}\right)+1}{4\left(\frac{Ri}{D}\right)+2}$.

Para el eje central de la curva $I = 1$

Ri → radio de curvatura del codo soldado o de la curva del tubo.

C → suma de las tolerancias mecánicas (profundidad del hilo o de la ranura) más las tolerancias por corrosión y por erosión.

Tabla 6. Esfuerzos Permitidos Básicos en Tensión para Metales.

Material	No. espec.	N.º P o N.º S (5)	Grado	No. UNS	Notas	Temp. min. °F (6)	Min. esfuerzo especificado, ksi		Temp. min.		
							Tensión	Elasticidad	a 100	200	300
...	API 5L	S-1	X56	...	(51)(55)(71)(77)	A	71	56	23,7	23,7	23,7

Fuente: Código ASME B 31.3 2010. Tabla A-1

Tabla 7. Factores de calidad básicos para juntas longitudinales soldadas en tuberías, tubos y accesorios

No. espec.	Clase (o tipo)	Descripción	E_j (2)	Notas. Apéndice A
Acero carbono				
API 5L	...	Tubería sin costura	1.00	...

Fuente: Código ASME B 31.3 2010. Tabla A-1B

Tabla 8. Valores de γ para $D/t < 6$

Materiales	Temperatura, °C (°F)					
	≤ 482 (900 y menores)	510 (950)	538 (1.000)	566 (1.050)	593 (1.100)	≤ 621 (1.150 y mayores)
Otros metales ductiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

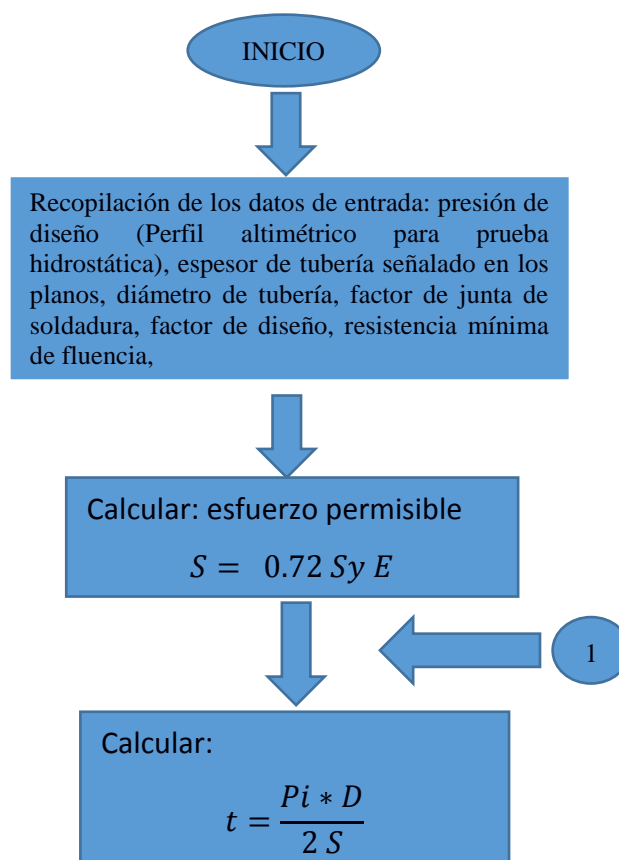
Fuente: Código ASME B 31.3 2010. Tabla 304.1.1

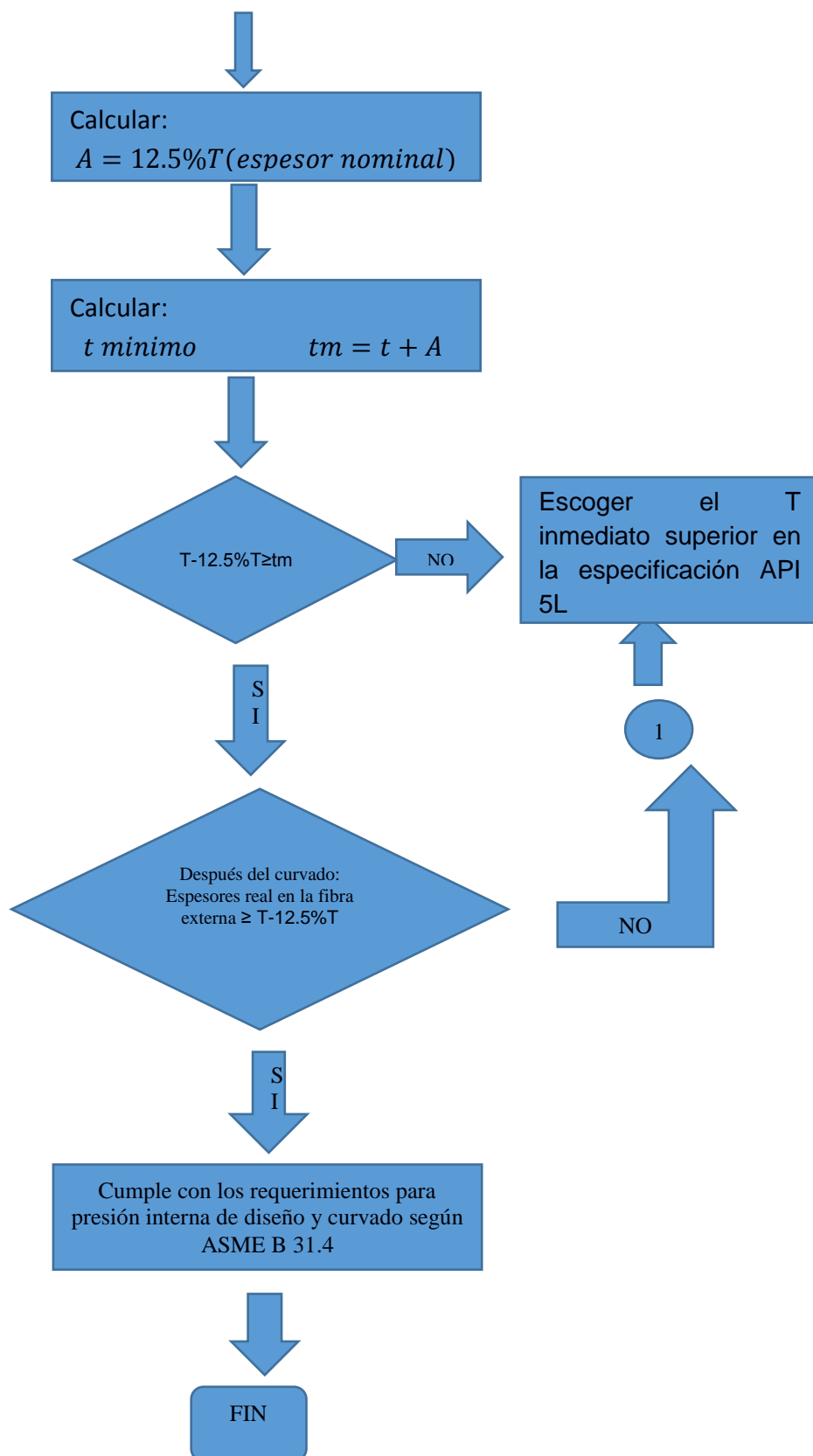
CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA.

