

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



**Métodos constructivos de control de esfuerzos en tuberías de
transporte con presiones estables mediante análisis de
flexibilidad**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO**

AUTORES:

Br. Varas Veliz, Roosevelt

Br. Collantes Alonso, Alexander Félix

ASESOR:

MSc. Ing. Risco Ojeda, Rusber Alberto

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2025

HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

El presente informe de tesis titulado:

“MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE CONTROL DE ESFUERZOS EN TUBERÍA DE TRANSPORTE CON PRESIONES ESTABLES MEDIANTE ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD”

elaborado por los bachilleres **VARAS VELIZ, ROOSEVEL Y COLLANTES ALONZO, ALEXANDER FELIX** para optar por el Título Profesional de Ingeniero Mecánico.

Ha contado con el asesoramiento de quien deja constancia de su aprobación. Por tal motivo, firmo el presente trabajo en calidad de asesor.



Msc. Risco Ojeda, Rusber Alberto
COD. ORCID. 0000-0003-0194-169X
DNI: 32903454
ASESOR

HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente informe de tesis titulado:

“MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE CONTROL DE ESFUERZOS EN TUBERÍA DE TRANSPORTE CON PRESIONES ESTABLES MEDIANTE ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD”

elaborado por los bachilleres **VARAS VELIZ, ROOSEVEL Y COLLANTES ALONZO, ALEXANDER FELIX** para optar por el Título Profesional de Ingeniero Mecánico.

Fue revisado y aprobado por el siguiente Jurado Evaluador.



Msc. Escalante Espinoza, Nelver Javier
COD. ORCID. 000-0001-8586-3021
DNI: 32763819
PRESIDENTE



Msc. Calderón Rodríguez, Luis Carlos
COD. ORCID. 0000-0002-9447-2257
DNI: 32977058
INTEGRANTE



Msc. Risco Ojeda, Rusber Alberto
COD. ORCID. 0000-0003-0194-169X
DNI: 32903454
INTEGRANTE

ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

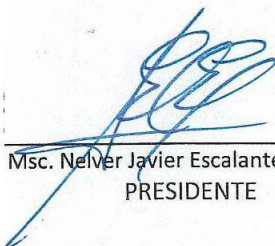
A los cuatro días del mes de julio del año dos mil veinticinco, siendo las 11:30 a.m., En el Laboratorio de Uso Múltiple de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica-FI-UNS, en concordancia a lo dispuesto en el Oficio Múltiple N° 034-2022-UNS-CU-SG, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 075-2024-UNS- CFI, y de expedito según Resolución Decanal N° 375-2025-UNS-FI integrado por los docentes: **Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza (Presidente)**, **Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez (Secretario)** y el **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (Integrante)**, para dar inicio a la sustentación de la Tesis titulada: **“MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE CONTROL DE ESFUERZOS EN TUBERIAS DE TRANSPORTE CON PRESIONES ESTABLES MEDIANTE ANALISIS DE FLEXIBILIDAD”**, perteneciente a los bachilleres: **VARAS VELIZ ROOSEVELT con Código N° 0201116044** y **COLLANTES ALONSO ALEXANDER FELIX con Código N° 0201116049**, quien fue asesorado por el Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda, según Resolución Decanal N° 033-2021-UNS-FI.

El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
COLLANTES ALONSO ALEXANDER FELIX	16	REGULAR

Siendo las 12:30 p.m. del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, julio 04 de 2025



Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza
PRESIDENTE



Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez
SECRETARIO



Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda
INTEGRANTE

ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

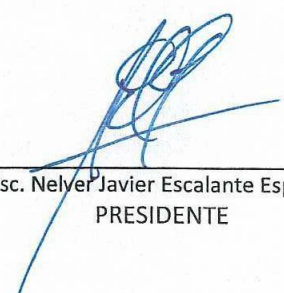
A los cuatro días del mes de julio del año dos mil veinticinco, siendo las 11:30 a.m., En el Laboratorio de Uso Múltiple de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica-FI-UNS, en concordancia a lo dispuesto en el Oficio Múltiple N° 034-2022-UNS-CU-SG, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 075-2024-UNS- CFI, y de expedito según Resolución Decanal N° 375-2025-UNS-FI integrado por los docentes: **Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza (Presidente)**, **Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez (Secretario)** y el **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (Integrante)**, para dar inicio a la sustentación de la Tesis titulada: **"MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE CONTROL DE ESFUERZOS EN TUBERIAS DE TRANSPORTE CON PRESIONES ESTABLES MEDIANTE ANALISIS DE FLEXIBILIDAD"**, perteneciente a los bachilleres: **VARAS VELIZ ROOSEVELT con Código N° 0201116044** y **COLLANTES ALONSO ALEXANDER FELIX con Código N° 0201116049**, quien fue asesorado por el Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda, según Resolución Decanal N° 033-2021-UNS-FI.

El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

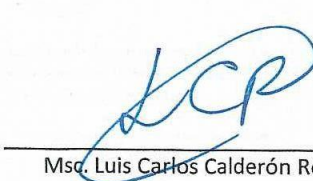
BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
VARAS VELIZ ROOSEVELT	16	REGULAR

Siendo las 12:30 pm del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, julio 04 de 2025



Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza
PRESIDENTE



Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez
SECRETARIO



Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Roosevelt VARAS VELIZ
Título del ejercicio:	Tesis
Título de la entrega:	MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE CONTROL DE ESFUERZOS EN ...
Nombre del archivo:	T._Varas_Veliz_Collantes_Alonso._vMM.pdf
Tamaño del archivo:	4.83M
Total páginas:	160
Total de palabras:	26,407
Total de caracteres:	145,545
Fecha de entrega:	20-sept-2025 03:35p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2756566540

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

 **UNS**
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE CONTROL DE ESFUERZOS EN
TUBERÍAS DE TRANSPORTE CON PRESIONES ESTABLES MEDIANTE
ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO

AUTORES:

Br. Roosevelt Varas Veliz
Br. Alexander Félix Collantes Alonso

ASESOR:

MSc. Ing. RUSHER ALBERTO RISCO OJEDA

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ
2025

MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE CONTROL DE ESFUERZOS EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE CON PRESIONES ESTABLES MEDIANTE ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD

INFORME DE ORIGINALIDAD

23 %

INDICE DE SIMILITUD

22 %

FUENTES DE INTERNET

1 %

PUBLICACIONES

6 %

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

vdocuments.es

Fuente de Internet

4 %

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

4 %

3

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

3 %

4

tesis.ipn.mx

Fuente de Internet

1 %

5

Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru

Trabajo del estudiante

1 %

6

pt.scribd.com

Fuente de Internet

1 %

7

www.scribd.com

Fuente de Internet

1 %

8

idoc.tips

Fuente de Internet

1 %

9

idoc.pub

Fuente de Internet

DEDICATORIA

*“A Dios, ingeniero del universo, que mi ejercicio sea
siempre su voluntad”*

“A mi familia, por su apoyo para culminar este trabajo”

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	4
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. ANTECEDENTES	5
2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	10
2.2.1. DEFINICION DE FLEXIBILIDAD.....	10
2.2.2. DEFINICION ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD.....	10
2.2.3. OBJETIVOS DE UN ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD	10
2.2.4. DISEÑOS POR FLEXIBILIDAD	11
2.2.5. ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD DEL SISTEMA DE TUBERÍAS.....	12
2.2.6. CONCEPTOS BÁSICOS	13
2.2.6.1. Momento de inercia (I)	13

2.2.6.2. Módulo de sección (Z).....	14
2.2.6.3. Momento de elasticidad (E)	14
2.2.6.4. Curva esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y no dúctiles	15
2.2.6.5. Coeficiente de Expansión.	16
2.2.6.6. Relación de Poisson.	16
2.2.6.7. Factor de Flexibilidad.....	16
2.2.6.8. Factor de Intensificación de Esfuerzo (SIF).....	17
2.2.6.9. Factor de Reducción de Rango de Esfuerzo (f).....	18
2.2.6.10. Flexibilidad y Rigidez	18
2.2.7. PRESIÓN MANOMÉTRICA.....	22
2.2.8. TEMPERATURA DE FLUIDO	22
2.2.9. GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	23
2.2.10. DIÁMETRO DE TUBERÍA.....	23
2.2.11. ESPESOR DE TUBERÍA.....	23
2.2.12. EFECTOS DE VELOCIDAD DE ONDA (PRODUCIDO POR UN GOLPE DE ARIETE).....	24
2.2.13. CARGAS DE SISMO Y VIENTO	24
2.2.14. FLEXIBILIDAD DEL SISTEMA DE BOMBEO.....	25
2.2.15. CARGAS SOBRE UN SISTEMA DE TUBERÍAS.....	25
2.2.16. ESFUERZOS EN TUBERÍAS	26
2.2.16.1. Esfuerzos sostenidos o primarios	27
2.2.16.2. Esfuerzos por expansión o secundario	33
2.2.16.3. Esfuerzos ocasionales o terciarios	35
2.2.16.4. Esfuerzos admisibles	36
2.2.16.5. Rango de esfuerzos Admisible	38

2.2.17. SOPORTES DE TUBERÍA.....	39
2.2.18. UNIONES FLEXIBLES.....	43
2.2.19. UNIONES RÍGIDAS.....	44
2.2.20. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE TUBERÍAS.....	46
2.2.21. SISTEMA DE CONEXIONES EN SERIE Y EN PARALELO	47
2.2.22. CATEGORIZACIÓN DE LAS LÍNEAS	49
2.2.22.1. Categoría I.....	50
2.2.22.2. Categoría II.....	50
2.2.22.3. Categoría III	51
2.2.22.4. Categoría IV	52
2.2.23. NORMAS DE ANÁLISIS	52
III. METODOLOGÍA.....	53
3.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	53
3.2. MÉTODO	53
3.2.1. TIPOS DE ANÁLISIS APLICADOS AL SISTEMA DE TUBERÍAS	54
3.2.1.1. Análisis Visual	54
3.2.1.2. Análisis Manual o Aproximados	55
3.2.1.3. Análisis Formal	55
3.2.1.4. Análisis De Peso Muerto.....	55
3.2.1.5. Análisis Misceláneos.....	55
3.2.2. REQUERIMIENTO DE UN ANALISIS FORMAL.....	56
3.2.3. CRITERIOS GENERALES PARA DETERMINAR SI UN SISTEMA DE TUBERÍA REQUIERE ANÁLISIS FORMAL.....	57
3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	58
a) Búsqueda y análisis de información técnica y del estado del arte	59

b) Identificación de variables clave.....	59
c) Construcción de un modelo de análisis.....	59
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	59
3.5. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	60
3.5.1. CONDICIONES AMBIENTALES Y DE OPERACIÓN	60
3.5.2. CARACTERÍSTICAS DE TUBERÍA	62
3.6. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
3.7. VARIABLES DE ESTUDIO	63
3.8. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	64
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
4.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DEL SISTEMA	65
4.2. DESPLAZAMIENTOS DEBIDO A LA DEFORMACIÓN.....	65
4.3. ESFUERZOS POR DESPLAZAMIENTO	66
4.4. ANÁLISIS CONSIDERANDO LAS CARGAS EN LAS TUBERÍAS.....	66
4.4.1. MÉTODO PRÁCTICO PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE	67
4.5. ANÁLISIS CONSIDERANDO LA PRESIÓN EN LAS TUBERÍAS	70
4.5.1. SISTEMA DE TUBERÍAS.....	70
4.5.2. CARGA TOTAL DE BOMBEO	72
4.6. ANÁLISIS CONSIDERANDO LA TEMPERATURA EN LAS TUBERÍAS	77
4.7. ANÁLISIS CONSIDERANDO EL ESPESOR.....	78
4.8. SIMULACIÓN EN CAESAR II	86
4.8.1 MODELO ORIGINAL CON SOPORTES DISPUESTOS ARBITRARIAMENTE	86

4.8.2. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS CON EL PROGRAMA	96
4.8.3. IDEALIZACIONES DEL MODELO.....	100
4.8.4. RESULTADOS DEL MODELO MODIFICADO	106
4.8.5. DESCRIPCIÓN DE LOS ESFUERZOS OBTENIDOS A LO LARGO DE LA TUBERÍA.....	110
4.8.6. DESCRIPCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS	117
4.9. EVALUACIÓN DE COSTOS Y COMPARATIVA	121
4.9.1. Condición de contorno 1: Soporte tipo guía tubería.	121
4.9.2. Condición de contorno 2: Apoyo tipo silleta	122
4.9.3. Condición de contorno 3: Abrazadera o U-bolt	123
4.9.4. Condición de contorno 4: Anclaje tipo estructural o dado de concreto	124
4.10. SIMULACIÓN DE FLUJO Y COMPORTAMIENTO OPERATIVO.....	128
4.11. DISCUSIÓN	131
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
5.1. CONCLUSIONES.....	133
5.2. RECOMENDACIONES.....	135
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES	136
VII. ANEXOS	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama de flexibilidad y tensión en función del tiempo a temperatura elevada</i>	13
Figura 2 <i>Curva esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y no dúctiles.....</i>	15
Figura 3 <i>Representación de un resorte para analizar flexibilidad y rigidez.....</i>	19
Figura 4 <i>Componentes del esfuerzo longitudinal en tuberías</i>	27
Figura 5 <i>Esfuerzo de Hoop en una tubería sometida a presión interna</i>	29
Figura 6 <i>Distribución del esfuerzo radial en una tubería presurizada</i>	30
Figura 7 <i>Fórmula de esfuerzo cortante máximo</i>	31
Figura 8 <i>Cálculo del esfuerzo cortante máximo en torsión.....</i>	32
Figura 9 <i>Diagrama de fuerzas y momentos en una viga</i>	33
Figura 10 <i>Representación del plano de un codo.....</i>	35
Figura 11 <i>Representación del plano de un codo con ramal.....</i>	35
Figura 12 <i>Soporte sobre clips soldados a equipo</i>	40
Figura 13 <i>Guía horizontal</i>	41
Figura 14 <i>Zapata soldada</i>	42
Figura 15 <i>Zapata con abrazaderas</i>	43
Figura 16 <i>Uniones flexibles.....</i>	44
Figura 17 <i>Uniones rígidas.....</i>	45
Figura 18 <i>Sistema de bombeo en paralelo</i>	47
Figura 19 <i>Conexión de bombas en serie</i>	48
Figura 20 <i>Efecto de las bombas hidráulicas que funcionan en serie y en paralelo</i>	49
Figura 21 <i>Alturas en un sistema de bombeo.....</i>	71
Figura 22 <i>Análisis del espesor de la tubería</i>	78
Figura 23 <i>Comportamiento elástico de la tubería</i>	80

Figura 24 <i>Trazo original del sistema de bombeo</i>	87
Figura 25 <i>Material de tubería empleada</i>	88
Figura 26 <i>Código de diseño usado en el modelo</i>	88
Figura 27 <i>Diámetros empleados en el modelo</i>	89
Figura 28 <i>Diámetros empleados en el modelo</i>	89
Figura 29 <i>Temperatura de análisis 1 (10 °C)</i>	90
Figura 30 <i>Temperatura de análisis 1 (20 °C)</i>	90
Figura 31 <i>Presión manométrica 280 psig</i>	91
Figura 32 <i>Densidad del fluido 1000 kg/m³</i>	91
Figura 33 <i>Sismo en “X” 0.7 g</i>	92
Figura 34 <i>Sismo en “Y” 0.47g (2/3)</i>	92
Figura 35 <i>Sismo en “Z” 0.7 g</i>	93
Figura 36 <i>Cargas aplicadas al sistema de tuberías del modelo</i>	93
Figura 37 <i>Casos de carga analizados</i>	94
Figura 38 <i>Casos No.1 Prueba Hidrostática (% esfuerzo máximo)</i>	95
Figura 39 <i>Casos No.18 Sostenimiento (% esfuerzo máximo)</i>	95
Figura 40 <i>Casos No.27 Cargas Ocasionales (% esfuerzo máximo)</i>	96
Figura 41 <i>Diagrama de cuerpo libre de una tubería vacía cargada</i>	97
Figura 42 <i>Valores de reacciones</i>	98
Figura 43 <i>Valores de desplazamiento</i>	99
Figura 44 <i>Condición de borde en extremo de tubería</i>	101
Figura 45 <i>Condición de contorno 1: Soporte tipo guía tubería</i>	102
Figura 46 <i>Condición de contorno 2: Apoyo tipo silleta</i>	103
Figura 47 <i>Condición de contorno 3: Abrazadera o U-bolt. Fuente: Fluor Design</i>	
<i>Standard pipe support</i>	104

Figura 48 <i>Condición de contorno 4: Anclaje tipo estructural o dado de concreto.</i>	105
Figura 49 <i>Casos de carga Analizados a ser evaluados</i>	106
Figura 50 <i>Resultados del modelo modificado, analizado en el nodo 150</i>	108
Figura 51 <i>Resultados de esfuerzo: Nodo No10@60</i>	111
Figura 52 <i>Resultados de esfuerzo: Nodo No60@90</i>	112
Figura 53 <i>Resultados de esfuerzo: Nodo No90@140</i>	113
Figura 54 <i>Resultados de esfuerzo: Nodo No.140@160</i>	114
Figura 55 <i>Resultados de esfuerzo: Nodo No.160@190</i>	115
Figura 56 <i>Resultados de esfuerzo: Nodo No.190 @210</i>	116
Figura 57 <i>Resultados de esfuerzo: Nodo No.210 @300</i>	117
Figura 58 <i>Desplazamiento máximo en dirección “X”</i>	118
Figura 59 <i>Desplazamiento máximo en dirección “Y”</i>	119
Figura 60 <i>Desplazamiento máximo en dirección “Z”</i>	120
Figura 61 <i>Soporte tipo guía – Elaboración propia</i>	121
Figura 62 <i>Soporte tipo apoyo – Elaboración propia</i>	122
Figura 63 <i>Soporte tipo apoyo – Elaboración propia</i>	123
Figura 64 <i>Soporte tipo dado – Elaboración propia</i>	124
Figura 65 <i>Simulación del esfuerzo tangencial</i>	129
Figura 66 <i>Simulación del esfuerzo radial</i>	130
Figura 67 <i>Simulación del esfuerzo longitudinal</i>	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Factor de reducción del rango de esfuerzo según número de ciclos</i>	18
Tabla 2	<i>Comparación entre flexibilidad y rigidez.....</i>	20
Tabla 3	<i>Comparación del desplazamiento entre dos resortes bajo la misma carga... </i>	21
Tabla 4	<i>Condiciones ambientales y de operación.....</i>	61
Tabla 5	<i>Características de tubería a emplear.....</i>	62
Tabla 6	<i>Operacionalización de las variables.....</i>	64
Tabla 7	<i>Coeficiente K, inercia del equipo de bombeo.....</i>	68
Tabla 8	<i>Coeficiente C. Suple el efecto de otras energías en el cálculo.....</i>	68
Tabla 9	<i>Coeficiente C. Suple el efecto de otras energías en el cálculo.....</i>	69
Tabla 10	<i>Características físicas de las tuberías.....</i>	71
Tabla 11	<i>Propiedades del fluido para calcular la carga de bombeo.....</i>	72
Tabla 12	<i>Cálculo del Número de Reynolds y Rugosidad Relativa de cada tubería</i>	72
Tabla 13.	<i>Datos para calcular la carga total de bombeo</i>	73
Tabla 14	<i>Pérdidas primarias generales</i>	73
Tabla 15	<i>Coeficiente de pérdidas secundarias en accesorios de la succión.....</i>	74
Tabla 16	<i>Coeficiente de pérdidas secundarias accesorias durante la descarga.....</i>	75
Tabla 17	<i>Total de pérdidas secundarias</i>	76
Tabla 18	<i>Pérdidas de carga total</i>	76
Tabla 19	<i>Análisis de los sistemas de bombeo.....</i>	77
Tabla 20	<i>Factor Y para $t < D/6$</i>	79
Tabla 21	<i>Factores de calidad básico para soldadura.....</i>	83
Tabla 22	<i>Resistencia especificada del material “$S=20000si$”</i>	84
Tabla 23	<i>Tabla 302.3.5 Factor de Reducción de soldadura “$W=I$”</i>	85
Tabla 24	<i>Tabla 304.1.1 Valores del Coeficiente “$Y=0.4$”</i>	85

Tabla 25 <i>Tabla 1- Diámetro nominal de una tubería $D=406.4\text{mm}$</i>	86
Tabla 26 <i>Variación verificada.....</i>	100
Tabla 27 <i>Valores originales de las reacciones en cada anclaje propuesto.....</i>	107
Tabla 28 <i>Reacciones en cada soporte de tubería luego de las modificaciones.....</i>	109
Tabla 29 <i>Costo por cada soporte tipo guía</i>	122
Tabla 30 <i>Costo por cada soporte tipo guía</i>	123
Tabla 31 <i>Costo por cada soporte tipo U-Bolt</i>	124
Tabla 32 <i>Costo por cada soporte tipo U-Bolt</i>	125
Tabla 33 <i>Costos Unitarios – Fabricación de estructuras livianas.....</i>	125
Tabla 34 <i>Costos Unitarios – Montaje Estructuras livianas</i>	126
Tabla 35 <i>Costos Unitarios – Suministro y colocación acero refuerzo</i>	126
Tabla 36 <i>Costos Unitarios – Concreto armado</i>	127
Tabla 37 <i>Resumen de costos para cada tipo de anclaje.....</i>	128

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfocó en el análisis de flexibilidad de un sistema de tuberías en una unidad minera, con el fin de evaluar alternativas constructivas que permitan controlar los esfuerzos mecánicos durante la operación de bombeo de agua subterránea. Se propone un sistema de bombeo con una carga total de 255 mca y un caudal de 170 l/s, utilizando una configuración de bombas GIW-LSA que reemplaza parcialmente a bombas RPH de 750 HP, optimizando el rendimiento y la disponibilidad operativa del sistema. El estudio considera diversos factores que influyen en los esfuerzos de la tubería, como la presión manométrica, la temperatura del fluido y el espesor de la tubería. A través de simulaciones y cálculos normativos basados en ASME B31.3, se determinó que la presión máxima de análisis (280 psi) no genera efectos críticos, mientras que el espesor de 0.5 pulgadas proporciona un régimen elástico seguro frente a deformaciones del 32%. La temperatura de operación (10 °C) se encuentra dentro de rangos permisibles, sin provocar dilataciones térmicas considerables. Además, se analizó el impacto de las cargas sísmicas y de los soportes estructurales sobre la estabilidad del sistema, proponiendo el uso racional de soportes tipo apoyo, guía y anclaje. Finalmente, se demuestra que una correcta disposición de estos elementos permite absorber momentos críticos y desplazamientos sin comprometer la integridad del sistema, favoreciendo a su vez la eficiencia constructiva y la reducción de costos.