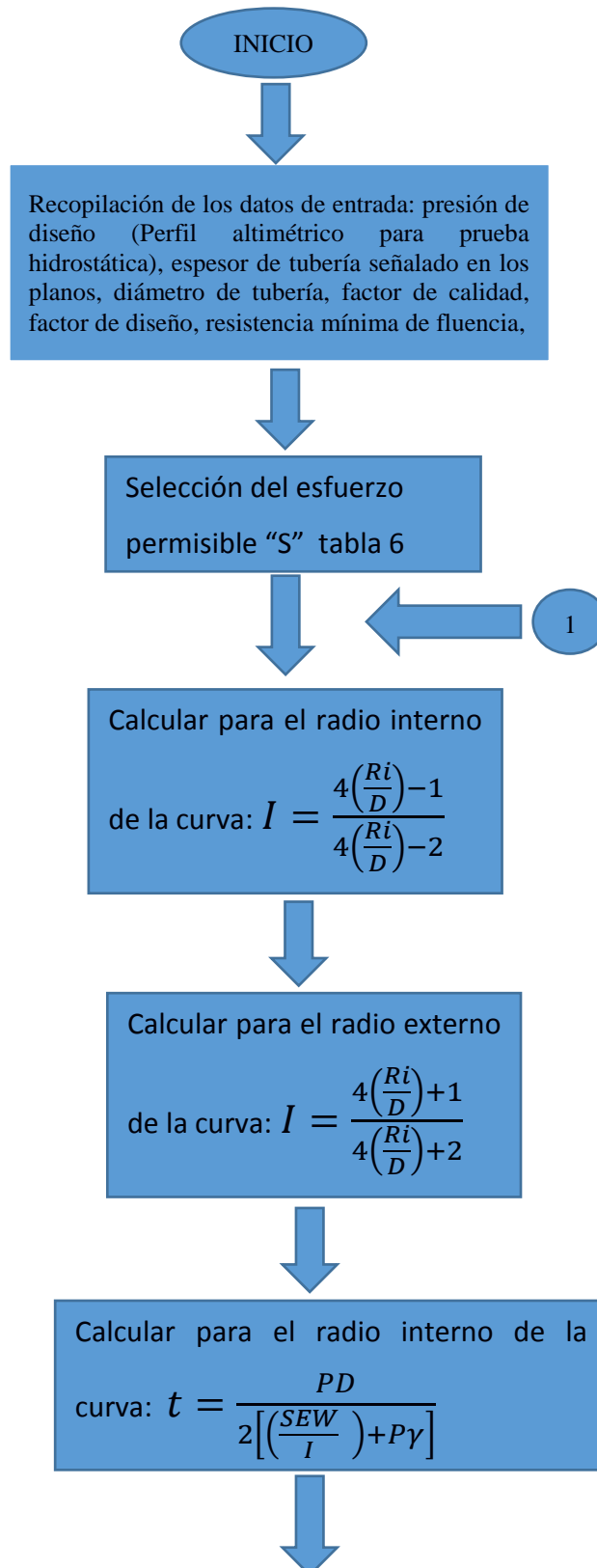
La metodología a seguir para verificar los espesores seleccionados es la siguiente:

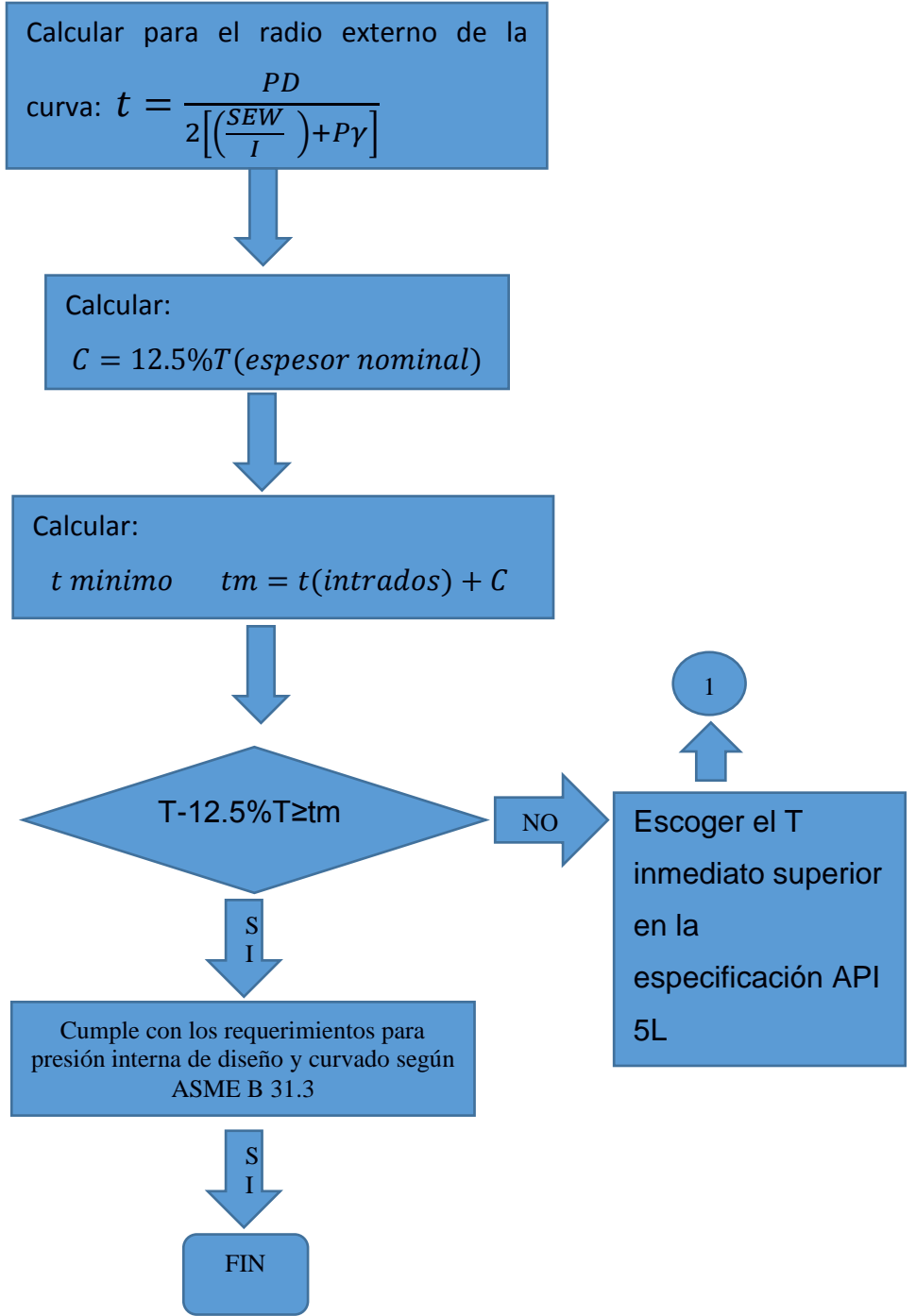
2.1 Metodología de cálculo para el código ASME B 31.4





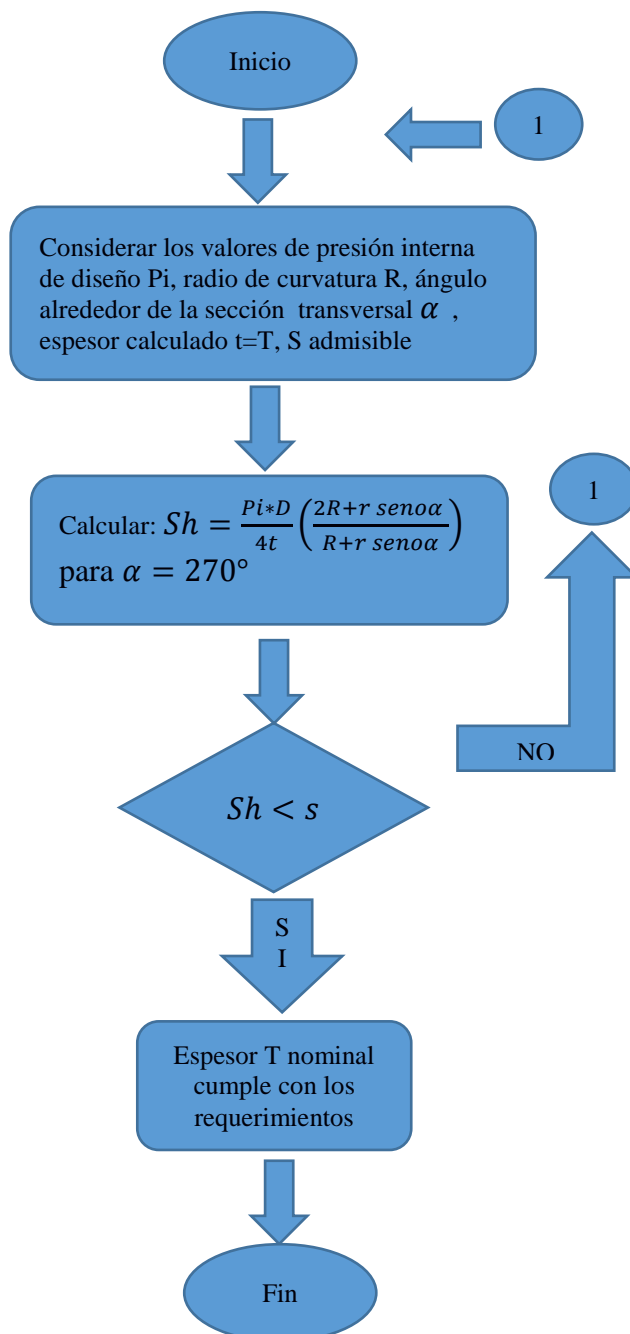
2.2 Metodología de cálculo para el código ASME B 31.3





2.3 Metodología a seguir para verificar los esfuerzos máximos circunferenciales

Es la siguiente:



2.4 Determinación del valor de presión interna de diseño a partir del perfil altimétrico.

Haciendo uso del perfil altimétrico se determinan las presiones de trabajo en cualquier punto.

Tomando dos valores de presión con su altura respectiva se puede obtener una variación de presión por metro.

Presión de trabajo	altura sobre nivel del mar	abscisa
1537 psi	-----6.44m	-----9+575.78
1480 psi	-----45.77m	-----10+290.91
57 psi	39.33m	
57 psi/39.33m= 1.44 psi/m. → Variación de presión por metro		

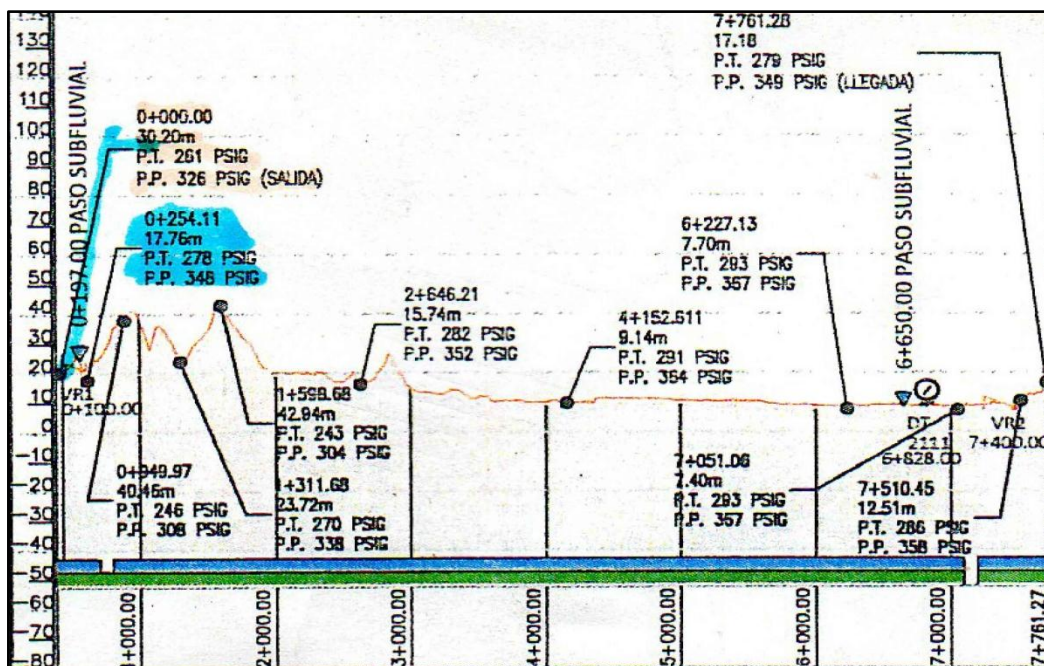


Figura 2.1. Plano Altimétrico para Prueba Hidrostática desde Abscisa 0+000 Hasta abscisa 7+761.27

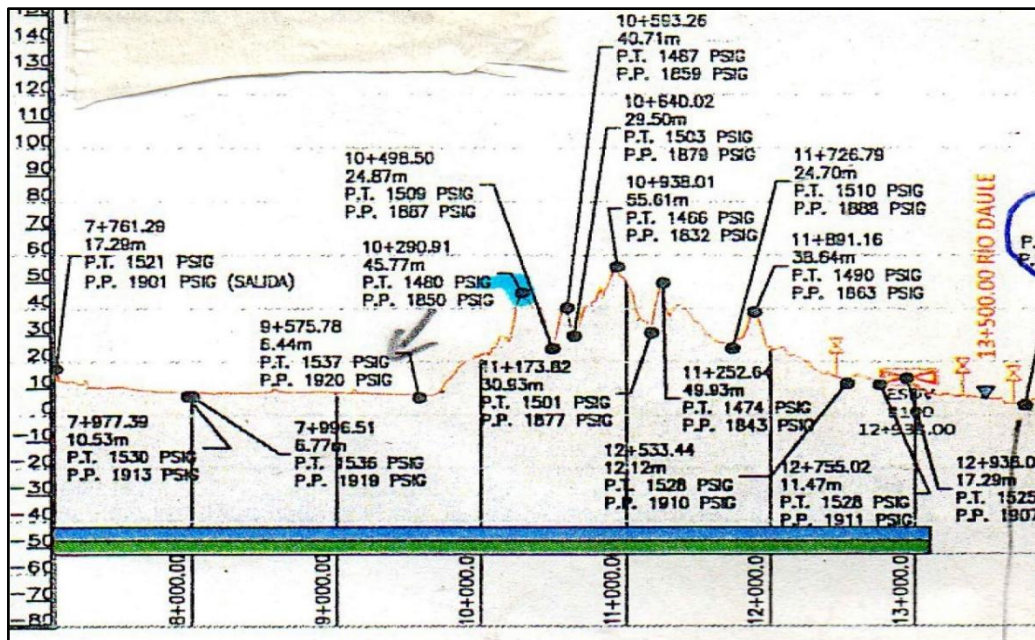


Figura 2.2. Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 7+761.27
Hasta abscisa 14+000

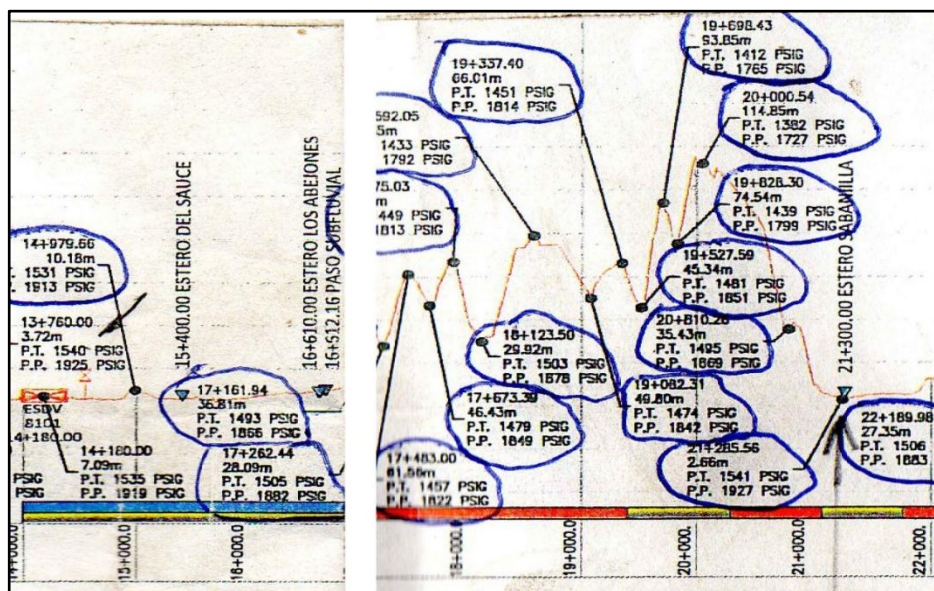


Figura 2.3. Plano Altimétrico para Prueba Hidrostática desde Abscisa 14+000
Hasta abscisa 22+000.

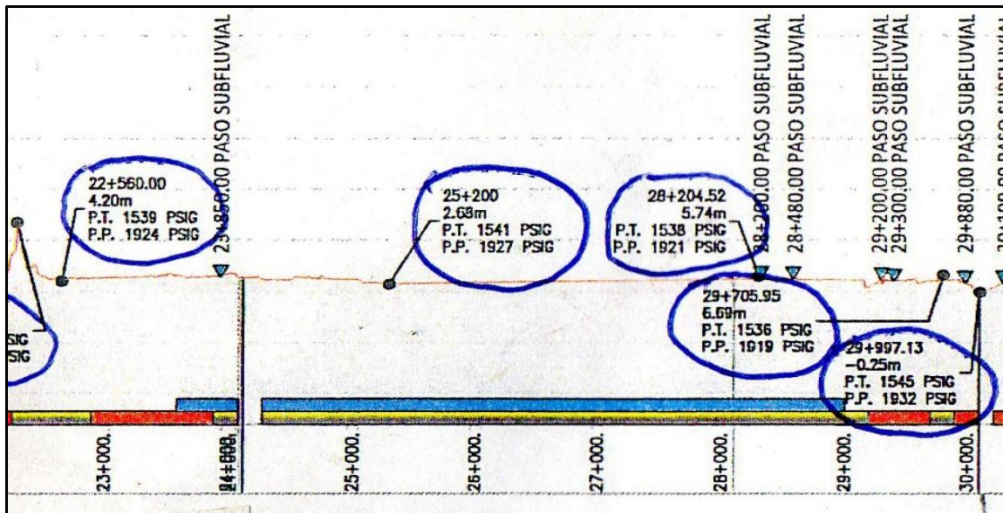


Figura 2.4 Plano Altimétrico para Prueba Hidrostática desde Abscisa 22+000 Hasta abscisa 30+190.