Palabras clave: análisis de flexibilidad, esfuerzo en tuberías, presión, temperatura, espesor, soporte, ASME B31.3, sistema de bombeo.

ABSTRACT

This research focuses on the flexibility analysis of a piping system in a mining facility, aiming to evaluate constructive alternatives that help control mechanical stresses during underground water pumping operations. A pumping system with a total head of 255 meters and a flow rate of 160 L/s is proposed, using a GIW-LSA pump configuration that partially replaces 750 HP RPH pumps, optimizing both performance and operational availability. The study considers key factors affecting pipe stress, such as gauge pressure, fluid temperature, and pipe wall thickness. Simulations and normative calculations based on ASME B31.3 demonstrated that the maximum operating pressure (280 psi) does not generate critical effects, while a 0.5-inch wall thickness ensures safe elastic behavior up to 32% strain. The operating temperature (10 °C) remains within permissible ranges, with no significant thermal expansion effects. Furthermore, the influence of seismic loads and structural supports on system stability was analyzed, leading to the rational selection of support types including saddles, guides, and anchors. The results confirm that proper support distribution effectively absorbs critical moments and displacements without compromising system integrity, while improving construction efficiency and reducing costs.

Keywords: flexibility analysis, pipe stress, pressure, temperature, thickness, support, ASME B31.3, pumping system.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas de tuberías se utilizan en diversas industrias de todo el mundo, como la minería, la petroquímica, la alimentaria, las refinerías, la farmacéutica y la construcción. El fluido que discurrirá por estos sistemas de tuberías determina el grado de desarrollo de su diseño y análisis.

Las fallas en estos sistemas generan fugas que impactan negativamente en aspectos humanos, ecológicos, técnicos y económicos. En los seres humanos, por ejemplo, pueden resultar con heridas mortales o graves por incendios o explosiones ocasionados por fugas de gas o gasolina. En lo ecológico, se contaminan suelos, flora y fauna y el agua de consumo no solo animal, sino también de los seres humanos, en el aspecto técnico repercute grandemente en la producción de las industrias. De igual manera se pueden contaminar por fugas de aguas contaminadas de desechos industriales. En relación con el factor económico, se hace necesario hacer reparaciones, por lo que las operaciones deben paralizarse, a su vez se realizan indemnizaciones por los daños ocasionados lo que genera pérdidas económicas a la empresa (Rojas, 2021).

En el sector industrial del Perú, las tuberías de acero representan la manera más efectiva de transporte de fluidos para diferentes aplicaciones y servicios. Existen sistemas de tubería con bombeo mediante una máquina hidráulica, generando presiones manométricas internas altas y bajas, a la vez también existen sistemas presurizados mediante un diferencial de alturas geodésicas, también llamados sistemas presurizados por gravedad. En ambos casos la presencia de esfuerzos producto de presiones positivas y negativas en su interior, constituyen cargas importantes para las evaluaciones de tensiones y deformaciones de los sistemas de tuberías. (Montao, 2017).

Muy aparte de estas cargas, también otras cargas asociadas a dilataciones térmicas y movimientos axiales producto de la interferencia de equipos de bombeo o compresores son tomadas en cuenta. A la vez también están las cargas ocasionales que tienen un comportamiento no periódico, pero en su gran mayoría se presentan como cargas impulsivas, ejemplos de este tipo de cargas son: el golpe de ariete, cargas sísmicas, cargas de viento y algunas descargas de válvulas de alivio. Dado la diversidad de cargas externas que representan variables externas asociadas a un sistema de bombeo, es necesario a criterio del diseñador, tomar las que se indican en normativa o las que a juicio de expertos pueden optimizar un sistema de bombeo. Es por esta razón que el diseño por flexibilidad es aplicable y necesario para algunos sistemas de transporte de fluido (Chero, 2018).

En este sentido, uno de los primordiales desafíos que enfrentan, por ejemplo, las empresas mineras en el Perú, son las restauraciones de fisuras y roturas en las tuberías al costo más bajo posible; no solamente por los efectos negativos en el aspecto económico que representa el tener que paralizar las operaciones, sino también por las consecuencias sociales y ambientales que implican la fuga de fluidos contaminantes (Cervera, 2021). Si bien las normativas internacionales tales como la norma ASME B31.3 y normativas locales garantizan un comportamiento aceptable para la operación de un sistema de transporte presurizado, ninguna de estas exigencias sugiere optimizaciones de diseño para generar ahorros significativos durante la construcción.

Esta carencia de información de resultados de esfuerzos en tuberías, comparados con planteamientos de diseño optimizados y sustentados por costos asociados de instalación durante la construcción no han sido abordadas de manera integral por muchos autores de bibliografía especializada ni por diseñadores especialistas que laboran en diferentes empresas de ingeniería del país.

En relación a los planteamientos anteriores, la finalidad de esta investigación es evaluar la opción de construcción aplicada en una unidad minera durante la operación de un procedimiento que utiliza el bombeo para la captación de mantos acuíferos, a través de un análisis de flexibilidad del sistema.

En este sentido, se analizó el sistema de tuberías con la finalidad de advertir si las pérdidas hidráulicas se encuentran según el plan o proyecto original. Sin embargo, se determinó que la altura de pérdida por fricción sería de ocho metros y la altura de pérdida secundaria de seis metros, lo que significaba que la altura inicial se habría superado en cinco metros. Esta situación ha ocasionado el continuo recalentamiento de los motores eléctricos del sistema de bombeo afectando su eficacia y ocasionando un alto consumo de energía.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida los métodos constructivos influyen en el control de los esfuerzos en las tuberías de transporte con presiones estables mediante el análisis de flexibilidad?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Aplicar los métodos constructivos de control de esfuerzos en tuberías de transporte con presiones estables mediante análisis de flexibilidad.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Evaluar la presión manométrica sobre la flexibilidad de las tuberías.
- b) Evaluar el impacto del espesor de las tuberías de conducción sobre la flexibilidad del sistema.
- c) Evaluar el impacto de la temperatura del fluido sobre la flexibilidad de las tuberías.
- d) Plantear alternativas de construcción menos costosas mediante el análisis de

diferentes configuraciones de soporte.

1.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Al mejorar los métodos constructivos de control de esfuerzos en tuberías de transporte con presiones estables se reducirá la flexibilidad de las tuberías.

1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

En términos prácticos, el desarrollo de esta actividad de investigación está justificado, debido a que permitirá analizar el método constructivo en el sistema de tuberías de la unidad minera a través de un análisis de flexibilidad del sistema, quedando pendiente el efecto de este sobre los costos de construcción asociados. Asimismo, en el ámbito teórico permitirá la creación de más conocimiento respecto a las diferentes posibilidades de plantear alternativas para reducir los esfuerzos y deformaciones elevadas en un sistema de bombeo mediante el análisis de flexibilidad.

En los aspecto social – económico la generación de trabajo considerando métodos de construcción más eficientes generará una mejor productividad y eleva la competitividad del país. De la misma forma optimizando los procesos constructivos generan mejor huella de carbono contribuyendo a la protección del medio ambiente.

En el aspecto metodológico, la ingeniería mecánica está en capacidad de dar solución a la problemática planteada, pues, del análisis de flexibilidad se obtendrán los datos precisos para disminuir los esfuerzos y deformaciones en tuberías. En cuanto a la justificación ambiental, radica en que propone alternativas de construcción para evitar fugas que contaminen los suelos, el agua, afectando a la flora, fauna y a los seres humanos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

En relación con los antecedentes a nivel internacional, Janusz et al. (2021), publicaron un artículo científico, en Polonia, titulado *Methodology for the numerical calculation of flexibility analysis of the cryogenic pipelines with vacuum insulation*, donde presentan métodos numéricos de modelado de tuberías criogénicas con aislamiento al vacío. Seleccionaron como objeto de prueba una línea de nitrógeno de un solo canal con aislamiento al vacío y una compensación natural tipo U aplicada. Los cálculos los realizaron con el software CAEPIPE y Ansys. El requisito principal del análisis de tensión de tuberías fue garantizar la suficiente flexibilidad en el sistema de tuberías. Con base en el análisis de flexibilidad, determinaron las tensiones en los puntos principales de la tubería, analizaron los desplazamientos y, lo más importante, las fuerzas que actúan sobre los soportes; como un aspecto esencial relacionado con el correcto funcionamiento del sistema de tuberías. El análisis de flexibilidad se discutió en los estándares ASME B31.3-2006 Proceso de tuberías y McIntosh, Diseño de línea de transferencia con camisa de vacío, Manual de ingeniería criogénica. Utilizaron el CAEPIPE para realizar el análisis de flexibilidad, Concluyeron que el software de computadora apropiado demuestra ser muy útil; tanto el software FEM clásico como las herramientas especializadas (CAEPIPE) se pueden aplicar con éxito a las instalaciones criogénicas con camisa de vacío, al mismo tiempo que también se usan los valores de sus cargas obtenidos del análisis de flexibilidad como condiciones de contorno.

Rojas (2021) realizó una tesis de maestría en Colombia en la que presentó los resultados de ensayos de laboratorio y modelación para la obtención de esfuerzos mecánicos en tuberías API X42 Schedule 40 de 8 pulgadas sometidas a presión interna y flexión, simulando escenarios ideales de interacción con el suelo en tuberías de transporte enterradas. Este autor

utilizó el software Ansys para ejecutar un modelo con el que analizar el comportamiento a flexión de la tubería mediante ocho ensayos de laboratorio, aplicando presiones y fuerzas de flexión en el centro de los tubos para producir deformaciones unitarias, midiendo después con once galgas extensométricas en cada tubo. Además, realizó mediciones de la coacción interna impuesta, la carga y el desplazamiento del centro del tubo. Concluyó obteniendo un modelo de tensiones de los tubos ensayados mediante deformaciones unitarias para confirmar la escasa incidencia de la presión interna de la tubería y resistencia a la flexión. También confirmó las limitaciones y defectos de la topología y el algoritmo utilizados para instalar manómetros en un ángulo de 120 grados alrededor de una tubería para calcular las deflexiones máximas de la tubería. Simultáneamente, compararon los niveles de deformación adquiridos con los requisitos de deformación unitaria máxima de diversos códigos de tuberías, demostrando las ventajas y limitaciones del uso de galgas extensométricas resistivas para cuantificar las deformaciones de hidrocarburos debidas a la flexión y la presión interna.

Salgado (2020) investigó el efecto del tapajuntas en un examen de flexibilidad en un sistema hídrico chileno. Para determinar el grado de asociación entre la intermitencia y las tensiones y cargas provocadas por la tubería aguas abajo, se investigó la sensibilidad del estudio incluyendo la intermitencia en la simulación numérica del sistema. Todo ello de acuerdo con la norma ASME B 31.3 para el análisis de los esfuerzos provocados por cargas sostenidas y dilataciones térmicas. En este procedimiento se definieron las distintas calidades de vapor que debían investigarse y, a continuación, se realizaron cálculos para determinar las fuerzas que resultan de este hecho en los cambios de dirección, así como el cambio de velocidades. Los datos se analizaron con el software CAESAR II para investigar el impacto de los fenómenos en el sistema, que se representó como una fuerza que reacciona a los cambios de dirección. Examinamos los distintos escenarios de carga y sus efectos en todo el sistema aguas abajo. Por último, utilizó tablas y gráficos para examinar la relación entre las cargas causadas por el

tapajuntas y los esfuerzos y cargas producidos por el estudio. Determinó que, en aras de la flexibilidad de este sistema, el fenómeno provoca un aumento de los esfuerzos y tensiones del sistema, por lo que el tapajuntas debe tenerse en cuenta en este estudio.

Fonseca (2018) realizó un estudio en Colombia sobre el diseño y análisis informatizado conforme a las normas internacionales ASME-ANSI de la flexibilidad de las tuberías en la zona de bombeo de una instalación acuática. Mediante un análisis de flexibilidad y una selección de materiales adecuada, es decir, el cumplimiento de normas internacionales como ANSI-ASME B31.3, API 610 y ASTM A106B, se garantizó el diseño de los sistemas de tuberías y el funcionamiento de la planta. Los análisis de flexibilidad y dilatación se realizaron con la intención de evitar la putrefacción del material provocada por un diseño deficiente de las tuberías. Recibe la información que necesita del análisis de flexibilidad, incluida la posición de los apoyos y las cargas que éstos soportarán, así como las limitaciones que deben respetar los oleoductos, y así evitar roturas y vertidos. Llega a la conclusión de que las cargas, desplazamientos y tensiones en las sujeciones estaban dentro de los márgenes admisibles. De este modo se garantiza la integridad de los sistemas durante todo el funcionamiento de la planta, velando por la seguridad de sus trabajadores. Las configuraciones de fontanería cumplen las especificaciones de la norma ASME B31.3. Ninguna de las tensiones de las tuberías supera los niveles máximos de tensión del código.

A nivel nacional Peñaloza (2020) investigó los efectos de variación de presiones y temperaturas para aplicaciones de servicio de pulpa minera en diferentes condiciones de soportes mecánicas ubicados a diferentes distancias. Algunas conclusiones importantes basadas en su trabajo reflejan el bajo nivel de inherencia de presiones bajas menores a 100 psig, sin embargo, el uso de uniones flexibles puede tener impactos importantes en el diseño y estabilidad del sistema si no se analiza con acuciosidad.

Utilizando el software Solidworks Flow Simulation y teniendo en cuenta el contexto nacional, Baca (2020) terminó de analizar la flexibilidad de un sistema de vapor de altísima presión del Proyecto de Modernización de la Refinería de Talara. Para ello, primero estableció la presión, temperatura, densidad y caudal del vapor a transferir, así como el tamaño del sistema de tuberías en el punto de conexiones. Se determinan los requisitos técnicos de las tuberías de vapor en función de las condiciones de funcionamiento necesarias, utilizando como guía el código ASME B31.3. A continuación, simuló el flujo de vapor utilizando el programa SolidWorks Flow Simulation mientras seleccionaba la mayor longitud de tubería para determinar las tensiones y deformaciones. También se utilizó la Teoría de los Tres Momentos para realizar un análisis teórico de flexibilidad en un segmento elegido, confirmando su comportamiento conforme al rendimiento requerido.

Para asegurar la eficacia operativa en centros hospitalarios, Lozano y Medina (2020) realizaron un estudio con el objetivo de desarrollar una técnica de diseño de tuberías para procedimientos en transporte de vapor saturado. Comenzó el método elaborando un diagnóstico en el que pudo anotar las características de un diseño deficiente desde las perspectivas de la hidráulica, la termodinámica y la flexibilidad. A continuación, se creó el nuevo diseño. Se consiguió un alto rendimiento y unos gastos de funcionamiento mínimos estableciendo las dimensiones de eficacia operativa. A continuación, se validó la técnica propuesta comparando el estado existente y las especificaciones del nuevo diseño, donde se observaron concordancias y discrepancias en varias áreas, uno de los cuales fue la mejora del rendimiento térmico y la disminución de los gastos de funcionamiento. Por último, utilizando el orden lógico de la nueva metodología para las fases de diseño hidráulico y térmico, se creó un modelo para calcular en el programa Excel las dimensiones de tuberías y grosor del aislamiento.

Porras (2018) realizó una investigación con el objetivo de examinar el sistema de tuberías de la empresa minera Chungar para la extracción de aguas subterráneas, para determinar si las tuberías tienen pérdidas de acuerdo al proyecto inicial o se incrementaron fuera de lo planificado hidráulicamente y que su operación sea antieconómica, motivado a las intervenciones que se dieron a lo largo del tiempo. La línea de tuberías se preparó por este motivo para poder instalar accesorios y medir longitudes de tuberías rectas. A continuación, se determinó la altura de pérdida total del sistema en el trabajo de gabinete. Como resultado, se halló una altura total de pérdidas por fricción de 14 metros, compuesta por pérdidas primarias de 6 metros y pérdidas secundarias de 8 metros, con un exceso de 5 metros sobre la altura inicial, esto explica el sobrecalentamiento de los motores eléctricos que accionan el sistema de bombeo. El sistema de tuberías rectas y sus accesorios se tuvieron en cuenta durante el análisis de la presión, la carga fija del bombeo determinada por las pérdidas primarias y secundarias, asimismo de la altura geodésica del sistema de bombeo y, por último, la solución analítica propuesta para el sistema de bombeo con una carga de 255 mca y un caudal de 170 l/s. Aunque es posible alcanzar hasta 25°C sin superar el PH de 7, para determinar la temperatura se utilizó la temperatura media, que fue de 10 °C. En cuanto al espesor del tubo, se ha descubierto que puede soportar deformaciones de hasta un 32% aproximadamente sin esfuerzo, trabajando en la zona elástica.

2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1. DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE FLEXIBILIDAD

La flexibilidad se entiende como la capacidad que posee un material, estructura o sistema para deformarse elásticamente bajo la acción de una carga externa y recuperar su forma original una vez que dicha carga desaparece. En el campo de la ingeniería, este concepto se vincula directamente con la resistencia a la deformación y la adaptabilidad de un componente

frente a solicitaciones mecánicas, térmicas o dinámicas (Beer et al., 2015). Asimismo, la flexibilidad se relaciona con el grado de desplazamiento que una estructura puede experimentar sin comprometer su integridad, lo cual resulta esencial en el diseño de mecanismos y sistemas sujetos a vibraciones o cargas variables (Hibbeler, 2017).

En términos prácticos, la flexibilidad puede considerarse el inverso de la rigidez, de modo que estructuras más flexibles permiten mayores desplazamientos con menores esfuerzos aplicados, favoreciendo su uso en aplicaciones donde se requiere absorción de energía o adaptabilidad frente a cambios en las condiciones de operación (Gere & Goodno, 2012).

2.2.2. DEFINICIÓN ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD

El análisis de flexibilidad en tuberías, es una técnica que permite evaluar la estabilidad estructural de la tubería bajo condiciones de carga, para evitar someter a alguno de sus componentes a esfuerzos superiores al admisible; solapar la tubería con otras tuberías o estructuras por efecto de expansiones térmicas; y para evitar cualquier tipo de fugas en las uniones. Es además responsable de calcular las cargas de diseño de los soportes y asegurar el apoyo y restricción adecuada a la tubería.

2.2.3. OBJETIVOS DE UN ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD EN TUBERÍAS

El análisis de flexibilidad en tuberías tiene como objetivo principal garantizar que un sistema de conducción de fluidos pueda soportar adecuadamente los efectos de cargas internas y externas, tales como presión, temperatura, peso propio, vibraciones y movimientos impuestos por equipos o estructuras adyacentes. Dicho análisis busca prevenir fallas por esfuerzos excesivos, deformaciones críticas o vibraciones que comprometan la seguridad y la vida útil del sistema (Peng & Peng, 2009).

Además, este tipo de análisis permite optimizar el diseño de soportes, anclajes y juntas de expansión, asegurando que las tuberías posean la holgura y ductilidad necesarias para

absorber dilataciones térmicas y desplazamientos sin generar sobrecargas en los equipos conectados (Mokhatab et al., 2019). En ese sentido, los objetivos específicos se orientan a: (a) evaluar la resistencia de la tubería frente a esfuerzos mecánicos, (b) verificar la integridad estructural bajo condiciones de operación y eventos transitorios, y (c) garantizar la conformidad con códigos y normas internacionales como ASME B31 (Shah, 2014).

2.2.4. DISEÑOS POR FLEXIBILIDAD

Existen dos métodos de diseño de tuberías flexibles: el trazado flexible y las juntas de dilatación, asimismo, utilizar la flexibilidad natural de las tuberías es la base del trazado flexible. Las tuberías se adaptan de forma natural a la dilatación térmica. Al permitir la dilatación, se reduce la tensión en boquillas y tuberías. Es necesario poder "mover" las tuberías. El diseño flexible se basa en la idea de permitir que las tuberías se muevan. Por lo tanto, es crucial crear diseños para sistemas de tuberías que permitan la expansión de las tuberías y alivien la presión en las boquillas de los equipos. La mejor estrategia, la más rentable y, por tanto, la más popular del sector, es el tendido flexible. Los trazados de tuberías flexibles se presentan en una gran variedad de modelos. Los más cruciales son los siguientes: trazado en las direcciones L, Z, U y en bucle (Gutiérrez, 2022).