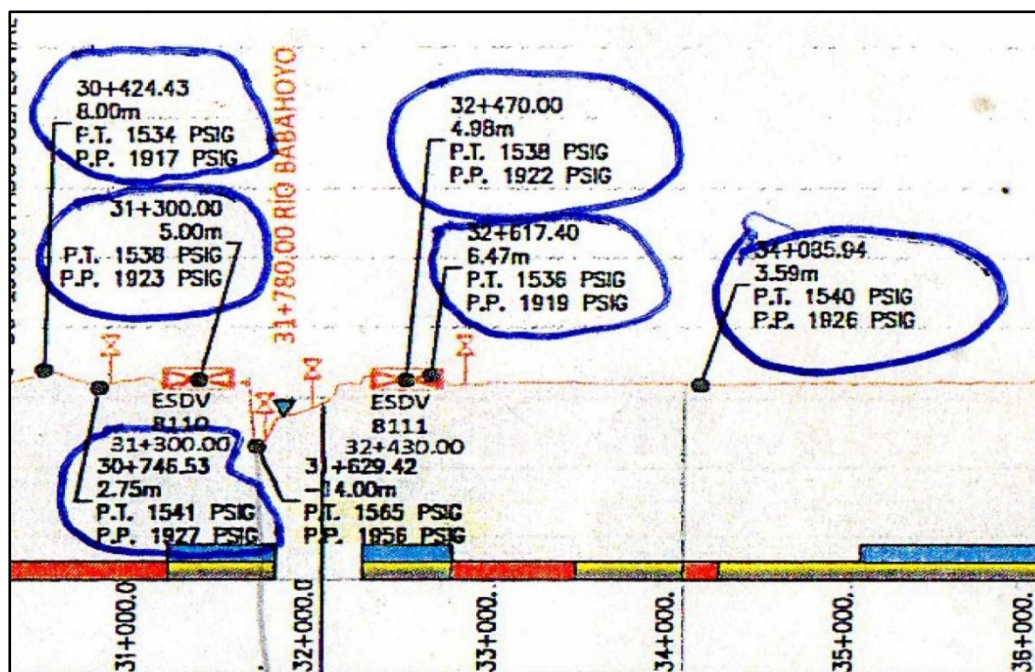


Figura 2.5 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 30+190 Hasta abscisa 36+000.

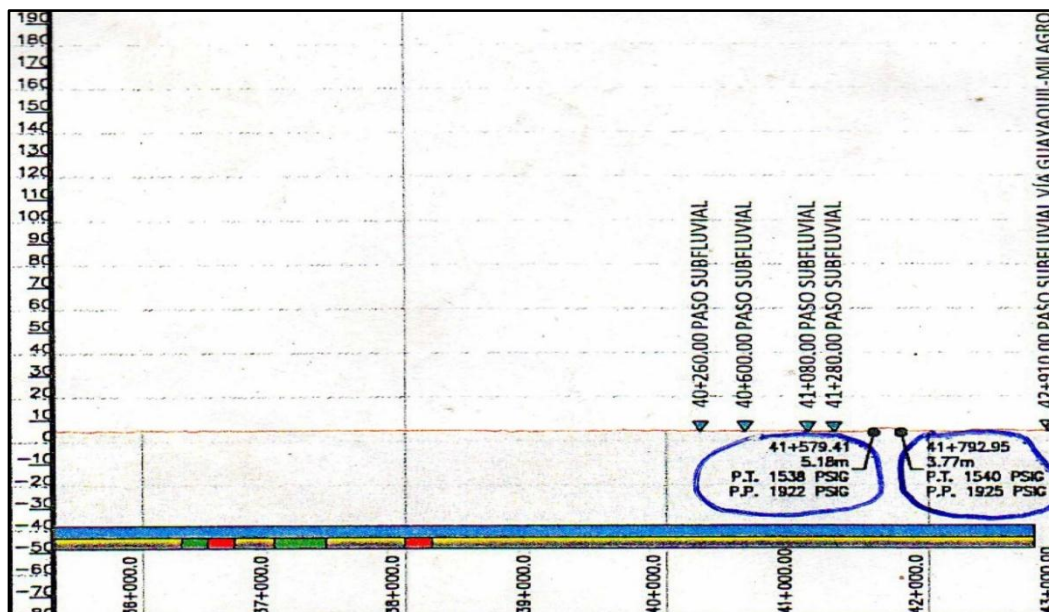


Figura 2.6 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 36+000
Hasta abscisa 43+000.

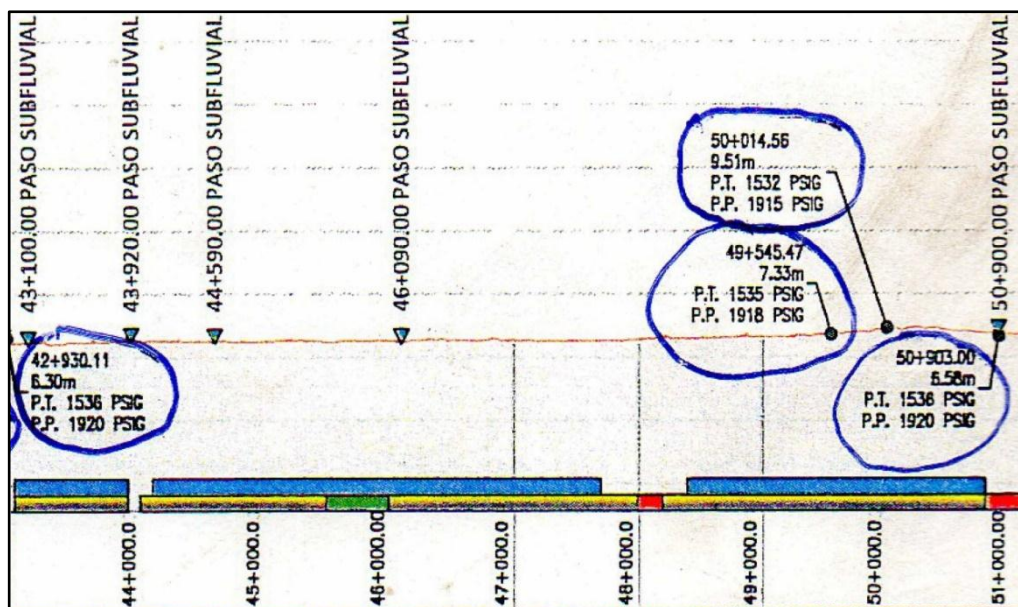


Figura 2.7 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 43+000
Hasta abscisa 51+000.

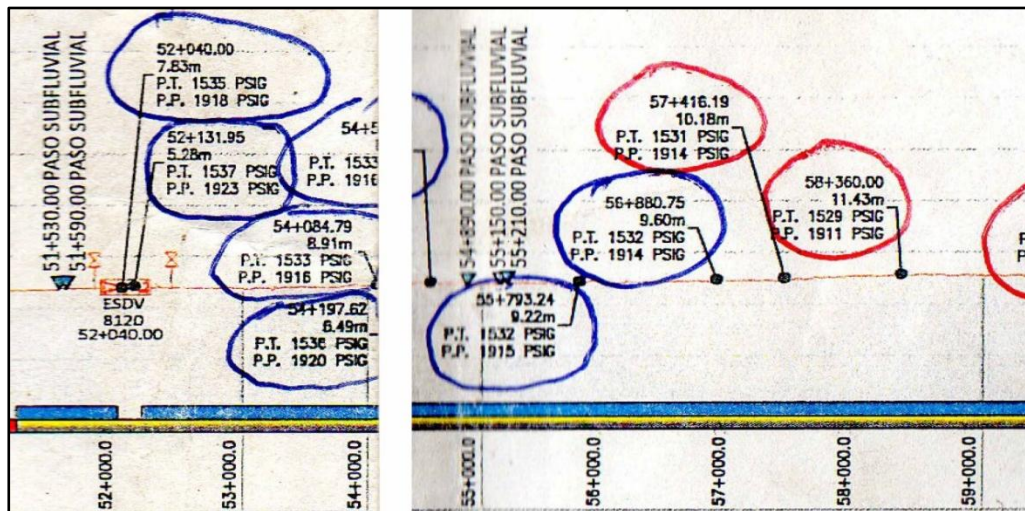


Figura 2.8 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 51+000
Hasta abscisa 59+000.