Cuando la tubería recorre grandes distancias en línea recta, se suelen utilizar bucles de expansión. Por ejemplo, en los racks de tuberías, donde la tubería puede extenderse durante kilómetros. Los bucles de expansión se utilizan mejor en estas situaciones. El método de las juntas de dilatación utiliza componentes que permiten el desplazamiento y/o la rotación controlados de uno o más ejes mediante el uso de un material flexible. El material flexible suele colocarse entre bridas y es de caucho. Por lo general, su uso sólo se restringe cuando no se puede crear un trazado flexible adecuado. Debido a su elevado coste y a los requisitos de mantenimiento, su uso está restringido (Gutiérrez, 2022).

2.2.5. ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD DEL SISTEMA DE TUBERÍAS

El estudio de flexibilidad de tuberías comprende en la determinación de cómo responde una tubería a la tensión y la deformación cuando transporta un fluido a altas temperaturas, en un entorno criogénico o cuando la tubería es muy larga (Atpimsa, 2017). Según Baca (2020), la flexibilidad de una tubería es su capacidad para acomodarse a la dilatación térmica mediante la simple deformación de sus distintas secciones. El estudio de flexibilidad hace un esfuerzo por situar los sistemas de tuberías evaluados dentro de los parámetros normativos establecidos por los productores de los equipos vinculados.

Según Fonseca (2018), se denomina flexibilidad a la capacidad de que un elemento se deforme dentro de su confín elástico bajo la influencia de fuerzas externas sin peligro de rotura. El objetivo del estudio de flexibilidad (tensión) es confirmar que la disposición de las tuberías cumple las especificaciones del cliente, las normas y estándares internacionales, así como las observaciones realizadas por los proveedores de equipos y accesorios, y asegurarse de que la disposición geométrica puede tolerar contracciones o dilataciones de temperaturas. Estas cargas tienen consecuencias negativas sobre:

- Tensión excesiva en equipos, tuberías, soportes y otros accesorios.
- Fugas en uniones o empalmes embridadas.
- Deterioro de material.
- Deformaciones desmesuradas en los tubos y las boquillas del aparato.
- Efectos resonantes inducidos por las vibraciones en los sistemas.

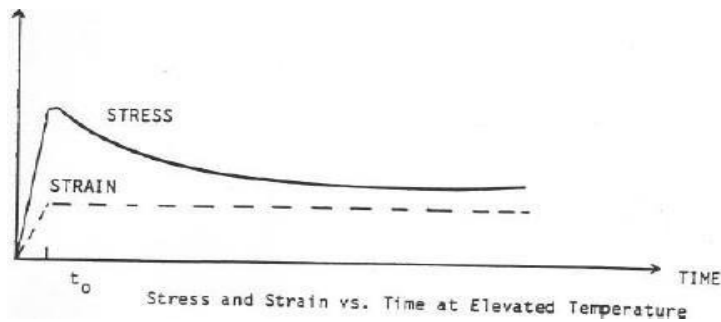
Según Salgado (2020), Para la construcción de un análisis de flexibilidad, deben conocerse los siguientes parámetros:

- Material y medidas del tubo (diámetro y grosor).
- Variables termodinámicas (densidad del fluido, presión y temperatura).

- Tensiones admisibles de acuerdo con el código de diseño.
- Cargas externas debidas a factores del emplazamiento, como el viento y los terremotos.

Figura 1

Diagrama de flexibilidad y tensión en función del tiempo a temperatura elevada



Nota. Análisis de flexibilidad en tuberías. Fuente: (Fonseca, 2018). Diseño y análisis asistido por ordenador de tuberías flexibles en la zona de bombeo de una instalación de agua de la industria petrolera.

2.2.6. CONCEPTOS BÁSICOS

2.2.6.1. Momento de inercia (I)

El momento de inercia de una sección, es una medida de la resistencia al giro, que ofrece la geometría y el tamaño de la sección. Es decir, el valor representativo de la distribución de la masa. Así tendremos en el caso de la tubería, a mayor espesor y diámetro, mayor momento de inercia. Este valor podemos obtenerlo de la siguiente ecuación:

$$I = 0.0491(D^4 - d^4), \text{ en pulgadas}^4$$

Donde:

D: Diámetro exterior de la tubería, pulgadas

d: Diámetro interior de la tubería, pulgadas

2.2.6.2. *Módulo de sección (Z)*

El módulo de sección (Z) se obtiene de la formula:

$$Z = \frac{2I}{D} = \frac{0.0982(D^4 - d^4)}{D}, \text{ en pulgadas}^3$$

Los valores de I y Z están tabulados para la mayoría de los tubos en cualquier tabla de propiedades de tubería.

2.2.6.3. *Módulo de elasticidad (E)*

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, es un parámetro mecánico que describe la relación entre el esfuerzo aplicado a un material y la deformación unitaria que este experimenta dentro de su rango elástico. En otras palabras, representa la medida de rigidez de un material, indicando qué tan resistente es a deformarse bajo la acción de una carga (Beer et al., 2015).

Este módulo constituye una de las propiedades fundamentales de los sólidos, ya que permite predecir el comportamiento elástico y comparar la capacidad de distintos materiales para soportar esfuerzos sin deformaciones permanentes. Un valor alto de módulo de elasticidad implica mayor rigidez, mientras que un valor bajo refleja mayor flexibilidad (Gere & Goodno, 2012).

En el campo de la ingeniería mecánica y estructural, el módulo de elasticidad es esencial para el análisis de esfuerzos, la selección de materiales y el diseño de componentes que deben mantener su forma y funcionalidad frente a sollicitaciones externas (Hibbeler, 2017).

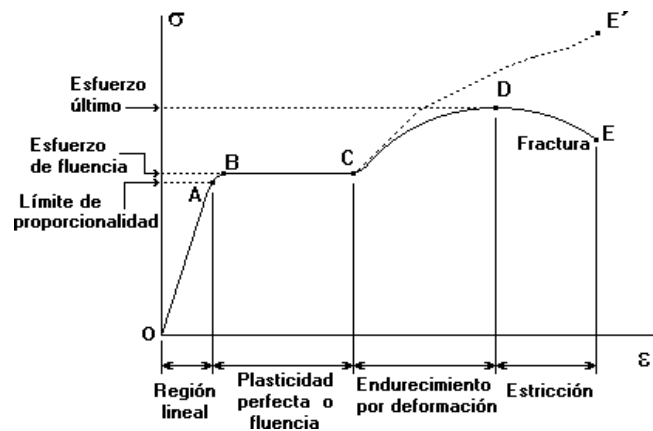
2.2.6.4. *Curva esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y no dúctiles*

Para un material dúctil la curva esfuerzo-flexión está dada en la siguiente figura. La variación de esfuerzos en el material con respecto a la deformación sigue una línea recta hasta

que el límite de proporcionalidad se alcanza. La ley de Hook define la pendiente como un módulo de elasticidad de Young E .

Figura 2

Curva esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y no dúctiles.



Nota. La curva muestra el comportamiento mecánico típico de los materiales bajo carga.

El esfuerzo permisible es el esfuerzo de cedencia dividido entre el factor de seguridad. Módulo de Young o módulo de elasticidad E es una unidad de esfuerzo dividida entre una unidad de deformación. Para la mayoría de materiales estructurales el módulo de elasticidad es el mismo para compresión que para tensión. El valor de E decrece con el incremento de temperatura. La tabla A2 del apéndice da valores de E para materiales de tubería para el rango normal de temperatura. La razón de unidad de contracción lateral entre la unidad de elongación se llama razón de Poisson. Los códigos permiten un valor de 0.3 para ser usados a todas las temperaturas para todos los metales.

2.2.6.5. Coeficiente de Expansión

El coeficiente de expansión lineal en tuberías se entiende como la magnitud que describe cuánto varía la longitud de un material cuando se somete a un cambio de temperatura.

En el caso de las tuberías, este parámetro resulta esencial porque permite predecir deformaciones que podrían comprometer la integridad del sistema hidráulico o de conducción de fluidos. En términos prácticos, el coeficiente de expansión determina la dilatación o contracción de la tubería por cada grado de variación térmica en relación con su longitud original (Callister & Rethwisch, 2018).

Este coeficiente depende directamente de las propiedades del material de la tubería, siendo más significativo en materiales metálicos y termoplásticos. Su correcta consideración en el diseño evita esfuerzos excesivos, fugas o fallas estructurales en los sistemas de transporte de fluidos (Munson, Young, Okiishi, & Huebsch, 2013). Por tanto, el cálculo de la expansión térmica en tuberías constituye un factor clave en ingeniería mecánica y de procesos, ya que garantiza la seguridad y eficiencia en la operación de instalaciones industriales (White, 2016).

2.2.6.6. Relación de Poisson

La relación de Poisson es un parámetro mecánico que describe el comportamiento de un material cuando se somete a esfuerzos. Se define como la razón entre la deformación transversal y la deformación longitudinal que experimenta un sólido al aplicársele una carga uniaxial. En otras palabras, cuando un cuerpo se estira en una dirección, tiende a contraerse en las direcciones perpendiculares, y esta proporción se cuantifica mediante la relación de Poisson (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2015).

Este coeficiente es adimensional y suele tomar valores comprendidos entre 0 y 0,5 para la mayoría de los materiales estructurales. Valores cercanos a 0,5 indican que el material es prácticamente incompresible, como ocurre con el caucho, mientras que valores bajos corresponden a materiales más frágiles y menos dúctiles (Hibbeler, 2017).

El conocimiento de la relación de Poisson es fundamental en ingeniería, ya que permite predecir el comportamiento de los materiales bajo carga y se emplea en cálculos de resistencia,

estabilidad y análisis de esfuerzos en estructuras y componentes mecánicos (Gere & Goodno, 2012).

2.2.6.7. Factor de Flexibilidad

El factor de flexibilidad en tuberías es un coeficiente que permite cuantificar la capacidad de un tramo de tubería o de un accesorio para deformarse frente a cargas externas o variaciones térmicas sin inducir esfuerzos excesivos. Este parámetro es especialmente relevante en los sistemas de conducción, ya que considera la influencia de curvaturas, codos y ramificaciones sobre el comportamiento estructural de la tubería, asegurando que el diseño sea seguro frente a dilataciones y contracciones térmicas (Peng, 2009).

En términos prácticos, el factor de flexibilidad corrige la rigidez ideal asumida en análisis simples, introduciendo un valor que refleja la respuesta real del sistema de tuberías bajo cargas y desplazamientos. De este modo, su correcta aplicación evita concentraciones de esfuerzos, posibles fugas o fallas prematuras en uniones y soportes (Miller, 2018).

Dentro del ámbito normativo, códigos como el ASME B31.1 y el ASME B31.3 incluyen procedimientos específicos para calcular este factor en componentes críticos, lo que refuerza su importancia en el diseño y evaluación de sistemas de tuberías en plantas industriales, centrales de energía y aplicaciones mecánicas (ASME, 2020).

Esta longitud modificada o virtual L_V se obtiene de la formula:

$$L_V = 1.5708 R K, \text{ (En metros)}$$

Donde:

K: Factor de flexibilidad expresado por la relación de flexibilidad del codo comparado con una longitud equivalente de tubería recta.

De acuerdo al código ASME B31.3 el factor de flexibilidad K, para codos está dado por:

$$K = \frac{1.65}{h}$$

En donde:

t = espesor de la pared del tubo, pulg.

R = radio del codo, pulg.

r = radio medio del tubo, pulg.

También se puede expresar de la siguiente manera:

$$h = \frac{t \cdot r}{r^2}$$

2.2.6.8. Factor de Intensificación de Esfuerzo (SIF)

El incremento del esfuerzo por el aplastamiento de la sección transversal del codo se permite agregando un factor de intensificación de esfuerzos i, en el numerador de la formula general:

$$SIF = \frac{M}{Z} i$$

Donde:

$$i = \frac{0.9}{h^{2/3}}$$

El factor i es aplicable solo en esfuerzos inducidos por fuerzas que actúan en los codos y que producen esfuerzos longitudinales a tensión y compresión. Para esfuerzos por tensión, el factor se torna unitario.

2.2.6.9. *Factor de Reducción de Rango de Esfuerzo (f)*

Tabla 1

Factor de reducción del rango de esfuerzo según número de ciclos

No. de Ciclos	f
7,000 y menos	1.0
7,000 a 14,000	0.9
14,000 a 22,000	0.8
22,000 a 45,000	0.7
45,000 a 100,000	0.6
más de 100,000	0.5

Nota. Según ASME B31.3 para efectos de fatiga. cíclicas.

2.2.6.10. *Flexibilidad y Rigidez*

En el análisis de sistemas de conducción, la flexibilidad de una tubería se entiende como la capacidad del conducto para deformarse bajo la acción de cargas externas, presiones internas o variaciones térmicas sin generar esfuerzos que excedan los límites admisibles del material. Una tubería flexible puede absorber mejor las dilataciones y contracciones provocadas por los cambios de temperatura, reduciendo el riesgo de fallas en uniones, soportes y equipos conectados (Peng, 2009).

En contraposición, la rigidez de una tubería se refiere a la resistencia del conducto a deformarse cuando se encuentra sometido a esfuerzos mecánicos o térmicos. Una mayor

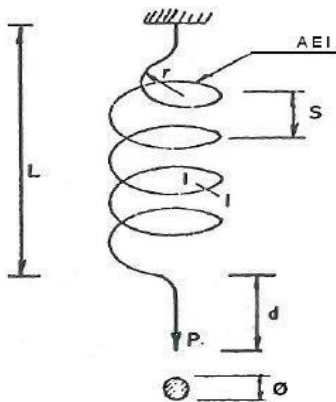
rigidez implica que la tubería experimentará menores deformaciones, pero puede transmitir mayores esfuerzos a los puntos de anclaje y conexiones, lo que puede comprometer la integridad del sistema si no se consideran dispositivos de expansión o soportes adecuados (Miller, 2018).

El equilibrio entre flexibilidad y rigidez constituye un aspecto fundamental en el diseño de tuberías, dado que un sistema excesivamente rígido puede fallar por concentraciones de esfuerzos, mientras que un sistema demasiado flexible podría comprometer la estabilidad estructural. Por esta razón, los códigos de diseño, como el ASME B31.3, establecen criterios de cálculo que permiten garantizar tanto la seguridad como la funcionalidad del sistema (ASME, 2020).

Consideremos el resorte mostrado en la siguiente figura:

Figura 3

Representación de un resorte para analizar flexibilidad y rigidez



Nota. Modelo de resorte usado para explicar flexibilidad y rigidez en tuberías.

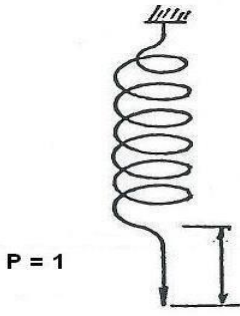
Donde:

- L: Radio del Resorte
- r: Radio de las Hélices
- A: Área de la Barra
- I: Momento de inercia de la Barra

- S: Paso de las Hélices
- E: Momento de Inercia del material
- P: Fuerza Aplicada
- D: Desplazamiento Producido
- θ : Diámetro de la Barra.

Tabla 2

Comparación entre flexibilidad y rigidez

FLEXIBILIDAD (F)	RIGIDEZ (K)
Es el desplazamiento que produce una fuerza unitaria, es decir	Es la fuerza que produce un desplazamiento unitario, es decir:
	
F: Flexibilidad, por lo tanto, $F = d/P$ (longitud/fuerza)	P: Kd, por lo tanto, $K = P/d$ (fuerza/longitud)

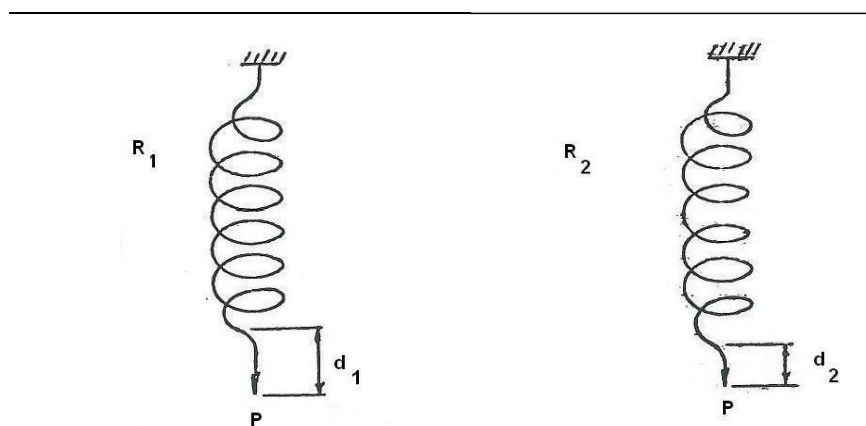
Nota. Relación inversa entre ambos conceptos aplicados a sistemas de tuberías.

$$FK = KF = \frac{d}{P} x \frac{P}{d} = 1 \quad F^{-1} = kf = K^{-1}F^{-1} = kf = K^{-1}$$

Por lo tanto, estos dos conceptos son recíprocos. Ahora consideramos los resortes mostrados a continuación.

Tabla 3

Comparación del desplazamiento entre dos resortes bajo la misma carga



Supongamos que ambos resortes están sujetos a la misma carga (P), así pues, el resorte (R_1), es más flexible que el (R_2) si resulta que: $d_1 > d_2$

Nota. A mayor desplazamiento, mayor flexibilidad del resorte.

2.2.7. PRESIÓN MANOMÉTRICA

Diferencia entre la presión absoluta y la presión manométrica, se mide en relación con la presión atmosférica. En términos de presión atmosférica (o de fondo) del aire, se establece en cero. Esto indica que esta presión depende de la altitud sobre el nivel del mar y por supuesto de las condiciones meteorológicas. Debido al hecho de que todas las actividades de una instalación y fabricación están sujetas a la misma presión atmosférica, la monitorización de la presión manométrica es adecuada para la mayoría de las aplicaciones industriales.

La presión que se aplica a un fluido contenido en un recipiente se conoce como presión manométrica. Un líquido contenido en un recipiente experimenta una presión manométrica además de la presión atmosférica; la presión manométrica es la presión que sostiene el fluido dentro del recipiente. Las presiones manométrica y atmosférica se combinan para proporcionar la presión absoluta que puede soportar el fluido dentro del recipiente.

2.2.8. TEMPERATURA DE FLUIDO

El calor o la energía térmica de las partículas de una sustancia se mide por la temperatura. Sirve para medir la energía cinética típica de las moléculas que componen un objeto. La energía interna es un aumento de la velocidad a la que se mueven las moléculas de un cuerpo cuando aumenta su temperatura (Quiñonez, 2016). La temperatura y el nivel de energía interna de un fluido están relacionados. Las características de un fluido suelen depender de su temperatura. La temperatura es uno de los varios factores que pueden influir en la viscosidad de un fluido. Según Talens et al. (2016), a medida que aumenta la temperatura, la energía cinética supera a las fuerzas viscosas, lo que provoca un descenso de la viscosidad.

2.2.9. GRAVEDAD ESPECÍFICA

La diferencia entre la densidad de un objeto y la de una sustancia estándar es su gravedad específica. En función de su valor, el peso específico puede indicar si un objeto flotará o se hundirá en nuestra sustancia de referencia. El agua sirve como nuestro material de referencia estándar, ya que tiene una densidad constante de 1 gramo por mililitro o por centímetro cúbico (Rodrigo, 2020). En general se considera el agua a la temperatura de 4 grados centígrados, que es el punto en que tiene mayor densidad, como la referencia para la densidad relativa de las sustancias líquidas. La densidad del objeto dividida por la densidad del agua es la fórmula del peso específico, con el agua como sustancia de referencia.

2.2.10. DIÁMETRO DE TUBERÍA

El comportamiento de una tubería depende de manera directa del caudal que fluye por la misma, si se considera que por una tubería no siempre fluye un caudal constante se llegaría a concluir que se comportará de manera diferente con cada caudal. Es por ello que es muy importante realizar la elección adecuada del diámetro de la tubería, esto ayudará a que la tubería no sufra alguna falla (Blaz, 2021).

2.2.11. ESPESOR DE TUBERÍA

Una de las tareas iniciales a la hora de construir un sistema completo de tuberías es calcular el grosor de las mismas. Más aún de los diversos factores de corrección derivados del propio proceso de fabricación de la tubería, es vital tener en cuenta la presión interna a la que funcionará el sistema, el diámetro, las características del material o la tensión máxima permitida. Para ello, el código ASME ofrece varios métodos de cálculo que tienen en cuenta todos estos elementos.

2.2.12. EFECTOS DE VELOCIDAD DE ONDA (PRODUCIDO POR UN GOLPE DE ARIETE)

El golpe de ariete, un fenómeno hidráulico, se produce cuando la velocidad de un fluido se altera debido a la manipulación o mal funcionamiento de los sistemas hidráulicos, variaciones en la demanda de agua, error humano, entre otras cosas. Llegan a la conclusión de que, dependiendo de la ubicación y el método de generación del transitorio, las ondas de presión propagadas a través del SDA (Sistema de Distribución de Agua) y, en algunas situaciones, la configuración del sistema, pueden ayudar a aumentar las ondas de presión. Debido a los efectos de transmisión, reflexión y superposición provocados por las ondas de presión, que producen presiones máximas y mínimas significativas y corren el riesgo de superar

la presión incidental máxima permitida, los sistemas de distribución de agua son incapaces de atenuar las ondas (Twyman, 2018),

En pocas palabras, el golpe de ariete es una oscilación del fluido en una tubería presurizada que provoca sobrepresiones y depresiones que pueden dañar la propia tubería. El fenómeno exhibe una frecuencia en la repetición de las ondas, o la presión máxima y mínima dentro de la conducción, que es la relación entre la longitud de la tubería y la celeridad (velocidad a la que se propaga una onda dentro de una conducción y que depende de sus dimensiones y material) (Oliveras, 2018).

2.2.13. CARGAS DE SISMO Y VIENTO

Hoy en día, realizar un análisis estructural de un sistema de tuberías aumenta la seguridad operativa. En esta situación, el viento y los terremotos producen cargas dinámicas que pueden provocar el colapso de un sistema de tuberías. El viento, la actividad sísmica y cualquier otra carga no permanente que pueda afectar al sistema se consideran cargas ocasionales en el análisis de esfuerzos de un sistema de tuberías sometido a condiciones de presión/temperatura. En este análisis sólo debe tenerse en cuenta la actividad sísmica que provoque el estado de tensión más adverso, en lugar de los fenómenos eólicos y sísmicos simultáneos. En teoría, es prioritario identificar cuál de las situaciones entre viento y sismo es dominante y, en consecuencia, más desfavorable antes de iniciar el análisis tensional de un sistema con respecto a las cargas ocasionales (Pava et al., 2014).

2.2.14. FLEXIBILIDAD DEL SISTEMA DE BOMBEO

Para evitar una degradación acelerada y permitir el uso de equipos de bombardeo de reserva en caso de fallo, la flexibilidad da a un sistema de bombardeo la seguridad de que sus componentes pueden cambiarse mientras está en funcionamiento. Del mismo modo, la flexibilidad significa que cuantas más bombas haya, más sencillo será cambiar el

funcionamiento del sistema de bombeo para satisfacer la demanda de la red. Por tanto, la flexibilidad puede considerarse como un criterio alternativo, ya que dependerá del coste unitario del modelo de bomba a valorar y no necesariamente se refleja en estos costes de inversión (Sánchez, 2020).

2.2.15. CARGAS SOBRE UN SISTEMA DE TUBERÍAS

Las cargas que actúan sobre un sistema de tubería se dividen en cargas estáticas y dinámicas, las cuales a su vez pueden ser clasificadas como primarias y secundarias y pueden clasificarse como sigue:

Cargas Térmicas. Estas cargas son originadas al limitar la expansión/contracción térmica, a través de interconexiones a equipos y como resultados de las restricciones a desplazamientos inducidos por el sistema de apoyo y soportes.

Cargas Sostenidas. Son aquellas debido al peso propio, cargas vivas (fluido interno, nieve, aislamiento, etc.), presión, vibraciones y otros.

Cargas Ocasionales. Son originadas por efecto de corta duración debido a condiciones de arranque, paro, instalación, mantenimiento, etc.

Cargas Accidentales. Originadas usualmente por efectos naturales tales como: sismos, tornados, etc., las cuales generalmente son de corta duración, pero son muy severas y se deben considerar sus efectos en el diseño.

Las cargas estáticas pueden resumirse en:

- Efecto peso (cargas vivas y cargas muertas)
- Efectos de expansión y contracción térmica.
- Efectos de soporte, anclaje y movimientos terminales.
- Cargas de presión interna y externa.

Las cargas dinámicas pueden resumirse en:

- Fuerzas de impacto.
- Viento.
- Cargas sísmicas (terremotos)
- Vibración.
- Cargas de descarga.

Estas cargas son las responsables de producir fuerzas y momentos en los distintos puntos de un sistema de tuberías que a su vez producen esfuerzos sobre el sistema.

2.2.16. ESFUERZOS EN TUBERÍAS

Los esfuerzos en tuberías son las tensiones internas que se generan en las paredes del conducto como resultado de cargas externas, presión interna del fluido, peso propio, dilataciones térmicas o acciones dinámicas. Dichos esfuerzos se manifiestan en diferentes formas, tales como esfuerzos longitudinales, circunferenciales (u “hoop stress”) y radiales, los cuales deben ser evaluados para garantizar la integridad estructural del sistema (Miller, 2018).

En ingeniería de tuberías, el análisis de esfuerzos permite determinar si las tensiones inducidas se mantienen dentro de límites admisibles definidos por el material y los códigos de diseño. Un diseño seguro requiere que los esfuerzos calculados no excedan los valores permisibles, con el fin de evitar fallas como deformaciones permanentes, fugas o rupturas (Peng, 2009).

Los códigos normativos, como el ASME B31.3, establecen metodologías específicas para el cálculo de los esfuerzos combinados en tuberías, considerando factores de presión, temperatura, cargas externas y condiciones de operación, lo que asegura la fiabilidad y seguridad de los sistemas de transporte de fluidos (ASME, 2020).

2.2.16.1. Esfuerzos sostenidos o primarios.

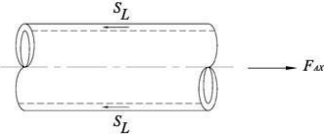
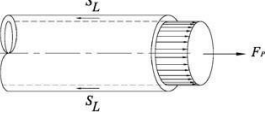
Los esfuerzos sostenidos —también denominados esfuerzos primarios— corresponden a las tensiones que actúan de manera continua en las tuberías debido a cargas permanentes, como la presión interna del fluido, el peso propio de la tubería y el de los accesorios asociados. Estos esfuerzos son inevitables y no pueden aliviarse mediante redistribución estructural, por lo que su control es esencial para garantizar la seguridad y durabilidad del sistema (Peng, 2009).

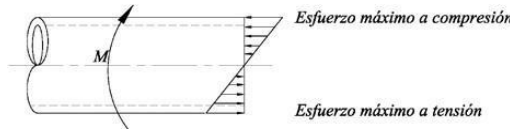
En términos normativos, los códigos de diseño como el ASME B31.3 clasifican los esfuerzos sostenidos como aquellos que deben mantenerse dentro de límites estrictos, ya que, de superarse, pueden ocasionar fallas plásticas o rupturas catastróficas en la instalación (ASME, 2020). A diferencia de los esfuerzos secundarios —que suelen originarse por efectos de expansión térmica y pueden aliviarse parcialmente mediante deformaciones—, los esfuerzos sostenidos son de carácter constante y crítico en el diseño de tuberías (Miller, 2018).

Esfuerzos Longitudinales:

Figura 4

Componentes del esfuerzo longitudinal en tuberías

Esfuerzo longitudinal debido a una fuerza interna axial	$Sl = \frac{F_x}{A_m}$	
Esfuerzo longitudinal debido a la presión	$Sl = A \frac{PD_o}{4t}$	

Esfuerzo longitudinal debido a la flexión	$Sl = B \frac{iM_o}{Z}$	
---	-------------------------	--

Nota. Se ilustran las tres principales causas del esfuerzo longitudinal: fuerza axial, presión interna y flexión.

Los esfuerzos sostenidos, que deberán compararse con el esfuerzo máximo admisible del material, se calculan de la siguiente forma:

$$Sl = \frac{F_x}{A_m} + A \frac{P \cdot D_o}{4t} + B \frac{i \cdot M_o}{Z}$$

Donde:

- Sl: Es el esfuerzo sostenido a calcular
- Fx: Fuerza axial dentro de la tubería
- Am: Área de la sección transversal de la tubería
- A y B: Son constantes adimensionales que dependen del código utilizado. Según ASME B31.3 (aplicable a los sistemas de los que se hablará a partir de este punto) el valor de las dos constantes es 1.
- P: Presión interna de la tubería
- Do: Diámetro externo de la tubería
- t: Es el espesor de la tubería (espesor al cual se le resta el espesor de corrosión, tolerancia de fabricación y el factor de soldadura si aplica).
- i: Es el factor de intensificación de esfuerzos correspondiente según ASME B.31.3
- Mo: Es el momento flector debido a las cargas sostenidas.
- Z: Es el módulo de sección de la tubería.

Esfuerzos de Hoop. El esfuerzo de hoop o esfuerzo circunferencial es la tensión interna que se genera en la pared de una tubería debido a la presión interna del fluido. Este esfuerzo actúa de manera tangencial alrededor de la circunferencia de la tubería, tendiendo a separar sus paredes y constituyendo uno de los parámetros más críticos en el diseño y la evaluación estructural de conductos a presión (White, 2016).

En términos mecánicos, el esfuerzo de hoop resulta ser generalmente el mayor de los esfuerzos que actúan en un cilindro delgado presurizado, superando a los esfuerzos longitudinales y radiales. Por esta razón, es utilizado como criterio principal en la determinación del espesor de pared necesario para resistir la presión de operación sin riesgo de deformación plástica o falla por explosión (Munson, Young, Okiishi, & Huebsch, 2013).

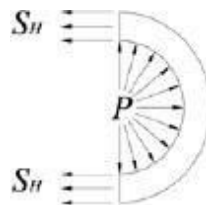
El análisis de este esfuerzo está normado por códigos de diseño, como el ASME B31.3, los cuales proporcionan expresiones específicas para su cálculo en función de la presión interna, el diámetro de la tubería y el espesor de pared, asegurando así un margen de seguridad adecuado en sistemas industriales de transporte de fluidos (ASME, 2020).

La magnitud de los esfuerzos de Hoop varía a través de la pared de la tubería y puede ser calculado por la ecuación de Lamé:

Figura 5

Esfuerzo de Hoop en una tubería sometida a presión interna

$$S_H = \frac{P \left(r_i^2 + \frac{r_o^2 r_i^2}{r^2} \right)}{r_o^2 - r_i^2}$$



Nota. Representa la distribución del esfuerzo circunferencial generado por la presión en las paredes del tubo.

Donde:

S_H : Esfuerzo de Hoop

r_i : Radio interno de la tubería

r_o : Radio externo de la tubería

r : Posición radial donde el esfuerzo está siendo considerado

De manera conservadora los esfuerzos de Hoop pueden ser calculados por la siguiente expresión:

$$S_H = \frac{P \cdot d_o}{2t}$$

Esfuerzos Radiales. El esfuerzo radial en tuberías corresponde a la tensión que actúa perpendicularmente a la pared del conducto, es decir, en dirección hacia el radio del cilindro. Este esfuerzo es producido principalmente por la presión interna del fluido que intenta separar las paredes de la tubería y por la presión externa en caso de que el sistema esté sometido a condiciones de vacío o a esfuerzos externos. A diferencia de los esfuerzos circunferenciales y longitudinales, el esfuerzo radial suele tener menor magnitud, pero es determinante en el análisis de estabilidad de las paredes y en la resistencia a fenómenos como el colapso por presión externa (Ugural & Fenster, 2012).

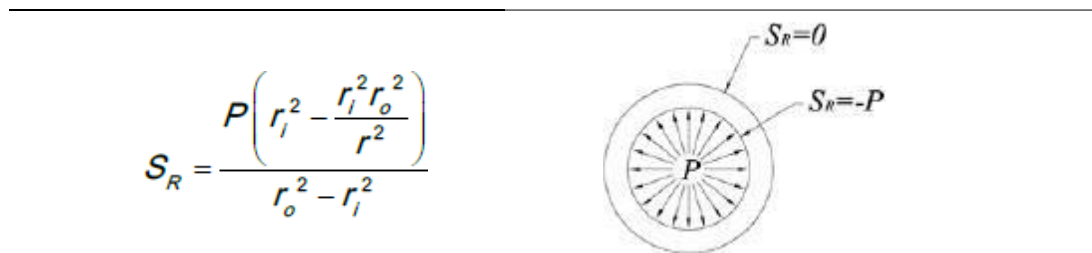
En tuberías de pared delgada, el esfuerzo radial se considera relativamente pequeño y puede despreciarse en muchos cálculos de diseño simplificado. Sin embargo, en tuberías de pared gruesa o en condiciones de alta presión, este esfuerzo debe ser tomado en cuenta, ya que influye en la distribución de tensiones y en la seguridad estructural del sistema (White, 2016).

Los códigos de diseño, como el ASME B31.3, contemplan el análisis del esfuerzo radial en combinación con los esfuerzos circunferenciales y longitudinales, lo que permite evaluar de manera integral la resistencia de tuberías en aplicaciones industriales de conducción de fluidos (ASME, 2020).

Asumiendo que no hay presión externa el esfuerzo radial puede ser calculado como sigue:

Figura 6

Distribución del esfuerzo radial en una tubería presurizada



Nota. El esfuerzo radial varía desde la presión interna en la cara interior hasta cero en la cara exterior.

Donde:

S_H : Esfuerzo radial debido a la presión

R_i : Distancia radial desde donde será calculado el esfuerzo

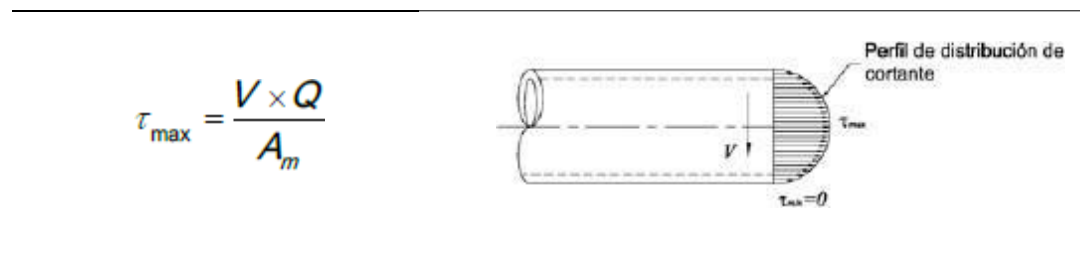
Es importante resaltar que el esfuerzo radial es cero en el exterior de la tubería, donde los esfuerzos flexionantes son máximos. Por esta razón, este tipo de esfuerzo ha sido tradicionalmente ignorado en los análisis de esfuerzos.

Esfuerzos Cortantes. El esfuerzo cortante en tuberías se genera cuando un fluido circula en su interior, produciendo una fricción entre las capas de fluido y la superficie de la pared de la tubería. Este fenómeno depende directamente de la viscosidad del fluido y de la velocidad de flujo, influyendo en la distribución de tensiones y en el diseño hidráulico y estructural del conducto (Munson et al., 2013). En términos de mecánica de fluidos, este esfuerzo se expresa como la fuerza tangencial por unidad de área ejercida en la pared de la

tubería, siendo un parámetro fundamental para analizar pérdidas de energía y el comportamiento de flujo turbulento o laminar (White, 2016).

Figura 7

Fórmula de esfuerzo cortante máximo



Nota. Representa el esfuerzo cortante máximo en una sección.

Donde:

τ_{max} : Esfuerzo cortante máximo

V: Fuerza cortante

Q: factor de forma por cortante (1.333 para una sección circular)

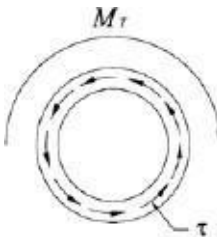
Los esfuerzos cortantes se distribuyen en tal forma que el máximo se presenta en el eje neutro de la tubería y es cero en la máxima distancia desde el eje neutro.

Debido a que esto es opuesto al caso de los esfuerzos de flexión y que además estos esfuerzos son usualmente pequeños, entonces normalmente son despreciados en los análisis de esfuerzos de tuberías.

Los esfuerzos cortantes también pueden ser causados por cargas torsionales.

Figura 8

Cálculo del esfuerzo cortante máximo en torsión

$$\tau_{\max} = \frac{M_T}{2Z}$$


Nota. Fórmula para calcular el esfuerzo cortante máximo en torsión

Donde:

- $\tau_{\max}$: Esfuerzo cortante máximo
- MT: Momento torsional actuando en la sección transversal de la tubería
- Z: Modulo de sección de la tubería ($\pi.r.T$)

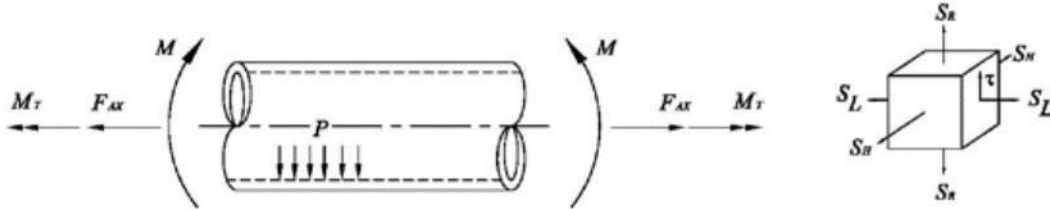
Sumando las componentes individuales de los esfuerzos cortantes, el máximo esfuerzos en la sección transversal de la tubería es:

$$\tau_{\max} = \frac{V \cdot Q}{A_m} + \frac{M_T}{2 \cdot Z}$$

La combinación de los esfuerzos en la pared de la tubería resulta en lo que se conoce como Estado Tridimensional de Esfuerzos el cual se puede representar de la siguiente manera:

Figura 9

Diagrama de fuerzas y momentos en una viga



Nota. Representación esquemática de las fuerzas y momentos actuantes en una viga

Se suman todos los esfuerzos quedando de la siguiente manera:

$$S_1 + S_2 + S_3 = S_L + S_H + S_R$$

2.2.16.2. Esfuerzos por expansión o secundario

El esfuerzo por expansión en tuberías se refiere a las tensiones inducidas en el material debido a cambios de temperatura que generan dilatación o contracción. Cuando una tubería está restringida en sus extremos o apoyos, la variación dimensional no puede producirse libremente, lo que ocasiona esfuerzos adicionales en la pared del conducto. Dichas tensiones, también conocidas como esfuerzos secundarios, son relevantes porque no dependen de la presión interna, sino de las condiciones térmicas y de restricción mecánica, pudiendo comprometer la integridad del sistema si no se controla mediante elementos de flexibilidad como codos, juntas o soportes deslizantes (Castro & Álvarez, 2019; ASME B31.3, 2022).

Según ASME B31.3 el esfuerzo de expansión (SE) se obtiene de la siguiente forma:

$$S_E = \sqrt{\left(\frac{S^2}{b} + 4\frac{S^2}{t}\right)}$$

Siendo:

$$S_t = \frac{M_t}{2Z}$$

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_i)^2 + (i_o \cdot M_o)^2}}{Z}$$

Donde:

S_b: Es la resultante de todos los esfuerzos por flexión

S_t: Es el esfuerzo de torsión

i: Es el factor de intensificación de tensiones correspondiente según ASME B.31.3

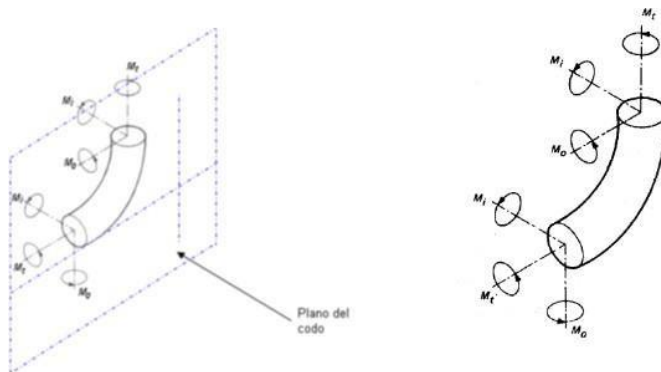
M: Es el momento flector

Z: Es el módulo de sección de la tubería que en caso de la reducción en una T reductora se calcula a partir del radio medio del área transversal del ramal o reducción (“r”) y del espesor de pared efectivo en la reducción (“T”) de la siguiente forma: $Z = \pi \cdot r \cdot T$

Los subíndices se refieren a los factores de intensificación de tensiones y momentos flectores dentro (subíndice *i*), fuera (subíndice *o*) y en el plano (subíndice *t*) según se muestra en las figuras 9 y 10.

Figura 10

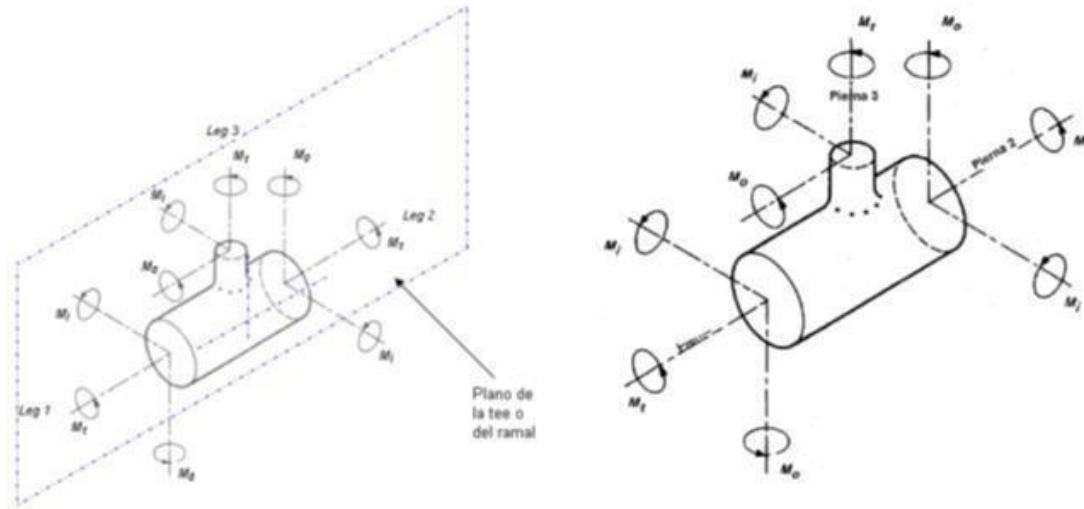
Representación del plano de un codo



Nota. Diagrama que muestra la configuración geométrica de un codo.