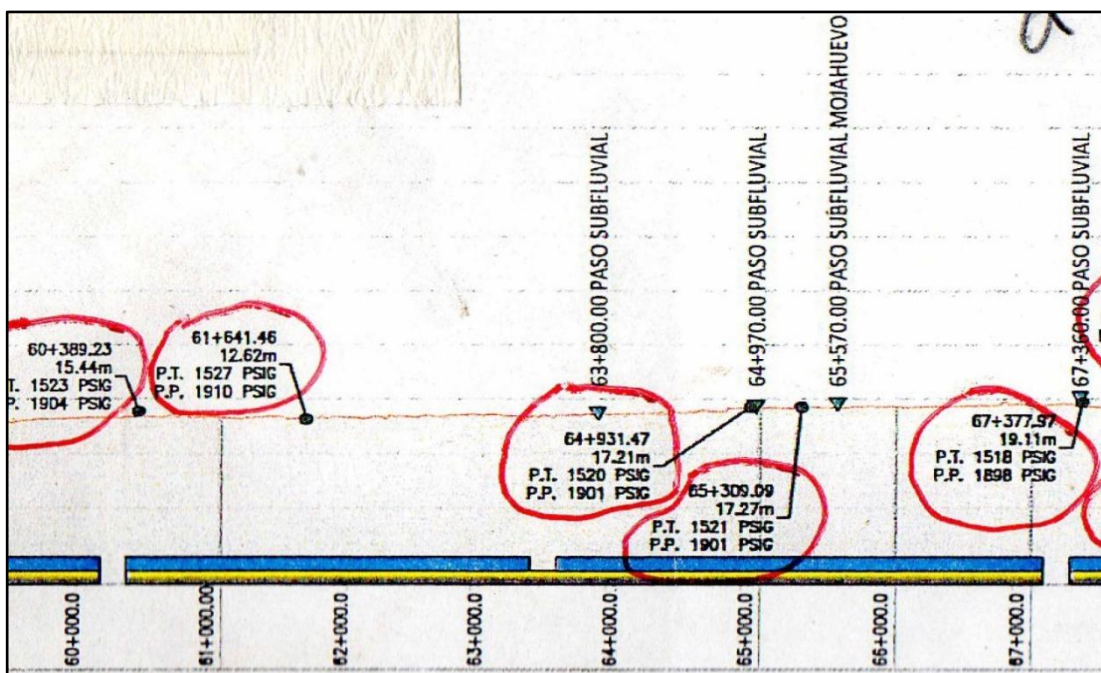


Figura 2.9 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 59+000
Hasta abscisa 67+377

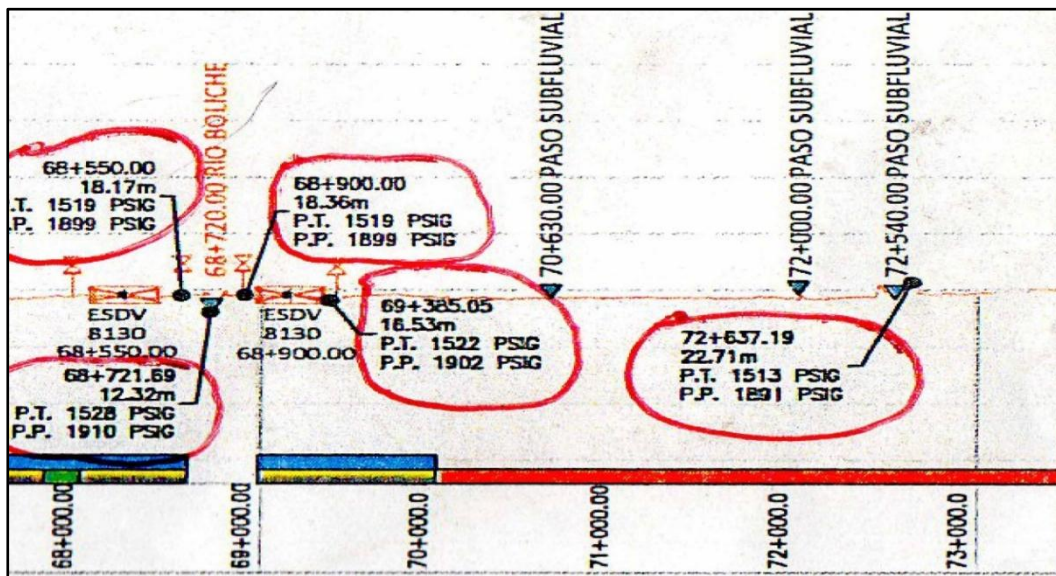


Figura 2.10 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 67+377
Hasta abscisa 73+000.

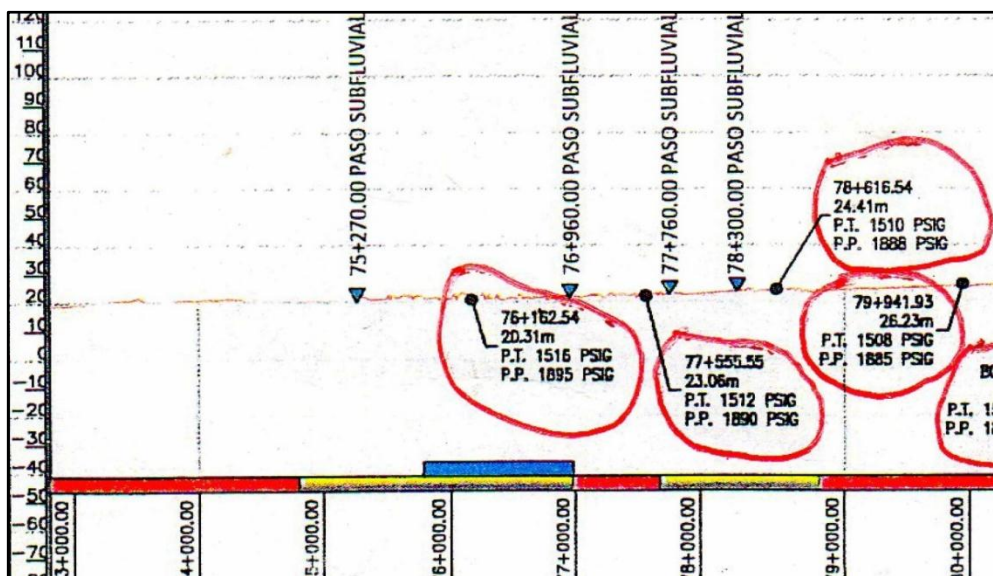


Figura 2.11 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 73+000
Hasta abscisa 80+000.

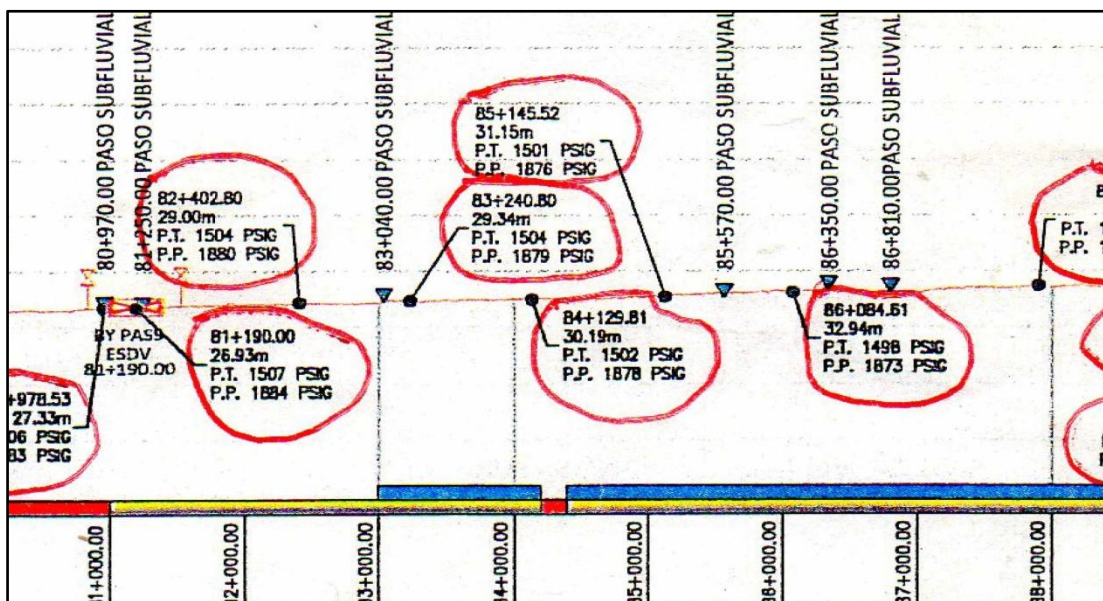


Figura 2.12 Plano Altimétrico para Prueba Hidrostática desde Abscisa 80+000 Hasta abscisa 88+000.