Figura 11

Representación del plano de un codo con ramal



Nota. Diagrama que muestra la configuración geométrica de un codo con ramal.

2.2.16.3. Esfuerzos ocasionales o terciarios

Estos son ocasionados por causas eventuales como su nombre indica. Estas causas pueden ser el viento, sismo, descarga de válvulas de alivio, golpes de ariete y vibraciones. Según ASME B31.3 deben ser comprobados de forma que cumplan la siguiente relación:

$$Sl_{sus} + Sl_{occ} \leq 1.33 \cdot Sh$$

Donde:

Sl_{sus} : Es el esfuerzo longitudinal debido a las cargas primarias o sostenidas.

Sl_{occ} : Es el esfuerzo longitudinal debido a las cargas ocasionales.

Sh : Es el esfuerzo básico permisible a la temperatura de evaluación del material.

2.2.16.4. Esfuerzos admisibles

Los esfuerzos admisibles se definen como el nivel máximo de esfuerzo que puede resistir un material o componente sin riesgo de falla, garantizando un funcionamiento seguro

dentro de las condiciones de diseño. Dicho valor se obtiene al dividir la resistencia última o límite del material entre un factor de seguridad, lo cual introduce un margen que protege contra incertidumbres en cargas, defectos de fabricación o condiciones no previstas (Shigley et al., 2015).

Este criterio constituye un método de diseño ampliamente empleado en ingeniería estructural y mecánica, ya que asegura que los elementos trabajen dentro de un rango de esfuerzos que evita deformaciones permanentes, fracturas o fallas por fatiga (Dowie & Kelly, 2017). Además, los esfuerzos admisibles sirven como parámetro de comparación en el análisis de tensiones, siendo la base de la teoría de diseño por esfuerzos admisibles (ASD, por sus siglas en inglés), reconocida en distintos códigos y normativas internacionales (Budynas & Nisbett, 2016).

2.2.16.5. Rango de esfuerzos Admisible

El rango de esfuerzos admisibles se entiende como la banda de valores de esfuerzo dentro de la cual un material o componente puede trabajar de manera segura sin riesgo de falla estructural ni deformaciones plásticas permanentes. Este rango se establece a partir de la resistencia del material y se ajusta mediante la aplicación de un factor de seguridad, con el propósito de cubrir las incertidumbres asociadas a variaciones en las cargas, defectos de fabricación o condiciones de operación imprevistas (Budynas & Nisbett, 2016).

En la práctica, el rango de esfuerzos admisibles delimita los límites superiores e inferiores que aseguran que los elementos estructurales o mecánicos trabajen dentro de condiciones elásticas y estables, garantizando así la durabilidad y confiabilidad del diseño (Gere & Goodno, 2012). Este concepto resulta fundamental en disciplinas como la ingeniería mecánica, civil y de materiales, dado que proporciona un criterio cuantitativo para comparar los esfuerzos reales generados en servicio frente a los que un material puede resistir sin comprometer la seguridad (Hibbeler, 2017).

El rango del esfuerzo admisible (S_a) con el que hay que comparar el esfuerzo secundario para nuestro análisis de esfuerzos es:

$$S_a = f(1.25S_c + 0.25S_h)$$

Donde:

S_a : Es el esfuerzo máximo admisible para los esfuerzos secundarios.

F : Es un factor de fatiga proporcionado por la norma ASME B31.3 (Su valor máximo con bajo número de ciclos es de 1.2 para materiales ferreos con $S_u \leq 517$ MPa y con temperatura del metal $\leq 371^\circ\text{C}$).

S_c : Es el esfuerzo básico permisible a la temperatura de evaluación del material.

S_h : Es el esfuerzo básico admisible del material a temperatura de estudio.

Si el esfuerzo básico admisible a temperatura de estudio (S_h) es mayor que el esfuerzo sostenido (S_l), se puede añadir la diferencia a la relación anterior de la siguiente forma:

$$S_a = f(1.25S_c + 0.25S_h + S_h - S_l) = f[1.25(S_c + S_h) - S_l]$$

Valores de f , en **tabla 1**.

2.2.17. SOPORTES DE TUBERÍA

Los soportes de cualquier sistema de fontanería deben elegirse de forma correcta y económica, lo que suele implicar retos de diversa índole, algunos más graves que otros. La selección adecuada del soporte debe ser el objetivo de todas las fases de diseño y construcción. Muchos problemas de soporte de tuberías pueden minimizarse o evitarse si se presta la atención adecuada a los medios de soporte durante la fase de diseño en el ruteo de la tubería. La familiaridad del diseñador de tuberías con los problemas de soporte, las prácticas aceptadas y los componentes de soporte de tuberías disponibles comercialmente y sus aplicaciones, son de mucha ayuda en el diseño.

Figura 12

Soporte sobre clips soldados a equipo



Nota. Soporte estructural. Fuente: Gómez, 2016. Análisis de flexibilidad en sistemas de tuberías.

Un buen diseño y trazado de las tuberías son la base de un buen diseño de los soportes. Por ejemplo, en igualdad de condiciones, las tuberías deben enrutarse para usar la estructura circundante para proporcionar puntos lógicos y convenientes de soporte, anclaje, guía o restricción, con espacio disponible en dichos puntos para el uso del componente adecuado. Las líneas paralelas, tanto verticales como horizontales, deben estar lo suficientemente separadas para dejar espacio para conexiones de tubería independientes para cada línea. Las especificaciones de soporte de tubería para proyectos individuales deben estar escritas de tal manera que aseguren el soporte adecuado en todas las condiciones operativas y ambientales y que proporcionen protección de pendiente, expansión, anclaje y aislamiento (Islas, 2009).

Figura 13

Guía horizontal



Nota. Soportes para control de desplazamiento. Fuente: Gómez, 2016. Análisis de flexibilidad del sistema de oleoductos.

Consideraciones generales de diseño. Los soportes y colgadores de tubería deben diseñarse para cumplir con todas las condiciones operativas tanto estáticas como dinámicas a las que pueden estar sometidos las tuberías y el equipo. Los movimientos provocados por la dilatación y contracción térmicas de las tuberías y los equipos conexos deben ser tenidos en cuenta y controlados por el sistema de soporte, en función de los requisitos de la configuración de las tuberías.

El diseño adecuado requiere un conocimiento profundo del comportamiento cíclico completo de cada sección de tubería que se apoyará, así como un conocimiento de la proximidad de la tubería con respecto a la estructura del edificio. Se puede lograr una reducción sustancial en la complejidad del diseño del soporte cuando los requisitos de soporte de las tuberías se coordinan adecuadamente con las fases de diseño de la planta y las tuberías. El diseño inicial de la planta debe reconocer que el diseñador de soporte requiere acceso a la

tubería, espacio suficiente para instalar el equipo de soporte y una estructura adecuada desde la cual apoyar la tubería. Idealmente, el diseñador de soporte debería tener la oportunidad de ofrecer comentarios sobre el diseño de la tubería desde el diseño inicial.

Figura 14

Zapata soldada



Nota. Soportes para apoyo. Fuente: Gómez, 2016. Análisis de flexibilidad en sistemas de tuberías

Figura 15*Zapata con abrazaderas*

Nota. Soportes para apoyo. Fuente: Gómez, 2016. Análisis de flexibilidad en sistemas de tubería.

2.2.18. UNIONES FLEXIBLES

Conjunto que permite que el eje sea ligeramente excéntrico y permite una gran desviación angular durante y después de la instalación. En las juntas móviles se utilizan piezas completas, secciones de piezas o subconjuntos para facilitar algunos movimientos y restringir otros. Existen tres categorías principales (Structuralia, 2020):

- Articulaciones móviles giratorias: Un ejemplo típico es la polea, un dispositivo mecánico de elevación o tracción formado por una cuerda enrollada alrededor de una rueda o polea colocada sobre un eje.
- Cuando hay que unir dos componentes, uno de ellos se fija mientras que el otro se desliza a través de él con la ayuda de un lubricante o de otro componente. Esto se conoce como junta móvil deslizante.

- Articulaciones que pueden moverse y estirarse. Dependiendo de la necesidad concreta, existen varios tipos de uniones estructurales mecánicas, éstas pueden desmontarse sin utilizar técnicas destructivas.

Figura 16

Uniones flexibles



Nota. Ejemplo de unión flexible. Fuente: Grupo hidráulica.com

2.2.19. UNIONES RÍGIDAS

Son las uniones sin posibilidad de movimiento, rotación o desplazamiento. Se dividen en dos grandes grupos: las fijas y las desmontables (Structuralia, 2020).

- Uniones fijas: Las que utilizan remaches de acero, cobre, hierro dulce o aluminio o elementos de fijación equivalentes. Las estructuras que deban acoplarse y la resistencia adecuada lo determinarán todo.
- Uniones soldadas fijas: Se utiliza calor para combinar las estructuras, ya sea directamente o añadiendo un metal de composición comparable. La soldadura por presión, la soldadura por fusión, la soldadura por arco, la soldadura eléctrica manual,

la soldadura eléctrica semiautomática o automática, la soldadura eléctrica automática y la soldadura por resistencia eléctrica son las distintas formas de soldadura que existen.

- Las uniones fijas clavadas se utilizan sobre todo para unir tableros y otras estructuras de madera maciza. Se construyen utilizando varillas, placas, pernos y clavos.
- Uniones desmontables atornilladas: Se aplican a placas de acero e implican el uso de una arandela y una tuerca para ajustar el apriete o aflojamiento de los pernos.
- Las uniones desmontables con chavetas se utilizan con frecuencia para unir piezas de máquinas con ejes que requieren una rotación precisa. Para ello se emplean chaveteros, que son soldables. Las uniones de chaveta deslizante, las uniones con chaveta y las uniones de eje de perfil son todas diferentes en función de cómo se utilice este elemento.
- Juntas desmontables basadas en pasadores: Los esfuerzos se transfieren perpendicularmente al eje del pasador encajando exactamente en orificios previamente taladrados. Suelen ser de acero, con o sin cabeza. Se utilizan sobre todo para unir piezas separadas.

Figura 17

Uniones rígidas



Nota. Ejemplos de uniones rígidas. Fuente: Victaulic.com

2.2.20. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE TUBERÍAS

Desde el pozo de aspiración hasta el punto de descarga, se presenta toda la línea de la secuencia de tramos de tuberías. El análisis de este sistema de tuberías se llevó a cabo desde el nivel 355 de la mina hasta la descarga en superficie (nivel 555).

Se incluyen los accesorios de instalación y para el control del sistema de bombeo: empaquetaduras, filtros, válvulas, entre otros. A su vez, abarca analizar los elementos de soporte, como resorte, colgantes y zapatas.

Para realizar un examen mecánico de un sistema de tuberías se utilizan los pasos que se indican a continuación (Porrás, 2018):

- Establecer las variables fundamentales del análisis, como la temperatura, la presión, la velocidad del viento, los choques de fluidos, los gradientes térmicos, los movimientos sísmicos y el número de ciclos por los que pasan las distintas cargas.
- Determinar el diámetro de la tubería, que viene determinado por la velocidad del fluido, el caudal y la presión.
- Seleccionar los componentes de la tubería según la corrosión, resistencia y fragilización.
- Seleccionar los tipos de válvulas y bridas.
- Calcular el grosor mínimo de pared (Schedule) necesario para soportar las tensiones causadas por la presión del fluido a las temperaturas y presiones de diseño.
- Establecer la disposición que se adecue a los soportes.
- Estudiar las tensiones provocadas por la flexibilidad, con el objetivo de garantizar que las tensiones en las tuberías, a lo largo de toda la vida útil de la instalación, todas las fases de funcionamiento, así como las presiones y los momentos en los puntos

terminales, se encuentran dentro de los límites aceptables para los dispositivos locales y los puntos terminales del sistema.

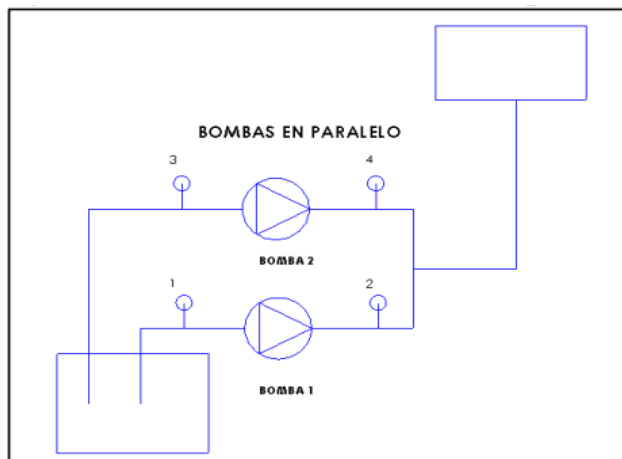
2.2.21. SISTEMA DE CONEXIONES EN SERIE Y EN PARALELO

Cuando los caudales de dos o más bombas convergen en una tubería, se dice que están conectadas en paralelo. El total de todos los caudales es el caudal resultante. En estas configuraciones no aumenta la presión de descarga. Por tanto, para conseguir caudales variables manteniendo la misma altura o energía por unidad de peso de fluido en un sistema, las bombas centrífugas suelen conectarse en paralelo.

Para el suministro o la extracción de grandes cantidades de fluido, es un sistema que se utiliza con frecuencia. Sin embargo, como es posible que una de las bombas funcione mal, hay que tener en cuenta que las características de las bombas montadas en paralelo son las mismas. El sistema en paralelo aumenta el caudal manteniendo constante la presión de bombeo.

Figura 18

Sistema de bombeo en paralelo

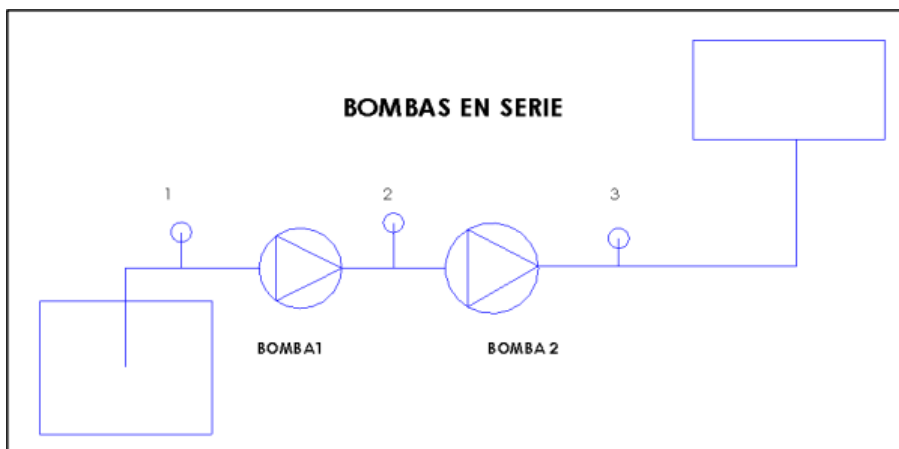


Nota. Sistema en paralelo. Fuente: Moyano y Naranjo (2015). Automatización de la adquisición de datos en un banco de pruebas con instalaciones en serie y en paralelo de bombas centrífugas.

Cuando el caudal producido por una bomba se transfiere a la siguiente, dos o más bombas se conectan en serie. Gracias a esta configuración pueden alcanzarse alturas de bombeo mayores que con una sola bomba. La altura (H), pero no el caudal (Q), aumentará si las bombas funcionan en serie. Por lo tanto, la curva característica producida por la asociación de dos bombas será la suma de la altura suministrada por cada bomba con el mismo caudal, ya que el mismo caudal recibirá la misma energía de cada bomba (porque son iguales).

Figura 19

Conexión de bombas en serie

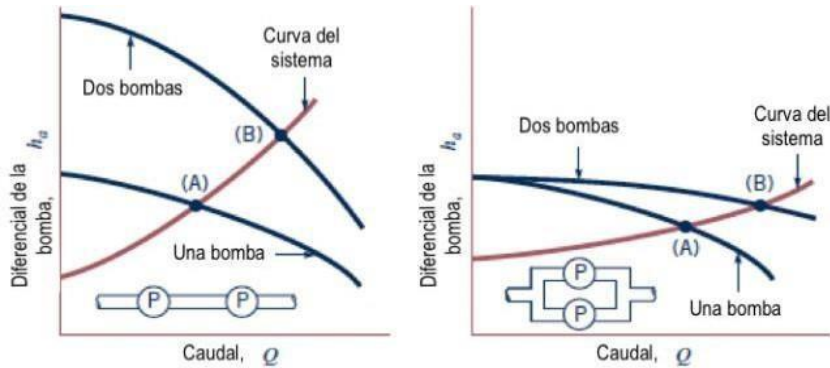


Nota. Sistema en serie. Fuente: Moyano y Naranjo (2015). Automatización de la adquisición de datos en un banco de pruebas con instalaciones en serie y en paralelo de bombas centrífugas.

El sistema en serie se emplea para impulsar un caudal determinado y, al mismo tiempo, elevar el mismo caudal a varias alturas, superando las importantes resistencias que provocan las largas longitudes de las tuberías.

Figura 20

Efecto de las bombas hidráulicas que funcionan en serie y en paralelo



Nota. gráficos que muestran cómo funcionan las bombas hidráulicas en serie y en paralelo.

Gallardo (2019) es la fuente. Diseño y fabricación de un sistema de pruebas hidráulicas para la investigación de bombas en paralelo y en serie.

2.2.22. CATEGORIZACIÓN DE LAS LÍNEAS

La categorización de las líneas de tuberías consiste en la clasificación sistemática de los ductos según parámetros como el fluido transportado, la presión de operación, la temperatura de trabajo, los riesgos asociados y las normativas de diseño aplicables. Este proceso permite asignar códigos y especificaciones técnicas que garantizan la seguridad, la confiabilidad y la estandarización en los proyectos industriales. En la práctica, la categorización se emplea para definir materiales, clases de presión, requisitos de diseño y procedimientos de inspección y mantenimiento, siendo un aspecto clave en normas como ASME B31.3 y en la gestión de la ingeniería de detalle de plantas industriales (García & López, 2018; ASME B31.3, 2022).

Esto permite catalogar las líneas en cuatro niveles o categorías, siendo la de mayor grado de criticidad la categoría I y la menos crítica la categoría a IV como se indica a continuación.

2.2.22.1. Categoría I

Se trata de líneas de alta criticidad que deben ser señaladas al principio del proyecto, realizando incluso estudios previos para tener en cuenta su posible suportación durante el proyecto.

En la ingeniería de detalle se realizarán estudios más minuciosos y definitivos de estas líneas. En esta categoría se incluyen:

- Líneas de alta presión.
- Líneas de transferencia a hornos.
- Líneas de gran diámetro ($\geq 48''$ ó $D/t > 100$).
- Líneas de transporte de fluidos críticos por toxicidad, inflamabilidad, etc., incluidos en la categoría M según ASME B31.3
- Líneas de gas natural licuado (LNG).
- Líneas con juntas de expansión.
- Líneas con temperaturas superiores a los 400 °C.
- Líneas sometidas a fatiga con más de 22000 ciclos.
- Líneas de categoría II que a juicio del analista deben someterse a un estudio más exhaustivo.

Esto permite catalogar las líneas en cuatro niveles o categorías, siendo la de mayor grado de criticidad la categoría I y la menos crítica la categoría a IV como se indica a continuación.

2.2.22.2. Categoría II

Se trata de líneas con un grado de criticidad menor que las de categoría I pero que en todo caso deben someterse a un análisis formal mediante software de simulación. Son las siguientes:

- Líneas conectadas a bombas y compresores alternativos o centrífugos y turbinas que cumplan las siguientes especificaciones:
 - Diámetro nominal menor a 3" y temperatura de diseño mayor que 65 °C ó menor que 6 °C.
 - Diámetro nominal mayor a 12" y temperatura de diseño mayor que 50 °C ó menor que 6 °C.
- Líneas conectadas a enfriadores por aire.
- Líneas conectadas a recipientes a presión.
- líneas conectadas a hornos y calderas.
- Líneas sometidas a vibraciones.
- Líneas sometidas a fatiga con menos de 22000 ciclos.
- Líneas conectadas a cajas frías.
- Líneas conectadas a equipos de aluminio.
- Líneas sometidas a cargas ocasionales importantes y que requieran de algún análisis dinámico.

2.2.22.3. Categoría III

Las líneas de esta categoría deben ser analizadas, pero será suficiente con un cálculo manual sin necesidad de usar simulaciones por ordenador. Sin embargo, si los cálculos dan como resultado la necesidad de realizar cambios en el diseño de la línea, sí habrá que avalar esos cambios con un cálculo formal por ordenador ya que los métodos manuales son más conservadores y un cálculo más formal puede evitar que se realicen cambios de diseño innecesarios. En la categoría III se incluyen las siguientes líneas:

- Todas las líneas conectadas a equipos sensibles que no estén incluidas en la categoría II.
- Líneas catalogadas como Power Plant Piping según ASME B31.1

2.2.22.4 Categoría IV

En esta categoría se incluyen las líneas que necesitan únicamente un análisis visual como son:

- Líneas que sustituyan a líneas existentes sin cambios significativos.
- Líneas con arreglos iguales a otras existentes en la planta y con las mismas condiciones de operación y diseño.

2.2.23. NORMAS DE ANÁLISIS

Las normas de análisis en tuberías son un conjunto de lineamientos técnicos y criterios de diseño establecidos por organismos internacionales que regulan la evaluación de los esfuerzos, deformaciones y condiciones de operación de los sistemas de tuberías. Estas normas permiten garantizar la seguridad estructural, la confiabilidad operativa y la durabilidad de los ductos frente a factores como presión interna, temperatura, cargas externas y movimientos de soporte. Además, proporcionan métodos estandarizados de cálculo y validación para determinar esfuerzos admisibles, requisitos de flexibilidad y consideraciones de fatiga. Entre las más reconocidas se encuentran las normas del código ASME B31, que establecen pautas específicas para tuberías de proceso, transporte y de servicio en diferentes industrias (Mokhatab et al., 2019; ASME B31.3, 2022).

Las normas son muy similares, pero existen diferencias con respecto a las condiciones de análisis, a los elementos admisibles y el cálculo de los esfuerzos. Asimismo, algunas normas utilizadas para este tipo de análisis en el Perú se encuentran las siguientes: NTP-ISO 580:2006 (revisada el 2022) Sistemas de tuberías y canalizaciones plásticas; NTP-ISO 1452-1:2011 (actualizada en 2022) Sistemas de tuberías de plástico, enterradas o por encima con presión, para suministro de agua, drenaje y alcantarillado. Poli (cloruro de vinilo) no plastificado (PVC-U).

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo aplicado, ya que pretende abordar problemas a los que, en este caso, se enfrenta la empresa minera elegida. De este modo, se intenta mejorar la forma de evacuar el agua de la mina para garantizar la seguridad de los trabajadores, utilizando un análisis flexible para regular la tensión en las tuberías de transporte con presiones estables.

3.2. MÉTODO

La metodología de investigación está fundamentada en el análisis de resultados obtenidos a partir de la variación controlada de variables estructurales que afectan directamente la flexibilidad de un sistema de tuberías. Esta estrategia permite identificar el impacto de factores como presión, temperatura y espesor en el comportamiento mecánico del sistema, lo cual facilita la verificación de las hipótesis planteadas.

El análisis se sustenta en los lineamientos establecidos por los códigos ASME B31.3 y B31.4, complementados con normativa técnica local vigente. Asimismo, se hace uso de software especializado (como CAESAR II) para realizar simulaciones estructurales, las cuales permiten validar los resultados teóricos bajo condiciones de carga reales y combinadas.

Este método no solo permite evaluar técnicamente la flexibilidad y los esfuerzos inducidos en las tuberías, sino también establecer correlaciones entre las variables analizadas y sus efectos estructurales mediante cálculos normativos y simulaciones computacionales. Además, los resultados obtenidos proporcionan insumos clave para la evaluación de métodos de construcción alternativos, enfocados en los diferentes tipos de soportes, los cuales serán analizados posteriormente en función de su eficiencia estructural y viabilidad económica.

3.2.1. TIPOS DE ANÁLISIS APLICADOS AL SISTEMA DE TUBERÍAS

Para realizar el análisis de flexibilidad de un sistema de tuberías que necesita, por su categoría, la realización de un cálculo formal y unos resultados precisos, se dispone de métodos de análisis mediante software especializado como “CAE PIPE”, “FE PIPE” o “CAESAR II”.

Estos programas, internamente, se basan en el estudio de esfuerzos tal y como se indicó en los puntos anteriores. Por esto, es fundamental que un buen analista de flexibilidad conozca esa base teórica, para poder realizar una introducción de datos correcta al programa, así como un buen análisis de los resultados que se obtendrán del cálculo. Además de los métodos computarizados, existen métodos manuales que pueden ser suficientes para el análisis de una línea si por su categoría de criticidad así se considera.

Por lo general, los métodos manuales son métodos más conservadores que los métodos computarizados debido a que el cálculo es menos detallado y necesita un margen de seguridad mayor. A continuación, se describen algunos de los métodos manuales más útiles.

Como principio general, todas las líneas deberán ser analizadas por flexibilidad sin excepción. La clasificación de los métodos de análisis, está basada atendiendo principalmente a la exactitud en los resultados que puede obtenerse con cada uno de ellos.

3.2.1.1. Análisis Visual

Este tipo de análisis se aplica a líneas no críticas y líneas menores, se basa en la experiencia del ingeniero de flexibilidad para decidir la localización de soportes y restricciones sin hacer cálculos o haciendo cálculos sencillos no formales. No se desarrollará documentación de cálculo y solo se comentará los dibujos de arreglo de tuberías general.

3.2.1.2. Análisis Manual o Aproximados

Este tipo de análisis se practica a líneas estándar que no están conectadas a equipos rotatorios (bombas, turbinas, etc.) y equipo delicado (quemadores, equipos de aluminio, etc.), se elaboran cálculos manuales por métodos aproximados conservadores basado en gráficas (cartas) ó valores tabulados, el cual provee una evaluación aproximada de los esfuerzos máximos en la tubería y de las reacciones en los soportes.

3.2.1.3. Análisis Formal

Este tipo de análisis se elabora en líneas críticas y líneas especiales por un método analítico, donde se consideran todas las fuerzas, momentos, desplazamientos y restricciones de la tubería bajo estudio; utilizando para su elaboración programas de cómputos previamente aprobados y certificados de manera que se garantice la veracidad de sus resultados.

Los siguientes criterios deberán de usarse para definir los tipos de análisis requeridos de acuerdo a las condiciones máximas y operación de la línea y a su diámetro.

3.2.1.4. Análisis de Peso Muerto

El examen de los resultados del sistema de tuberías encontrado sobre el terreno constituye la estrategia de investigación elegida para la verificación de la hipótesis. Que se han determinado las etapas posteriores.

3.2.1.5. Análisis Misceláneos

Son todos aquellos que por su rara aplicación se les considera misceláneos y estos son análisis de viento, análisis sísmicos y análisis térmicos bajo condiciones de arranque, también se consideran los requerimientos del NEMA y API para equipos rotatorios.

3.2.2. REQUERIMIENTO DE UN ANÁLISIS FORMAL

El requerimiento de análisis formal como su nombre lo indica, se aplica para conocer que tuberías se analizan por computadora y cuáles no, ya que por su configuración no se necesita. De este análisis no obtendremos ningún valor de fuerzas, momentos ó esfuerzos. Los códigos ASME B31.1 y ASME B31.3, establecen que no es necesario el análisis de flexibilidad en un sistema cuando:

El sistema en cuestión sea duplicado, idénticas condiciones de operación, dimensiones, diámetro e instalación o que un sistema reemplace a otro, sin tener cambios y que además este sistema cuente con un record de servicio satisfactorio. Cuando pueda hacerse un estudio adecuado de comparación con otros sistemas anteriormente analizados. Cuando son de un tamaño uniforme en cuanto a diámetro y cedula, no tener más de dos puntos de anclaje, sin restricciones intermedias, y que cumplan con los límites de la ecuación empírica:

$$\frac{D \cdot y}{(L - U)^2} \leq K_1, \quad \text{con } y = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2}$$

Donde:

- D: Es el diámetro exterior de la tubería, [mm] ó [pulg.]
- y: Es la resultante de la expansión total, [mm] ó [pulg.] (en caso de que exista desplazamiento de los puntos de anclaje se tendrá en cuenta en los incrementos de longitud en cada eje según corresponda).
- L: Es la longitud total de tubería entre dos anclajes, [m] ó [pies].
- U: Es la distancia en línea recta entre los dos anclajes, [m] ó [pies].
- K₁: Es una constante cuyo valor es igual a 208000 Sa/Ea (mm/m)² ó 30 Sa/Ea (pulg/pies)². Para una temperatura de referencia de 21 °C (70 °F) se tiene para los aceros

un valor de esta constante igual a 208 en unidades internacionales y 0.03 para unidades inglesas.

Como se ve en la expresión, un mayor diámetro supone una tubería menos flexible y por lo tanto que es capaz de absorber menos expansión térmica. La diferencia entre la longitud de tubería y la distancia entre los extremos es una forma de cuantificar los tramos de tubería que se sitúan perpendicularmente a la dirección de la expansión térmica. Si la tubería es demasiado recta entre los dos anclajes, será también menos flexible.

Este método no permite calcular numéricamente esfuerzos o cargas ya que, como se ha visto, se basa en una expresión empírica que consiste en una comprobación basada en la geometría de la tubería, sin realizar ningún cálculo de esfuerzos.

3.2.3. CRITERIOS GENERALES PARA DETERMINAR SI UN SISTEMA DE TUBERÍA REQUIERE ANÁLISIS FORMAL

No existen criterios bien establecidos para determinar sin dificultad, si un sistema requiere o no análisis de esfuerzos formal. La dificultad estriba en acertar si dicho sistema puede ser ruteado en campo, o si requiere una solución analítica completa.

Aunque no hay manera de establecer una respuesta simple a estas preguntas, un estudio de esfuerzos deberá ser requerido para sistemas de tubería que cumplan con los siguientes criterios:

- Tubería conectada a equipo rotatorio tales como bombas, compresores, turbinas, secadores y equipos donde el alineamiento sea crítico; así como en aquellos donde se esperen asentamientos de cimentaciones debido a la consolidación del terreno.
- Tubería conectada a tanques de almacenamiento, los cuales pueden estar sujetos a asentamientos substanciales.

- Tubería conectada a equipo mecánico (cambiadores, recipientes, columnas), en los cuales se presente expansión térmica.
- Tubería con configuraciones no balanceadas, tales como tuberías con exceso de longitud en una sola dirección y con ramales de conexión cortos.
- Tubería conectada a válvulas de relevo o discos de ruptura, donde las fuerzas de reacción sean considerables.
- Tubería de baja resistencia tales como tubería de fibra de vidrio y plástico, con temperaturas igual o mayores a 180 °F.
- Tubería con fluidos con categoría “M”, (fluidos peligrosos, como se definen en ANSI B31.3, capítulo VIII, apéndice “M” y con temperaturas iguales o mayores a 250°F).
- Tubería sujeta a flujo en dos fases, golpe de ariete o corte rápido de fluido.
- Sistemas de tuberías que están sujetas a contracción térmica debido a temperaturas negativas, -20°F.
- Cuando la presión exceda la máxima permitida para los accesorios 2500#, por ANSI B16.5
- Cuando la temperatura del sistema sea mayor a 400°F.
- Sistemas que transporten gas, el cual pueda enfriarse y pasar a la fase líquida.
- Cuando el producto del diámetro exterior (en pulg.) por la presión (en lb/in²) sea igual o mayor a 1157.
- Sistemas de tuberías que contengan una o más juntas de expansión.

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se enmarca dentro del enfoque *cuantitativo-correlacional*, ya que busca establecer la relación entre las variables estructurales del sistema de tuberías (como

presión, temperatura y geometría) y los esfuerzos generados, con el fin de verificar la hipótesis planteada.

La estrategia de investigación contempla el estudio del sistema de tuberías en condiciones reales encontradas sobre el terreno, estructurándose en las siguientes etapas:

a) Búsqueda y análisis de información técnica y del estado del arte

Incluyendo revisión de tesis, artículos científicos, normativas internacionales y conocimientos prácticos obtenidos en plantas operativas.

b) Identificación de variables clave

Diferenciando las variables independientes (como presión, temperatura y configuración de tubería) de las dependientes (como esfuerzos y deformaciones resultantes).

c) Construcción de un modelo de análisis

Formulado con base en los criterios técnicos establecidos por ASME B31.3 y B31.4, para representar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de carga.

3.4. POBLACION Y MUESTRA

La población de estudio está conformada por sistemas de tuberías utilizadas en entornos industriales sometidos a cargas exigentes de operación. Para efectos de esta investigación, la muestra evaluada corresponde a un sistema de tuberías de conducción de agua proveniente del fondo de la mina, diseñado conforme a los estándares ASME B31.3 y B31.4.

El sistema en estudio está compuesto por tres (03) bombas centrífugas dispuestas en serie, modelo B1 GIW LSA de 250 hp, cuya disposición y ubicación responden a las características topográficas del terreno, con una distribución sobre las banquetas del fondo de la mina. Con el fin de realizar un análisis detallado de la flexibilidad del sistema, se ha

seleccionado el primer tramo del sistema de impulsión como muestra representativa, donde se evaluarán diferentes configuraciones, condiciones de contorno y combinaciones de carga.

Dicho segmento será sometido a simulaciones y análisis estructurales orientados a identificar tensiones, desplazamientos y condiciones críticas de operación, permitiendo proponer mejoras en su diseño y soporte.

Las muestras evaluadas incluyen un sistema de tuberías diseñado de acuerdo con las normas ASME B31.3 y B31.4, con optimizaciones realizadas a la luz de los resultados del análisis de flexibilidad.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Se empleo el programa CAESAR II, junto con fichas técnicas, planos isométricos y especificaciones de diseño para recopilar la información de entrada necesaria para la simulación.

3.5.1. CONDICIONES AMBIENTALES Y DE OPERACIÓN

El trabajo de investigación considera las siguientes variables que serán empleadas para todos los cálculos. Estas variables corresponden a las bases del diseño.

Tabla 4*Condiciones ambientales y de operación*

Ítem	Parámetro	Valor	Unidad	Comentario
1	Presión de trabajo	280	psig	-
2	Temperatura máxima del aire	26	°C	-
3	Temperatura mínima del aire	-2	°C	-
4	Temperatura media del aire	15	°C	-
5	Humedad relativa	44	%	-
6	Presión Atmosférica	66	kPa	-
7	Precipitación promedio anual	127	Mm	-
8	Altura de instalación	3400	msnm	-
9	Zonificación	-	4	Dato de ingreso según RNE E.030
10	Nieve	-	-	N/A
11	Nivel de polución en el ambiente	-	-	-
12	Caudal	170	l/s	-
13	Fluido	-	-	Agua de fondo de mina
14	Temperatura del fluido	10	°C	-
15	Temperatura del fluido	20	°C	-
16	Viscosidad dinámica	Pa-s	1	-
17	Densidad	1000	Kg/m ³	-

3.5.2. CARACTERÍSTICAS DE TUBERÍA

La presente investigación no está focalizada en abordar los cálculos hidráulicos del sistema de bombeo, por lo que se tomarán y establecerán variables hidráulicas de operaciones similares y existentes. La mejora de los estudios se focalizará en la instalación de soportes y análisis de los esfuerzos mecánicos en las tuberías.

Para ello, se consideran los siguientes parámetros empleados en el presente estudio.

Tabla 5

Características de tubería a emplear

Ítem	Parámetro	Descripción
1	Material	Acero Carbono A 53 Gr. B.
2	Diámetro NPS	16 in
3	Diámetro exterior	406.4 mm
4	Espesor	Sch40 (12.7 mm)
5	Peso	123.31 kg/m
6	Momento de Inercia de área	$3.047 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
7	Esfuerzo de Fluencia	30.000 psi.
8	Factor de Diseño	72% (ASME B31.3)
9	Esfuerzo Admisible	35.000 psi. (ASME B31.3)
10	Espesor de Pared	0.280 inch (7,11 mm)
11	Rugosidad	0.0018 inch (0.04572 mm).
12	Presión de Operación Máxima Admisible (MAOP)	1430 psi para 16" sch. 40 (0.365 in)

3.6. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se aplicaron técnicas de análisis estructural y normativas, del ASME B31.3 para:

- Verificar si el sistema requiere un análisis formal, utilizando el método “simple” de la norma.
- Determinar los esfuerzos máximos y deformaciones mediante simulaciones.
- Clasificar las líneas según su criticidad.
- Comparar configuraciones para decidir si requieren reconfiguración o soportado adicional.

3.7. VARIABLES DE ESTUDIO

a) Variables Independiente

Control de la tensión en las tuberías mediante el examen de la flexibilidad.

b) Variables Dependiente

Extracción de mantos acuíferos

3.8. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 6

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
Control de la tensión en las tuberías mediante el examen de la flexibilidad.	Carga	Cargas por su peso
		Cargas variables
	Presión	Intensas presiones internas que coinciden
		Intensas presiones externas que coinciden
	Temperatura	Intensas temperaturas internas que coinciden
		Intensas temperaturas externas que coinciden
	Espesor	Presión interna (presión de diseño, diámetro de diseño de la tubería, presión de diseño y diámetro de corrosión y/o erosión)
		Presión externa (presión de diseño, diámetro de diseño de la tubería, presión de diseño y diámetro de corrosión y/o erosión)
Extracción de mantos acuíferos	Funcionamiento sencillo	Factores operativos
		Factores de control
	Accesibilidad para mantenimiento	Un reto mínimo para sustituir o reparar
		Espacios de mantenimiento sin coste

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CRITERIOS PARA EVALUAR LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DEL SISTEMA

Encontrar el trazado óptimo con los menores gastos a largo plazo es el objetivo del diseño de tuberías. Un sistema de tuberías debe ser lo bastante flexible para evitar dilataciones y/o contracciones térmicas o movimientos provocados por los soportes y terminales de las tuberías debido a cambios de temperatura, Fallos de la tubería o de sus soportes como consecuencia de choques y pares de torsión elevados de la tubería, fugas en las juntas o daños causados a la tubería, sus válvulas o cualquier equipo acoplado (como bombas y turbinas).

El análisis de este sistema de tuberías se realizó desde el nivel 355 de la mina hasta la descarga en superficie (nivel 555). Esta tubería incluye la instalación del sistema de bombeo y los accesorios de control.

4.2. DESPLAZAMIENTOS DEBIDO A LA DEFORMACIÓN

- El desplazamiento del calor. Las dimensiones de un sistema de fontanería pueden alterarse como consecuencia de las variaciones de temperatura.
- Límite a la flexibilidad. Las limitaciones pueden considerarse flexibles en un rango de desplazamiento si no se consideran rígidas.
- Deformación total debida al desplazamiento. Para calcular las deformaciones totales por desplazamiento (deformación proporcional) en un sistema de tuberías, estos factores deben tenerse en cuenta conjuntamente, ya que tienen repercusiones similares en los sistemas de tuberías.

4.3. ESFUERZOS POR DESPLAZAMIENTO

Las tensiones pueden considerarse proporcionales a la deformación total del desplazamiento (sistema equilibrado) en un sistema de tuberías en el que las deformaciones se distribuyen por igual. Estos requisitos deben existir en el sistema deseado.

Cuando existe una deformación localizada excesiva en un sistema (un sistema desequilibrado), las tensiones en los sistemas de tuberías no pueden considerarse proporcionales a los desplazamientos:

Tuberías pequeñas conectadas a una tubería más grande y robusta, pero sometidas a tensiones importantes.

El uso de un material con menos fluencia o una reducción local del tamaño o del grosor de la pared.

Líneas de tamaño uniforme con una pequeña sección de la tubería principal que absorbe cualquier dilatación o contracción térmica.

4.4. ANÁLISIS CONSIDERANDO LAS CARGAS EN LAS TUBERÍAS

En el análisis deben tenerse en cuenta las cargas de presión de diseño, las cargas de peso y las cargas dinámicas. La primera se deriva de la presión en la situación interna o externa más grave a la temperatura adecuada para esa situación con los parámetros de funcionamiento típicos. Sin embargo, a elevaciones superiores a 4.000 msnm, como en el caso de una unidad minera, la temperatura en la mina suele ser de 10°C. En caso de variación excesiva de la temperatura, pueden producirse cargas críticas debido a la presión de trabajo.

En términos de cargas de peso, se refiere al peso muerto, que incluye elementos como aislamiento, tuberías y accesorios. incluyen impactos regionales provocados por reacciones relacionadas con el soporte. Estas cargas son elementos seguros de flexión y cizalladura, y se

controlan utilizando anclajes de barras de acero como taladros de acero. Las cargas dinámicas incluyen cargas de impacto u ondas de presión, como las provocadas por golpes de ariete, caídas bruscas de presión o descargas de fluidos.

El análisis del golpe de ariete es necesario para gestionar el cambio de presión provocado por casos extremos, y se describe a continuación.

4.4.1. MÉTODO PRÁCTICO PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE

La velocidad del agua y, en las unidades de bombeo, las alturas manométricas del grupo de bombeo deben calcularse previamente.

- a) El inicio y el final de la maniobra, ya sea de cierre o de apertura, completa o parcial, se miden para calcular el tiempo de parada (T), que es importante ya que es cuando se cambia el régimen de movimiento del fluido. Utilizando la aproximación de Mendiluce, se puede calcular lo siguiente:

$$T = C + \frac{KLV}{gH_m}$$

Donde:

- H_m : la altura manométrica, (m).
- K y C: coeficientes empíricos ambos dependientes de la conducción.
- g: gravedad, (m/s²).
- L: Longitud real de la conducción, (m).
- V: Velocidad del agua en la conducción, (m/s).

Para facilitar la aplicación de la fórmula del coeficiente K, que expresa la inercia del artefacto explosivo en relación con la cinética del agua en el instante de la conversión de la energía, se aconseja utilizar los siguientes números redondos:

Tabla 7*Coeficiente K, inercia del equipo de bombeo*

L (m)	K
< 500	2
≈ 500	1, 75
500 < L < 1500	1, 5
≈ 1500	1, 25
> 1500	1

Nota: HodrojING (2022)

Los efectos de la energía adicional en la ecuación, como la descompresión del agua, que afectan a las instalaciones de baja pendiente, se sustituyen por el coeficiente C. Se aconsejan los siguientes valores en función de la pendiente hidráulica de la instalación.