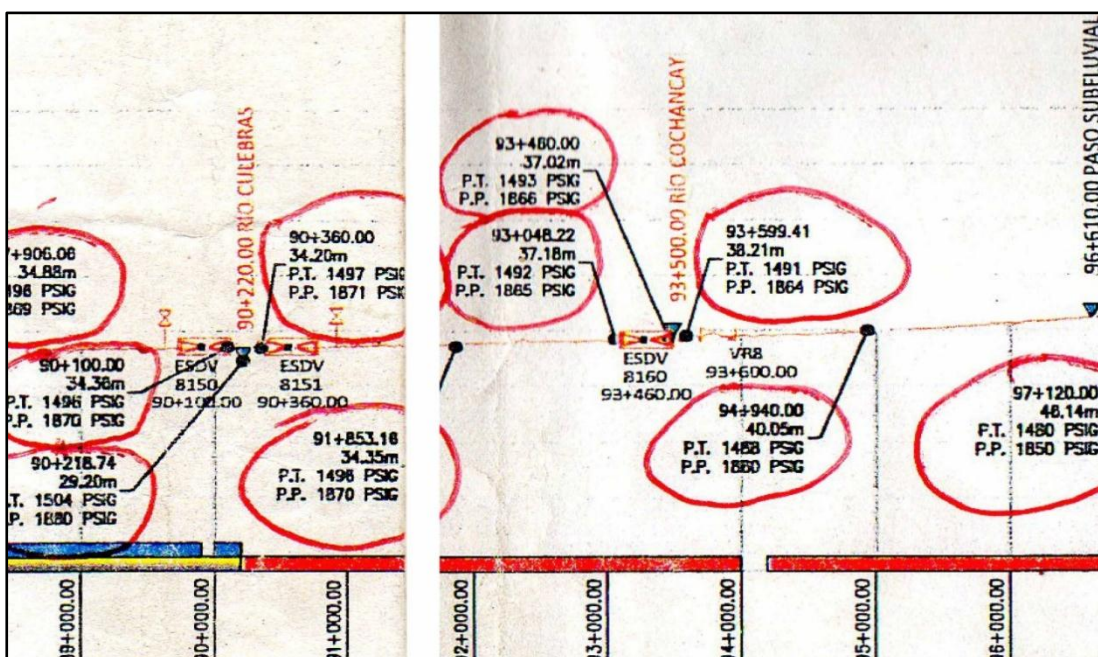


Figura 2.13 Plano Altimétrico para prueba Hidrostática desde Abscisa 88+000 Hasta abscisa 96+000.

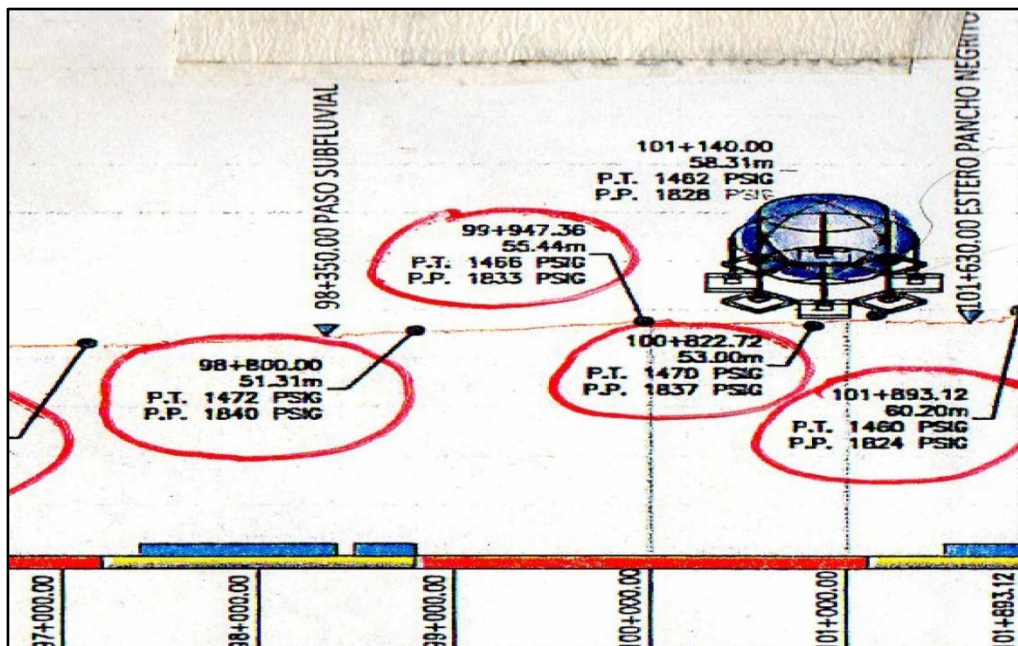


Figura 2.14 Plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 96+000 Hasta abscisa 101+893.12

LEYENDA	
	DENSÍMETRO
	PASO SUBFLUVIAL
	VÁLVULA DE BLOQUEO DE LINEA (ESDV)
	VÁLVULA DE RETENCIÓN (VR)
	VÁLVULA DE BLOQUEO MANUALES (BLOC)
	VÁLVULA DE VENTEO 2"
	BAJADA/TAPADA
	LIBERADO CON PASO CONFIRMADO
	DETENIDO
	PREDIOS LIBERADOS CON ACUERDO DE PASO
P.T	PRESIÓN DE TRABAJO
P.P	PRESIÓN DE PRUEBA

Figura 2.15 Nomenclatura de plano altimétrico para prueba hidrostática desde abscisa 0+000 Hasta abscisa 101+893.12

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Verificación del Espesor de tubería curvada según ASME B 31.4

Basándonos en el código ASME B31.4 y la especificación para tubería API 5L se verifica si el espesor especificado en los planos constructivos es el correcto para las condiciones de presión interna de diseño y radio de curvatura. Para este fin se toma el valor de presión del perfil altimétrico suministrado por la empresa "X" y el resto de datos a partir de un levantamiento de información en la abscisa 7+996.51 del poliducto.

DATOS:

Abscisa: 7+996.51

Material: Tubería X 56 especificación API 5L

Presión de operación: 1536 psi (tomado del perfil de presiones)

Espesor de tubería señalada en el plano: 0.279 in

Diámetro nominal de la tubería: 10.75" (valor indicado sobre la tubería)

Factor de diseño: 0.68

Factor de junta soldada E: 1 (tomado de la tabla 4)

Resistencia mínima de fluencia: 56000 psi (tomado de la tabla 4)

Angulo de curvatura: 14° (0.244 radianes) (valor tomado en el campo)

Longitud de arco: 7 metros (medido sobre la tubería en campo)

Radio de curvatura: 1129.18 "

El código ASME B 31.4 establece que el mínimo espesor de pared de tubería requerido antes de realizar la curva de tubería en campo, debe ser determinado como para tubería recta.

Se usan las siguientes fórmulas:

$$(S = F * E * Sy) \quad S = 0.68 * 1 * 56000 \frac{lb}{in^2} = 38080 \frac{lb}{in^2}$$

$$(t = \frac{Pi * D}{2 S}) \quad t = \frac{1536 \frac{lb}{in^2} * 10.75 in}{2 * 38080 \frac{lb}{in^2}} = 0.217 \text{ in}$$

$$\frac{Sy}{S} = \frac{56000 \frac{lb}{in^2}}{38080 \frac{lb}{in^2}} = 1.47 \text{ (Factor de seguridad)}$$

$$A = 0$$

$$t_m = t + A = 0.217 \text{ in} + 0 = 0.217 \text{ in}$$

$$t \text{ mínimo de fabricación} = 0.279 - 0.125 * 0.279 = 0.244 \text{ in.}$$

$$t \text{ mínimo de fabricación} > t_m.$$

3.2 Verificación del Espesor de tubería curvada según ASME B 31.3

Asumiendo que los datos anteriores correspondan a una tubería de proceso, se aplica el código ASME B 31.3 para calcular el espesor mínimo requerido, t_m , de una curva después del doblado en su forma terminada usando las siguientes ecuaciones.

DATOS:

Abscisa: 7+996.51

Material: Tubería X 56 especificación API 5L

Presión de operación: 1536 psi (tomado del perfil de presiones)

Espesor de tubería señalada en el plano: 0.279 in

Diámetro nominal de la tubería: 10.75" (valor indicado sobre la tubería)

Factor de calidad E: 1 (tomado de la tabla 7)

Resistencia mínima de fluencia: 56000 psi (tomado de la tabla 4)

Angulo de curvatura: 14° (0.244 radianes) (valor tomado en el campo)

Longitud de arco: 7 metros (medido sobre la tubería en campo)

Radio de curvatura: 1129.18 "

W: Factor de reducción de la resistencia de la junta de soldadura

γ: Coeficiente obtenido de la tabla 8

Valor del esfuerzo permisible

23700 psi (tomado de la tabla 6).

$$\frac{S_y}{S} = \frac{56000 \frac{lb}{in^2}}{23700 \frac{lb}{in^2}} = 2.36 \text{ (Factor de seguridad)}$$

Valor de I para el radio interno de la curva (Intrados)

$$I = \frac{4 \left(\frac{R_i}{D} \right) - 1}{4 \left(\frac{R_i}{D} \right) - 2} \quad I = \frac{4 \left(\frac{1129.18 in}{10.75 in} \right) - 1}{4 \left(\frac{1129.18 in}{10.75 in} \right) - 2} = \frac{419.16}{418.16} = 1.002$$

Valor de I para el radio externo de la curva (extrados)

$$I = \frac{4 \left(\frac{R_i}{D} \right) + 1}{4 \left(\frac{R_i}{D} \right) + 2} \quad I = \frac{4 \left(\frac{1129.18 in}{10.75 in} \right) + 1}{4 \left(\frac{1129.18 in}{10.75 in} \right) + 2} = \frac{421.16}{422.16} = 0.9976$$

Espesor t para intrados

$$t = \frac{PD}{2\left[\left(\frac{SEW}{I}\right) + P\gamma\right]} = \frac{1536 \frac{lb}{in^2} * 10.75in}{2\left[\left(\frac{23700 \frac{lb}{in^2} * 1}{1.002}\right) + 1536 \frac{lb}{in^2} * 0.4\right]} = \frac{16512}{48534.18} =$$

0.340

Espesor t para extrados

$$t = \frac{PD}{2\left[\left(\frac{SEW}{I}\right) + P\gamma\right]} = \frac{1536 \frac{lb}{in^2} * 10.75in}{2\left[\left(\frac{23700 \frac{lb}{in^2} * 1}{0.9976}\right) + 1536 \frac{lb}{in^2} * 0.4\right]} = \frac{16512}{48742.84} =$$

0.339

$$C = 12.5/100 * (0.5in) = 0.062 \text{ in}$$

$$t_m = t + C = 0.340 \text{ in} + 0.062 \text{ in} = 0.402 \text{ in}$$

$$t \text{ minimo de fabricación} = 0.5 - 0.125 * 0.5 = 0.437 \text{ in.}$$

$$t \text{ minimo de fabricación} > t_m$$

3.3 Variación del esfuerzo circunferencial en una tubería curvada

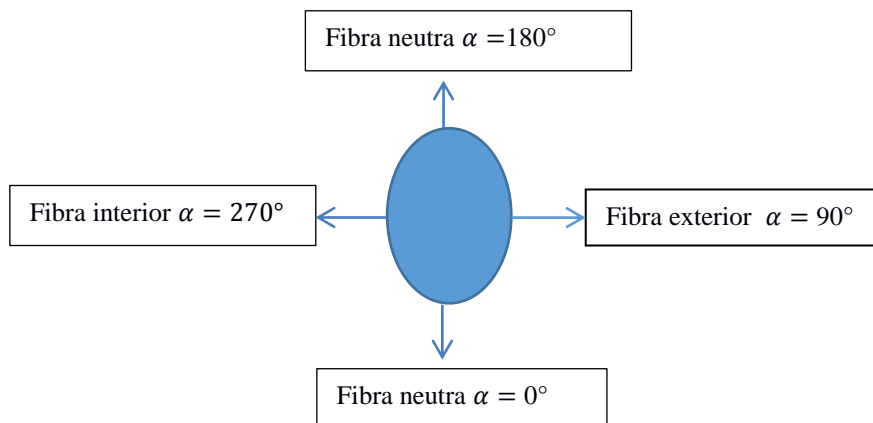
Para calcular los esfuerzos circunferenciales en una tubería curvada se toma como referencia la expresión

$$Sh = \frac{P_i * D}{4t} \left(\frac{2R + r \operatorname{seno} \alpha}{R + r \operatorname{seno} \alpha} \right)$$

- Sh esfuerzos circunferenciales en la tubería curvada, psi
- Pi presión interna, psi
- D diámetro exterior de la tubería, in
- t espesor de pared de la tubería, in.

- R radio de curvatura de la tubería ,in
- r radio interior de la tubería ,in
- α ángulo alrededor de la sección transversal.

Tomando como referencia la sección transversal de una tubería curvada se ubican los puntos donde se calcularán los distintos valores de esfuerzo circunferencial.



$$Sh = \frac{Pi * D}{4t} \left(\frac{2R + r \operatorname{seno}\alpha}{R + r \operatorname{seno}\alpha} \right)$$

Datos para una curva de 14°

$$Pi \quad 1536 \frac{lb}{in^2}$$

$$D \quad 10.75in$$

R (radio de curvatura) 1129.18 in (para un ángulo de curvatura = 14°)

$$r \quad 10.75 \text{ in} / 2 = 5.375 \text{ in.}$$

Sh Para $\alpha = 0^\circ$

$$Sh = \frac{1536 \frac{lb}{in^2} * 10.75in}{4 * 0.307in} \left(\frac{2 * 1129.18 + 5.375 \operatorname{seno}\alpha}{1129.18 + 5.375 \operatorname{seno}\alpha} \right) = 26892.51$$

Sh Para $\alpha = 90^\circ$

$$Sh = \frac{1536 \frac{lb}{in^2} * 10.75in}{4 * 0.307in} \left(\frac{2 * 1129.18 + 5.375 \text{ seno}\alpha}{1129.18 + 5.375 \text{ seno}\alpha} \right) = 26828.92$$

Sh Para $\alpha = 180^\circ$

$$Sh = \frac{1536 \frac{lb}{in^2} * 10.75in}{4 * 0.307in} \left(\frac{2 * 1129.18 + 5.375 \text{ seno}\alpha}{1129.18 + 5.375 \text{ seno}\alpha} \right) = 26892.51$$

Sh Para $\alpha = 270^\circ$

$$Sh = \frac{1536 \frac{lb}{in^2} * 10.75in}{4 * 0.307in} \left(\frac{2 * 1129.18 + 5.375 \text{ seno}\alpha}{1129.18 + 5.375 \text{ seno}\alpha} \right) = 26956.63$$

3.4 Determinación de los espesores aplicando el código ASME B 31.4 y la presión de trabajo tomada del perfil altimétrico.