Tabla 8*Coeficiente C. Suple el efecto de otras energías en el cálculo.*

i	c
< 20%	1
≈ 25%	0, 8
≈ 30%	0, 6
≈ 40%	0, 4
> 50%	0

Nota: HodrojING (2022)

- b) El tiempo de cierre de la válvula será conocido en el caso de alimentación por gravedad. siendo la velocidad de propagación de una onda de presión a través del agua del conducto. Aplicando la expresión de Allievi:

$$c) \quad a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \frac{K}{e}}}$$

Donde:

- D: diámetro de la tubería, (m).
 - e: espesor de la tubería, (m).
 - k: Coeficiente dependiente del módulo de Young E
- d) Se determina cuánto se extiende el impulso antes de alcanzar la longitud crítica (L_c), también conocida como punto de coincidencia en las fórmulas de Michaud y Allievi. Para calcular L_c puede utilizarse la siguiente expresión

$$L_c = \frac{aT}{2}$$

- e) Utilizando la ecuación adecuada a la situación, comparamos los valores de L y L_c . El objetivo es calcular la sobrepresión en metros. Para obtener el valor final del pico de presión, este número se sumará o restará a la presión estática. Tendremos tres casos diferentes basados en esta comparación:

Tabla 9

Coeficiente C. Suple el efecto de otras energías en el cálculo

$L < L_c$	Implusión corta	$T > \frac{2 \cdot L}{a}$	Cierre lento	Michaud	$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot T}$
$L > L_c$	Implusión larga	$T < \frac{2 \cdot L}{a}$	Cierre rapido	Allievi	$\Delta H = \frac{a \cdot v}{g}$

Si $L=L_C$ se puede utilizar cualquiera de las dos ecuaciones. La velocidad o lentitud de cierre también puede determinarse contrastando la duración de la onda de presión antes de oscilar completamente con el tiempo que tarda la bomba en detenerse o la válvula en cerrarse, es decir, utilizando:

$$\frac{2L}{a}$$

- f) Las válvulas de retención se colocan en las impulsiones según sea necesario para mantener la línea de sobrepresión causada por el golpe de ariete por debajo de la línea piezométrica. La línea de presiones máximas del golpe de ariete es desplazada por las válvulas de retención.

Un volante de inercia, chimeneas de equilibrado, caldera, válvula de alivio rápido, válvula anticipadora de ondas, ventosa, válvula de retención y válvula de retención de clapeta son algunas técnicas para disminuir los efectos del golpe de ariete (Porrás, 2018).

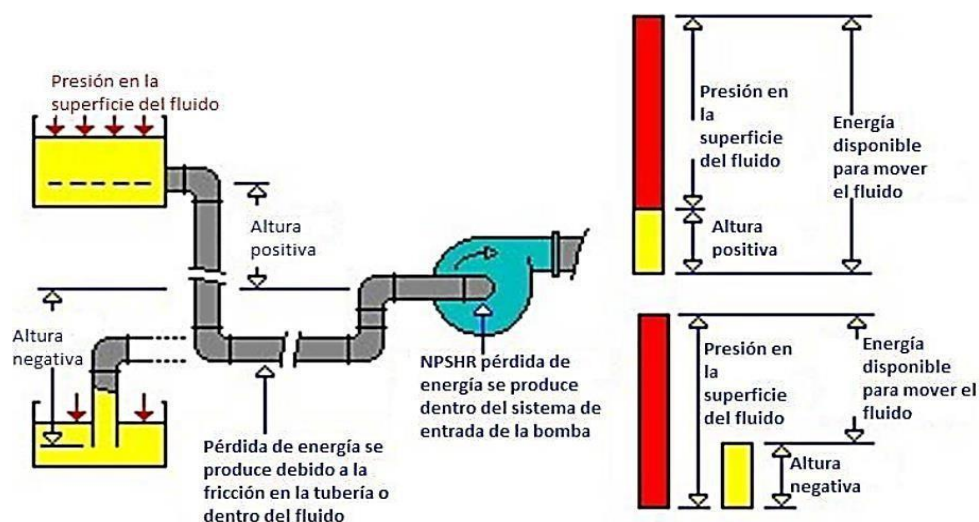
4.5. ANÁLISIS CONSIDERANDO LA PRESIÓN EN LAS TUBERÍAS

4.5.1. SISTEMA DE TUBERÍAS

Desde el pozo de aspiración hasta el extremo de descarga, se muestra toda la longitud de las tuberías. desde la descarga en superficie (nivel 555) de la mina hasta el nivel 355, se realizó el examen de este sistema de tuberías.

Tabla 10*Características físicas de las tuberías*

Tubería de succión analizada		Tubería de succión propuesta	
Marca	Aceros Arequipa	Marca	Aceros Arequipa
Cedula	40	Cedula	40
Diámetro	14 pulg. Con reducción excéntrica a 10 pulg.	Diámetro	14 pulg. con reducción excéntrica a 10 pulg
Longitud	120 m	Longitud	150 m
Tubería de descarga analizada		Tubería de descarga propuesta	
Marca	Aceros Arequipa	Marca	Aceros Arequipa
Cedula	40	Cedula	40
Diámetro	8" a 12" y de 12" a 16" por bifurcación de 45°.	Diámetro	8" a 12" ensanchamiento concéntrico, de 12" a 20" bifurcación en "Y" y de 20" a 16" con reducción concéntrica
Longitud	120 m	Longitud	250 m

Figura 21*Alturas en un sistema de bombeo*

Nota. Gráfico que representa las alturas en un sistema de bombeo. Fuente: (Porrás, 2018).

4.5.2. CARGA TOTAL DE BOMBEO

Tabla 11

Propiedades del fluido para calcular la carga de bombeo

Variables	Dimensiones
Caudal o gasto	$Q = 170 \text{ l/s}$
Gravedad específica	S.G. = 1,15 para lodo líquido
Densidad del fluido	$\rho = 998,2 \text{ Kg/m}^3 \times 1,15 = 1\,148 \text{ kg/m}^3$ a 10°C por tabla.
Viscosidad absoluta	$\mu = 9,76 \times 10^{-4} \text{ Pa-s}$
Diámetro interior	$D_i = 16'' = 0,381 \text{ m}$
Temperatura del fluido	$T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
Longitud tubo descarga	$L_d = 250 \text{ m de } 16'' + 1,434 \text{ m de } 12''$
Longitud tubo de succión	$L_s = 1,510 \text{ m de } 14'' + 3,970 \text{ m de } 12''$
Rugosidad absoluta	$\varepsilon = 0,015$

Tabla 12

Cálculo del Número de Reynolds y Rugosidad Relativa de cada tubería

Tubería de 16 Pulgadas	Tubería de 14 Pulgadas	Tubería de 12 Pulgadas
$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,170}{0,7854 \times 0,381^2}$ $= 1,49 \text{ m/s}$	$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,170}{0,7854 \times 0,3334^2}$ $= 1,95 \text{ m/s}$	$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,170}{0,7854 \times 0,3032^2}$ $= 2,4 \text{ m/s}$
$Re = \frac{1\,148 \times 0,381 \times 1,49}{9,76 \times 10^{-4}}$ $= 6,7 \times 10^5$	$Re = \frac{1\,148 \times 0,3334 \times 1,95}{9,76 \times 10^{-4}}$ $= 7,6 \times 10^5$	$Re = \frac{1\,148 \times 0,3032 \times 2,4}{9,76 \times 10^{-4}}$ $= 8,5 \times 10^5$
$\varepsilon = \frac{\varepsilon_o}{D} = \frac{0,015 \text{ cm}}{38,1 \text{ cm}} = 0,0004$	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_o}{D} = \frac{0,015}{33,34} = 0,0004$	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_o}{D} = \frac{0,015}{30,32}$ $= 0,0005$

Tabla 13*Datos para calcular la carga total de bombeo*

Diámetro	Diámetro Interior	Velocidad	Reynolds	Coefficiente de fricción
16"	381 mm	1,49 m/s	$6,7 \times 10^5$	0,0215
14"	333,4 mm	1,95 m/s	$7,6 \times 10^5$	0,0210
12"	303,2 mm	2,4 m/s	$8,5 \times 10^5$	0,0208

Tabla 14*Pérdidas primarias generales*

Tramo	Cálculo de pérdidas primarias	Pérdida (m)
Succión	$H_{LS} = f 14'' \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + f 12'' \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,021 * \frac{1,510}{0,3334} \frac{1,95^2}{19,62} + 0,0208 * \frac{3,970}{0,3032} \frac{2,4^2}{19,62}$	0,097
Descarga	$H_{Ld} = f 16'' \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + f 12'' \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,0215 * \frac{250}{0,381} \frac{1,49^2}{19,62} + 0,0208 * \frac{1,434}{0,3032} \frac{2,4^2}{19,62}$	1,620
Total		1,717

Tabla 15*Coefficiente de pérdidas secundarias en accesorios de la succión*

Suma de coeficiente de pérdidas secundarias en la succión				
Accesorios	UNID.	K	Fuente	K _u
Canastilla de 14"	1	1,3	Karassik-Carter	1,30
Tubo entrante	1	1	$K = \frac{v^2}{2g}$	1,00
Válvula de compuerta de 14"	1	0,28	Karassik-Carter	0,28
Junta flexible de 14 "	1	2	Serv. Nac. de Aprendizaje, SENA	2,00
Reducción excéntrica de 14"- 10"	1	0,23	$K = 0,5 * \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 * \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$ SENA	0,23
Total				4,81
Contracción				
concéntrica. de 12"-10"	2	0,09	$K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$ SENA	0,18
Ensanchamiento				
concéntrico de 8"- 12"	2	0,31	$K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$ SENA	0,62
Codo de radio normal de 90° de 12"	2	0,75	Ingeniería rural	1,50
Total				2,30

Tabla 16*Coefficiente de pérdidas secundarias accesorias durante la descarga*

Suma de coeficiente de pérdidas secundarias en la descarga				
Accesorios	UNID.	K	Fuente	K(t)
Ensanchamiento				
concéntrico de 8"- 12"	1	0,31	$K = [1 - (\frac{D_1}{D_2})^4]$	0,31
Codo de radio				
normal de 90° de 12"	1	0,75	Serv. Nac. de Aprendizaje, SENA	0,75
Válvula de				
compuerta de 12"	1	0,28	Serv. Nac. de Aprendizaje, SENA	0,28
Bifurcación 45°				
con brida	1	2	Máquinas Hidráulicas. Ábacos.	2,00
Total				3,34
Reducción				
concéntrica de 20"- 16"	1	0,13	$K = [1 - (A_1/A_2)^2]^2$	0,13
Codo de radio				
largo de 16"	1	0,35	Ingeniería Rural	0,35
Válvula de cierre				
lento de 16"	1	0,28	Karassik-Carter	0,28
Válvula Check de				
16"	1	2	VAMEX	2,00
Válvula de				
compuerta de 16"	1	0,28	Ingeniería Rural	0,28
Total				3,04

Tabla 17*Total de pérdidas secundarias*

Tramo	Calculo total de pérdidas secundarias	Pérdidas (m)
Succión	$H_{ss} = \sum K_{14"} \frac{V_s^2}{2g} + \sum K_{12"} \frac{V_d^2}{2g} = 4,81 * \frac{1,95^2}{19,62} + 2,30 * \frac{2,4^2}{19,62}$	1,61
Descarga	$H_{sd} = \sum K_{16"} \frac{V_s^2}{2g} + \sum K_{12"} \frac{V_d^2}{2g} = 3,04 * \frac{1,95^2}{19,62} + 3,34 * \frac{2,4^2}{19,62}$	3,18
Total		4,79

Tabla 18*Pérdidas de carga total*

Tramo	Succión (m)	Descarga (m)	Total (m)
Pérdidas primarias	0,097	1,62	1,717
Pérdidas secundarias	1,61	1,57	3,180
Total	1,707	3,19	4,897

a) Carga total de bombeo:

$$H \text{ Bombeo total} = 200 \text{ m} + 4,897 \text{ m} = 204,897 \text{ m} \approx 205 \text{ m}$$

b) Cálculo de la potencia hidráulica:

$$Ph = 1\,148 * 9,81 * 0,170 * 72,897 = 139,5 \text{ Kwatt}$$

$$Pa = \frac{139,49 \text{ Kw}}{0,735} = 189,79 \text{ Kw} = 255 \text{ HP}$$

Donde la eficiencia es 73.5 % por las curvas características de la bomba GIW LSA 8X10–32(HP), según el catálogo del fabricante.

Tabla 19

Análisis de los sistemas de bombeo

Sistema de bombeo analizado	Sistema de bombeo propuesto
Se encontró:	Propuesta:
3 bombas instaladas en paralelo:	3 bombas instaladas en serie:
RPH N° 1. 750 HP. RPH 200-670. 150 l/s	Bomba N°1 GIW –LSA. 255 HP Reemplazan
RPH N° 2. 750 HP. RPH 200-670. 150 l/s	Bomba N°2 GIW –LSA. 255 HP a la Bomba
RPH N° 3. 750 HP. RPH 200-670. 150 l/s	Bomba N°3 GIW –LSA. 255 HP RPH N° 1.
Suministro 4 160 V y 90 A	La RPH N° 2. En servicio para mantenimiento del sistema principal y la RPH N° 3. Fuera de servicio.

4.6. ANÁLISIS CONSIDERANDO LA TEMPERATURA EN LAS TUBERÍAS

El objetivo principal es crear un sedimentador de tanque en la mina, ya que la corrosión del drenaje ácido de mina genera una serie de problemas con los sistemas de bombeo utilizados para el tratamiento. En este trabajo, se debe tener en cuenta la temperatura del agua; a 10°C, la oxidación es lenta y es poco probable que cause daños significativos a los tubérculos. En consecuencia, la composición de estos líquidos se ve influida por el tipo de sustancia que atraviesan, el tiempo que están en contacto con ella y el clima. La importante

gama de Eh-pH y concentraciones iónicas obtenidas es indicativa de la influencia de estos factores.

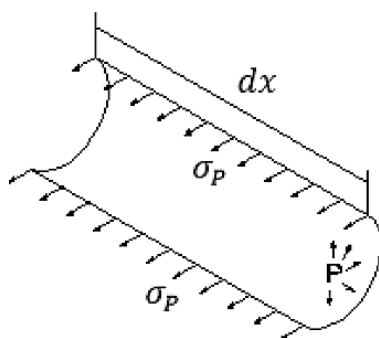
La constante de ionización, constante de disociación, constante de autoionización o producto iónico del agua es K_w en condiciones estándar de presión y temperatura, o alrededor de 25 °C (298 K). K_w es 1×10^{-14} mol/L. La temperatura afecta al valor de $p K_w$. Para temperaturas superiores o cercanas a 250 °C, $p K_w$ disminuye al aumentar la temperatura y aumenta al disminuirla. De ello se deduce que, en general, el calor hace que el agua se autoionice más.

El procedimiento que establece el pH del agua se denomina autoionización. Dado que la densidad de iones hidronio es de aproximadamente $1,0 \cdot 10^{-7}$ mol/L a 25 °C en circunstancias típicas, el agua líquida pura tiene un pH de 7 a esta temperatura. En comparación con el agua fría, el agua caliente contiene más iones de hidronio porque p aumenta con la temperatura, sin embargo, como la concentración de hidróxido también es mayor en la misma cantidad, esto no implica que la solución sea más ácida.

4.7. ANÁLISIS CONSIDERANDO EL ESPESOR

Figura 22

Análisis del espesor de la tubería



Nota. Análisis del espesor de la tubería. Fuente: Jiménez (2011). Diseño e inspección de recipientes a presión

En un lado de la superficie de la tubería, la fuerza resultante de las fuerzas tangenciales, σp , debe estar en equilibrio con la presión interna resultante.

$$2(\sigma p \cdot t \partial x) = p \cdot D \partial x$$

Donde:

- σp : Resultante de los esfuerzos tangencial debido a la presión interna.
- t : Espesor t de la tubería, (m)
- P : presión interna, (Pa)
- D : diámetro de la tubería, (m)

Luego:

$$\sigma p = \frac{P \cdot D}{2t}$$

$$\sigma p = \frac{P \cdot D}{2t} - Y \cdot p$$

Tabla 20

Factor Y para $t < D/6$

Temperatura (°F)	<900	<950	<1000	<1050	<1100	<1150
Aceros ferríticos	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Aceros austeníticos	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Otros materiales dúctiles	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

El factor "Y" de la tabla 21 tiende a ser 0,4. Además, se trata de una unidad minera a 4.200 msnm, y 1 bar equivale a 6,33 mca de presión atmosférica. Como resultado, la presión en la tubería a 205 msnm se expresa como:

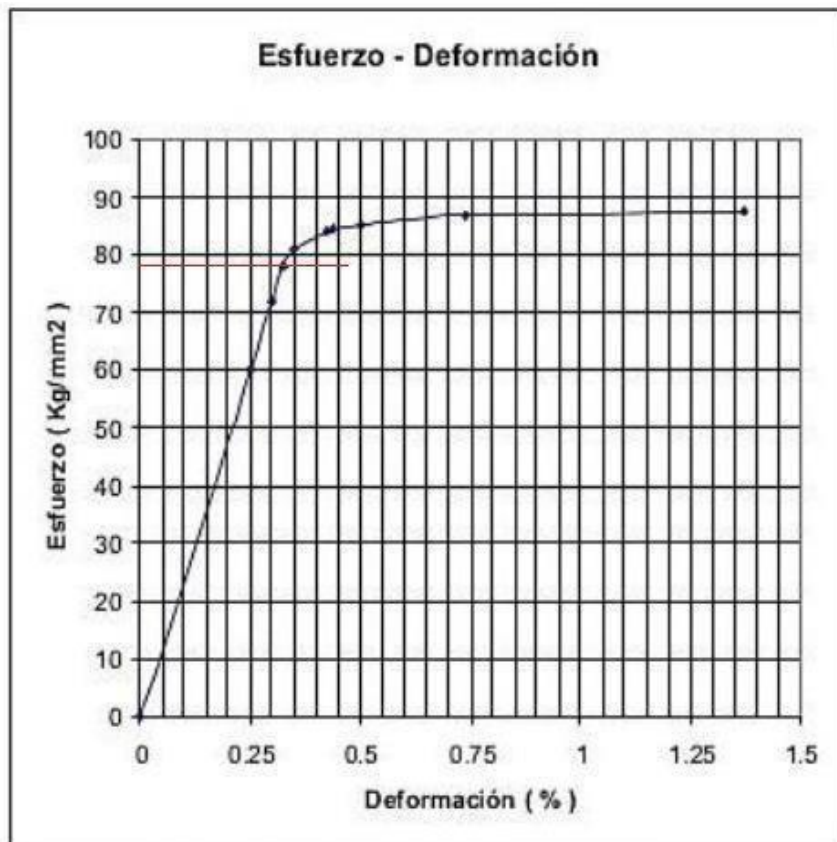
$$P = 205 \text{ mca} \times \frac{1 \text{ bar}}{6,33 \text{ mca}} \times \frac{10^5}{1 \text{ bar}} = 32,38 \times 10^5 \text{ Pa} \times \frac{1 \frac{\text{lb}_f}{2}}{6895 \text{ Pa}} = 469 \frac{\text{lb}_f}{\text{pulg}^2}$$

Según la tabla de Robert Mott, el espesor "t" de un tubo de 16 pulgadas y calibre 40 es de 0,5 pulgadas. Finalmente, después de calcular el efecto de la presión interna de la tubería sobre el esfuerzo cortante, tenemos:

$$\sigma_p = \frac{P \times D}{2t} - Y \times P = \frac{469 \frac{\text{lb}_f}{\text{pulg}^2} \times 16 \text{ pulg}}{2 \times 0,5 \text{ pulg}} - 0,4 \times 469 \frac{\text{lb}_f}{\text{pulg}^2} = 7316,4 \frac{\text{lb}_f}{\text{pulg}^2}$$

Figura 23

Comportamiento elástico de la tubería



Nota. Gráfico esfuerzo-deformación. Fuente: Porras (2018)

La tensión máxima de deformación elástica es de 78 kg/mm², que se convierte en 110 709,45 lbf/pulg², utilizando el gráfico del comportamiento elástico de una tubería para determinar la tensión tangencial causada por la presión interna de la tubería.

$$\sigma = 78 \frac{kg}{mm^2} = 110\,709,45 \frac{lbf}{pul^2}$$

Como resultado, mide 0,5in (12.7mm) de grosor y puede soportar una tensión máxima de 78 kg/mm². Sin embargo:

$$\sigma = 111\,709,45 \frac{lbf}{pulg^2} \text{ mayor que, } \sigma_p = 7\,316,4 \frac{lbf}{pulg^2}$$

Según las investigaciones sobre el grosor de la tubería, ésta puede soportar deformaciones de hasta un 32% aproximadamente en la zona elástica sin sufrir esfuerzos que provoquen que la tubería se deforme o deje de funcionar.