ALTURA (m)	ABSCISAS	PRESIÒN (PSI) DE TRABAJO	PRESIÒN (PSI) DE PRUEBA	DIAMETRO (INCH)	ESPELOR (IN) ASME B 31.4
30.2	0+000	261	326.25	10.75	0.279
17.76	0+254.11	278	347.5	10.75	0.279
40.46	0+949.97	246	307.5	10.75	0.279
23.72	1+311.68	270	337.5	10.75	0.279
42.94	1+598.68	243	303.75	10.75	0.279
15.74	2+646.21	282	352.5	10.75	0.279
9.14	4+152.611	291	363.75	10.75	0.279
7.7	6+227.13	293	366.25	10.75	0.279
7.4	7+051.06	293	366.25	10.75	0.279
12.51	7+510.45	286	357.5	10.75	0.279
17.18	7+761.28	279	348.75	10.75	0.279
17.29	7+761.29	1521	1901.25	10.75	0.279
10.53	7+977.39	1530	1912.5	10.75	0.279
6.77	7+996.51	1536	1920	10.75	0.279
6.44	9+575.78	1537	1921.25	10.75	0.279
45.77	10+290.91	1480	1850	10.75	0.279
24.87	10+498.50	1509	1886.25	10.75	0.279
40.71	10+593.26	1487	1858.75	10.75	0.279
29.5	10+640.02	1503	1878.75	10.75	0.279
55.61	10+938.01	1466	1832.5	10.75	0.279
30.93	11+173.82	1501	1876.25	10.75	0.279
49.93	11+252.64	1474	1842.5	10.75	0.279
24.7	11+726.79	1510	1887.5	10.75	0.279
38.64	11+891.16	1490	1862.5	10.75	0.279
12.12	12+533.44	1528	1910	10.75	0.279
11.47	12+755.02	1528	1910	10.75	0.279
17.29	12+938	1525	1906.25	10.75	0.279
3.72	13+760	1540	1925	10.75	0.307
7.09	14+180	1535	1918.75	10.75	0.279

ALTURA (m)	ABSCISAS	PRESIÒN (PSI) DE TRABAJO	PRESIÒN (PSI) DE PRUEBA	DIAMETRO (INCH)	ESPEJOR (IN) ASME B 31.4
10.18	14+979.66	1531	1913.75	10.75	0.279
36.81	17+161.94	1493	1866.25	10.75	0.279
28.09	17+262.44	1505	1881.25	10.75	0.279
61.56	17+483	1457	1821.25	10.75	0.279
46.43	17+673.39	1479	1848.75	10.75	0.279
67.17	17+875.03	1449	1811.25	10.75	0.279
29.92	18+123.50	1503	1878.75	10.75	0.279
78.55	18+592.05	1433	1791.25	10.75	0.279
49.8	19+082.31	1474	1842.5	10.75	0.279
66.01	19+337.4	1451	1813.75	10.75	0.279
45.34	19+527.59	1481	1851.25	10.75	0.279
93.85	19+698.43	1412	1765	10.75	0.279
74.54	19+828.30	1439	1798.75	10.75	0.279
114.85	20+000.54	1382	1727.5	10.75	0.279
35.43	20+810.26	1495	1868.75	10.75	0.279
2.66	21+285.56	1541	1926.25	10.75	0.279
27.35	22+189.98	1506	1882.5	10.75	0.279
4.2	22+560	1539	1923.75	10.75	0.279
2.68	25+200	1541	1926.25	10.75	0.279
5.74	28+204.52	1538	1922.5	10.75	0.279
6.59	29+705.95	1536	1920	10.75	0.279
-0.25	29+997.13	1545	1931.25	10.75	0.279
8	30+424.43	1534	1917.5	10.75	0.279
2.75	30+746.53	1541	1926.25	10.75	0.279
5	31+300	1538	1922.5	10.75	0.279
-14	31+629.42	1565	1956.25	10.75	0.307
4.98	32+470	1538	1922.5	10.75	0.279
6.47	32+617.40	1536	1920	10.75	0.307
3.59	34+085.94	1540	1925	10.75	0.279
5.18	41+579.41	1538	1922.5	10.75	0.279
3.77	41+792.95	1540	1925	10.75	0.279
6.3	42+930.11	1536	1920	10.75	0.307
7.33	49+545.47	1535	1918.75	10.75	0.279

ALTURA (m)	ABSCISAS	PRESIÒN (PSI) DE TRABAJO	PRESIÒN (PSI) DE PRUEBA	DIAMETRO (INCH)	ESPEJOR (IN) ASME B 31.4
9.51	50+014.56	1532	1915	10.75	0.279
6.58	50+903	1536	1920	10.75	0.279
7.83	52+040	1535	1918.75	10.75	0.279
5.28	52+131.95	1537	1921.25	10.75	0.279
8.91	54+084.79	1533	1916.25	10.75	0.279
6.49	54+197.62	1536	1920	10.75	0.279
8.86	54+580	1533	1916.25	10.75	0.279
9.22	55+793.24	1532	1915	10.75	0.279
9.6	56+880.75	1532	1915	10.75	0.279
10.18	57+416.19	1531	1913.75	10.75	0.279
11.43	58+360	1529	1911.25	10.75	0.279
15.44	60+389.23	1523	1903.75	10.75	0.279
12.62	61+641.46	1527	1908.75	10.75	0.279
17.21	64+931.47	1520	1900	10.75	0.279
17.27	65+309.09	1521	1901.25	10.75	0.279
19.11	67+377.97	1518	1897.5	10.75	0.279
18.17	68+550	1519	1898.75	10.75	0.279
12.32	68+721.69	1528	1910	10.75	0.307
18.36	68+900	1519	1898.75	10.75	0.279
18.53	69+385.05	1522	1902.5	10.75	0.279
22.71	72+637.19	1513	1891.25	10.75	0.279
23.06	77+555.55	1512	1890	10.75	0.279
24.41	78+616.54	1510	1887.5	10.75	0.279
26.93	81+190	1507	1883.75	10.75	0.279
29.34	83+240.80	1504	1880	10.75	0.279
30.19	84+129.81	1502	1877.5	10.75	0.279
31.15	85+145.52	1501	1876.25	10.75	0.279
32.94	86+84.61	1498	1872.5	10.75	0.279
34.88	87+906.06	1496	1870	10.75	0.279
34.38	90+100	1496	1870	10.75	0.279
29.2	90+218.74	1504	1880	10.75	0.307
34.2	90+360	1497	1871.25	10.75	0.279
	101+941.71	1460	1825	8.65	0.279

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES

- En relación a los resultados obtenidos para el cálculo del espesor según el código ASME B 31.4. El espesor señalado $T = 0.279$ cumple con lo requerido.

$$A = 0 = 0 \text{ in}$$

$$t_m = t + A = 0.217 \text{ in} + 0 \text{ in} = 0.217 \text{ in}$$

$$t \text{ mínimo de fabricación} = 0.279 - 0.125 * 0.279 = 0.244 \text{ in.}$$

$$t \text{ mínimo de fabricación} > t_m .$$

Usando el método de ultrasonido es necesario verificar el espesor de la tubería.

- En relación a la aplicación del código ASME B 31.3 usado para seleccionar el espesor de tubería requerido, se puede concluir que el espesor $T = 0.5 \text{ in.}$ es el adecuado, además que si se aplica la tolerancia negativa de fabricación especificada por el código al espesor nominal, este espesor no será inferior a $t_{m.} = 0.402 \text{ in.}$

$$C = 12.5/100 * (0.5 \text{ in}) = 0.062 \text{ in}$$

$$t_m = t + C = 0.340 \text{ in} + 0.062 \text{ in} = 0.402 \text{ in}$$

$$t \text{ mínimo de fabricación} = 0.5 - 0.125 * 0.5 = 0.437 \text{ in.}$$

$$t \text{ mínimo de fabricación} > t_m$$

- En relación a los esfuerzos circunferenciales para valores de $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 180^\circ$ el valor del esfuerzo circunferencial es el mismo que para una tubería recta y para $\alpha = 90^\circ$ y $\alpha = 270^\circ$ se obtienen los valores mínimos y máximos del esfuerzo circunferencial.
- Tomando como referencia el perfil altimétrico para prueba hidrostática se encuentra que en las abscisas

13+760 cruce de río.

31+629.42 cruce de río.

42+930.11 cruce de río.

68+721.69 cruce de río.

90+218.74 cruce de río.

Se necesita incrementar el espesor de 0.279 a 0.307 como una medida de protección.

RECOMENDACIONES

- Es necesario verificar el espesor de la tubería, antes y después de realizar la curva de tubería
- Es necesario pasar una placa de verificación por el interior de la tubería antes y después de realizar la curvatura

BIBLIOGRAFÍA

- 1) CODIGO ASME B 31.3 tubería de procesos: Se encuentran típicamente en las refinerías de petróleo, en plantas químicas, farmacéuticas, papeleras, de semiconductores y criogénicas, y en plantas y terminales relacionadas con el procesamiento.
- 2) CODIGO ASME B 31.4 sistemas de tuberías para transporte de hidrocarburos líquidos y otros líquidos: tuberías para el transporte de productos, predominantemente líquidos, entre plantas y terminales, y tuberías ubicadas dentro de terminales, estaciones de bombeo, y estaciones para regulación y medición.
- 3) Código API 5L especificación for line pipe
- 4) Resistencia de materiales Ferdinand L. Singer/Andrew Pitel tercera edición.
- 5) Diseño en ingeniería mecánica Joseph Edward Shigley /Charles Rmischke
- 6) Piping and pipeline calculations manual construction, desing fabrication and examination.
- 7) Piping and pipeline engineering George A. Antaki
- 8) Perfil altimétrico para prueba hidrostática Empresa X