El código ASME B31.3 nos proporciona los lineamientos para calcular el espesor mínimo requerido, asegurando que la tubería pueda soportar presiones internas, esfuerzos mecánicos, etc., la fórmula para calcular el espesor mínimo es el siguiente:

$$T_m = T + C$$

$$T = \frac{P \cdot D}{2(S \cdot E \cdot W + P \cdot Y)}$$

$$C = C1 + C2$$

1. Determinar las Condiciones de Diseño:

- Identificar la presión interna máxima (P) y la temperatura de Diseño (T) a las que estará expuesta.

$$P = 111\,709,45 \text{ psi}$$

$$T^\circ = 10^\circ\text{C} = 50^\circ\text{F}$$

2. Seleccionar el Material de la Tubería:

- Elija el material de la Tubería basándose en las propiedades mecánicas y químicas requeridas para las condiciones de servicio.

Material = A53 – Grado "B" (sin costura)

3. Factores Relevantes:

- (E) Factor de calidad del material.
- (S) Resistencia especificada del material. (Tabla A-1, ASME B31.3)
- (W) Factor de Reducción de la soldadura a elevada temperatura.
- (Y) Coeficiente de soldadura.

Tabla 21

Factores de calidad básico para soldadura

(20)

Table A-1B Basic Quality Factors for Longitudinal Weld Joints in Pipes and Tubes, E_j

These quality factors are determined in accordance with para. 302.3.4(a). See also para. 302.3.4(b) and Table 302.3.4 for increased quality factors applicable in special cases. Specifications, except API, are ASTM.

Spec. No.	Class (or Type)	Description	E_j [Note (2)]	Appendix A Notes
Carbon Steel				
API 5L	...	Seamless pipe	1.00	...
		Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
		Electric resistance welded pipe	0.85	...
		Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.95	...
		Continuous welded (furnace butt welded) pipe	0.60	...
A53	Type S	Seamless pipe	1.00	...
	Type E	Electric resistance welded pipe	0.85	...
	Type F	Furnace butt welded pipe	0.60	...
A106	...	Seamless pipe	1.00	...
A134	...	Electric fusion welded pipe, single butt, straight or spiral (helical) seam	0.80	...
A135	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A139	...	Electric fusion welded pipe, straight or spiral (helical) seam	0.80	...
A179	...	Seamless tube	1.00	...
A333	...	Seamless pipe	1.00	...
		Electric resistance welded pipe	0.85	...
A334	...	Seamless tube	1.00	...
A369	...	Seamless pipe	1.00	...
A381	...	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
		Electric fusion welded pipe, spot radiographed	0.90	(19)
		Electric fusion welded pipe, as manufactured	0.85	...
A524	...	Seamless pipe	1.00	...
A587	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A671	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A672	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A691	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
Low and Intermediate Alloy Steel				
A333	...	Seamless pipe	1.00	...
		Electric resistance welded pipe	0.85	(78)
A334	...	Seamless tube	1.00	...
A335	...	Seamless pipe	1.00	...
A369	...	Seamless pipe	1.00	...
A671	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	(78)
A672	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	(78)
A691	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	(78)

Nota: Norma ASTM 31.3

Tabla 22

Resistencia especificada del material “ $S=20000si$ ”

Table A-1 Basic Allowable Stresses in Tension for Metals (Cont'd)												
Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated												
Material	Spec. No.	Type/ Grade	UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size, in.	P-No. (5)	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi		Basic Allowable Stress, S, ksi, at Metal Temperature, °F [Notes (1), (4a)]	
									Tensile	Yield	Min. Temp. to 100	200
Carbon Steel — Pipes and Tubes												
...	A53	B	K03005	...	...	1	(57) (59)	B	60	35	20.0	20.0
...	A106	B	K03006	...	...	1	(57)	B	60	35	20.0	20.0
...	A333	6	K03006	...	...	1	(57)	-50	60	35	20.0	20.0
...	A334	6	K03006	...	...	1	(57)	-50	60	35	20.0	20.0
...	A369	FPB	K03006	...	...	1	(57)	-20	60	35	20.0	20.0
...	A381	Y35	...	...	...	1	...	A	60	35	20.0	20.0
...	API 5L	B	...	...	...	1	(57) (59) (77)	B	60	35	20.0	20.0
...	A139	C	K03004	...	...	1	(8b)	A	60	42	20.0	20.0
...	A139	D	K03010	...	...	1	(8b)	A	60	46	20.0	20.0
...	API 5L	X42	...	...	...	1	(55) (77)	A	60	42	20.0	20.0
...	A381	Y42	...	...	...	1	...	A	60	42	20.0	20.0
...	A381	Y48	...	...	...	1	...	A	62	48	20.7	20.7
...	API 5L	X46	...	...	...	1	(55) (77)	A	63	46	21.0	21.0
...	A381	Y46	...	...	...	1	...	A	63	46	21.0	21.0
...	A381	Y50	...	...	...	1	...	A	64	50	21.3	21.3
A516 Gr. 65	A671	CC65	K02403	...	...	1	(57) (67)	B	65	35	21.7	21.4
A515 Gr. 65	A671	CB65	K02800	...	...	1	(57) (67)	A	65	35	21.7	21.4
A515 Gr. 65	A672	B65	K02800	...	...	1	(57) (67)	A	65	35	21.7	21.4
A516 Gr. 65	A672	C65	K02403	...	...	1	(57) (67)	B	65	35	21.7	21.4
...	A139	E	K03012	...	...	1	(8b)	A	66	52	22.0	22.0
...	API 5L	X52	...	...	...	1	(55) (77)	A	66	52	22.0	22.0
...	A381	Y52	...	...	...	1	...	A	66	52	22.0	22.0
A516 Gr. 70	A671	CC70	K02700	...	...	1	(57) (67)	B	70	38	23.3	23.2
A515 Gr. 70	A671	CB70	K03101	...	...	1	(57) (67)	A	70	38	23.3	23.2
A515 Gr. 70	A672	B70	K03101	...	...	1	(57) (67)	A	70	38	23.3	23.2
A516 Gr. 70	A672	C70	K02700	...	...	1	(57) (67)	B	70	38	23.3	23.2
...	A106	C	K03501	...	...	1	(57)	B	70	40	23.3	23.3
A537 Cl. 1	A671	CD70	K12437	...	≤2½ thk.	1	(67)	D	70	50	23.3	23.3
A537 Cl. 1	A672	D70	K12437	...	≤2½ thk.	1	(67)	D	70	50	23.3	23.3
A537 Cl. 1	A691	CMSH-70	K12437	...	≤2½ thk.	1	(67)	D	70	50	23.3	23.3
...	API 5L	X56	...	...	...	1	(51) (55) (71) (77)	A	71	56	23.7	23.7
...	A381	Y56	...	...	...	1	(51) (55) (71)	A	71	56	23.7	23.7

Nota: Norma ASTM 31.3

Tabla 23

Tabla 302.3.5 Factor de Reducción de soldadura “ $W=I$ ”

Table 302.3.5 Weld Joint Strength Reduction Factor, <i>W</i>															
Steel Group	Component Temperature, <i>T_b</i> , °C (°F)														
	≤427 (≤800)	454 (850)	482 (900)	510 (950)	538 (1,000)	566 (1,050)	593 (1,100)	621 (1,150)	649 (1,200)	677 (1,250)	704 (1,300)	732 (1,350)	760 (1,400)	788 (1,450)	816 (1,500)
Carbon Steel	1	1	1	1	1	1	1	...	...	...	...	...	...	...	...
CrMo [Notes (1)–(3)]	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	...	...	...	...	...	...
CSEF (N + T) [Notes (3)–(5)]	...	...	...	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	...	...	...	...	...	...
CSEF [Notes (3) and (4)] (Subcritical PWHT)	...	...	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	...	...	...	...	...	...
Autogenous welds in austenitic stainless grade 3xx, and N088xx and N066xx nickel alloys [Note (6)]	...	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Austenitic stainless grade 3xx and N088xx nickel alloys [Notes (7) and (8)]	...	...	...	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.5
Other materials [Note (9)]	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Nota: Norma ASTM 31.3

Tabla 24

Tabla 304.1.1 Valores del Coeficiente “ $Y=0.4$ ”

Table 304.1.1 Values of Coefficient Y for $t < D/6$								
Material	Temperature, °C (°F)							
	482 (900) and Below	510 (950)	538 (1,000)	566 (1,050)	593 (1,100)	621 (1,150)	649 (1,200)	677 (1,250) and Above
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
Nickel alloys UNS Nos. N06617, N08800, N08810, and N08825	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Gray iron	0.0	...	...	...	...	...	...	...
Other ductile metals	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

Nota: Norma ASTM 31.3

4. Diámetro Externo:

- El diámetro externo del tubo se puede extraer de las tablas de Tabla 1 de la norma API 574.

Tabla 25

Tabla 1- Diámetro nominal de una tubería $D=406.4\text{mm}$

Table 1-Nominal Pipe Sizes, Schedules, Weight Classes, and Dimensions of Ferritic Steel Pipe (Continued)									
Pipe Size		Actual	Actual	Schedule	Weight Class	Approximate ID in.	Approximate ID mm	Nominal Thickness in	Nominal Thickness mm
NPS	DN	OD in.	OD mm						
16	400	16.000	406.4	10		15.500	393.7	0.250	6.35
				20		15.376	390.56	0.312	7.92
				30		15.250	387.34	0.375	9.53
				40		15.000	381	0.500	12.70
				60	STD	14.688	371.08	0.656	16.66
				80	XS	14.312	363.52	0.844	21.44
				100		13.938	354.02	1.0311	26.19
				120		13.562	344.48	1.219	30.96
				140		13.124	333.34	1.438	36.53
				160		12.812	325.42	1.594	40.49

Nota: Norma API 574

5. Tolerancia de profundidad del hilo o de ranura y por corrosión o erosión:

- C1: Sobre espesor de corrosión = 3mm
- C2: Profundidad de las roscas. = 0mm (tubería soldada)

$$T = \frac{P * D}{2(S * E * W + PY)} + C1 = \frac{469\text{psi} * 406.4\text{mm}}{2 * (20000\text{psi} * 1 * 1 + 469\text{psi} * 0.4)} + 3\text{mm} = 7.72\text{mm}$$

El espesor mínimo calcula por la norma ASME 31.3 es de 7.72mm que sería equivalente a 3/8" esto sería menor que el espesor propuesto inicialmente de 1/2" (12.7mm).

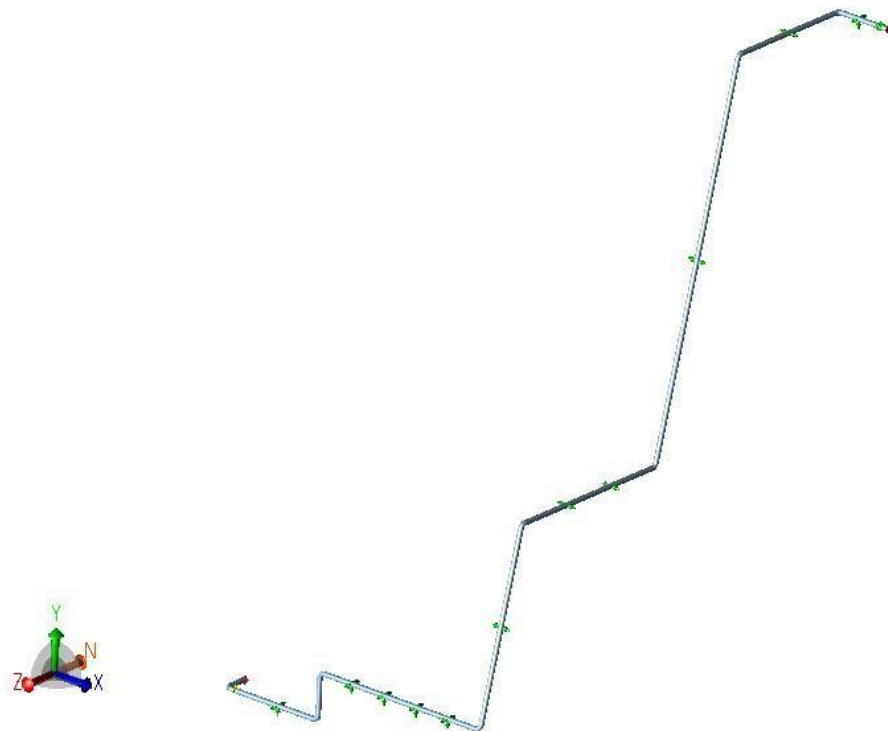
4.8. SIMULACIÓN EN CAESAR II

4.8.1 MODELO ORIGINAL CON SOPORTES DISPUESTOS ARBITRARIAMENTE

Se considera el siguiente trazo de tubería que se muestran a continuación en la Fig. 9. En esta primera etapa se ubican los soportes de tubería basado en una simple inspección del recorrido. Los soportes empleados son apoyos simples y guías en una primera aproximación.

Figura 24

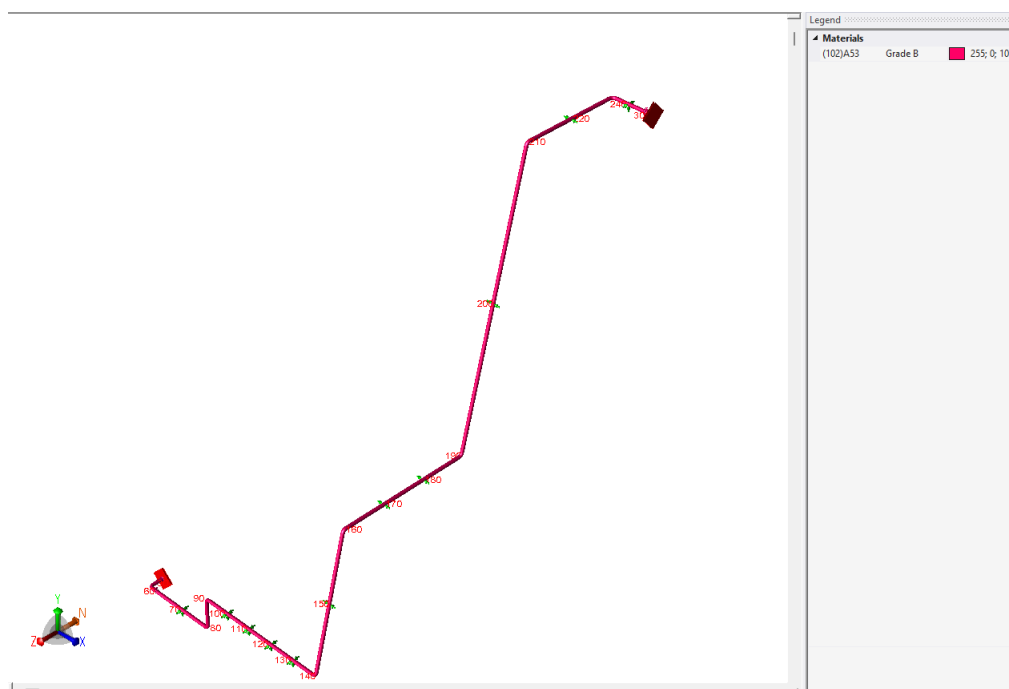
Trazo original de sistema de bombeo



A continuación, se muestran parte de los datos de entrada considerados en el modelo de análisis. Todos los datos de entrada han sido obtenidos de la tabla 5 (Condiciones ambientales y de operación) y tabla 2 (Características de tubería a emplear).

Figura 25

Material de tubería empleada

**Figura 26**

Código de diseño usado en el modelo

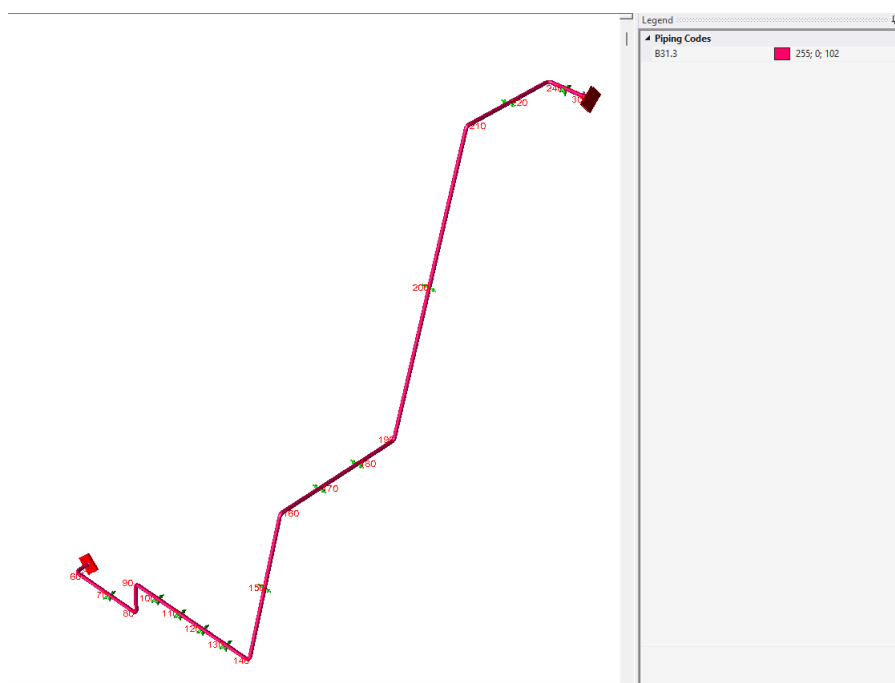


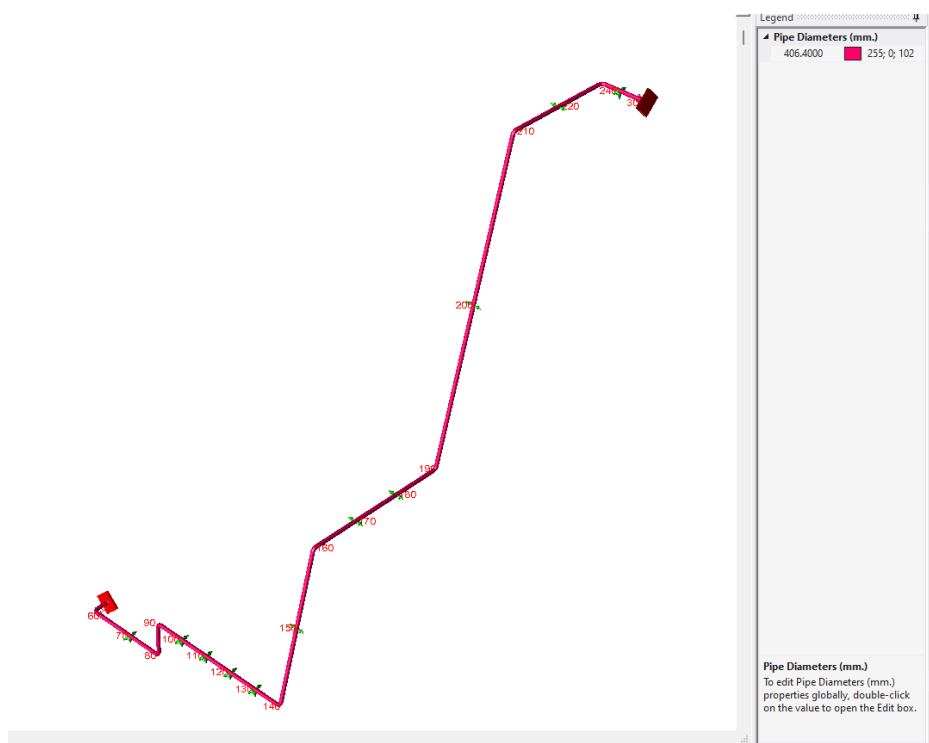
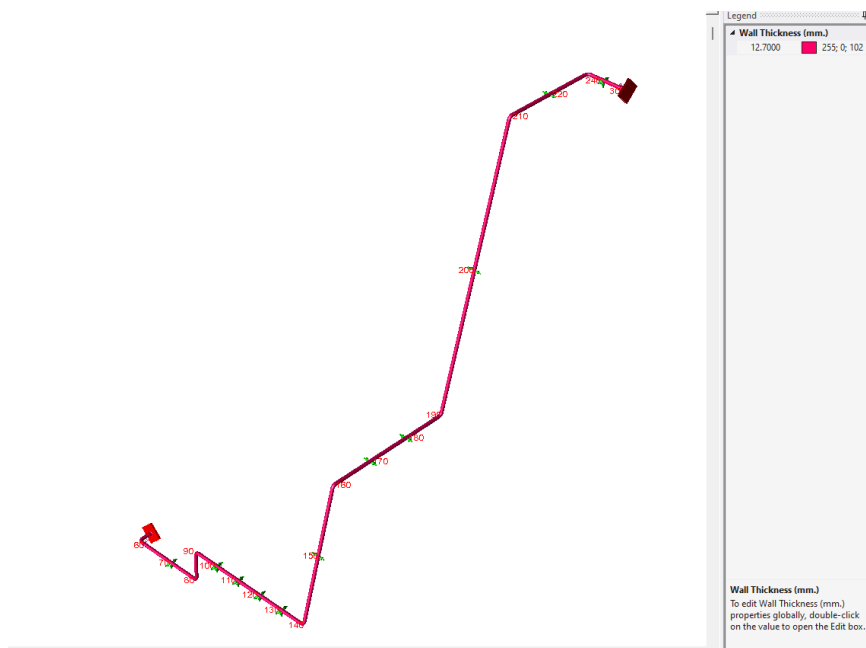
Figura 27*Diámetros empleados en el modelo***Figura 28***Diámetros empleados en el modelo*

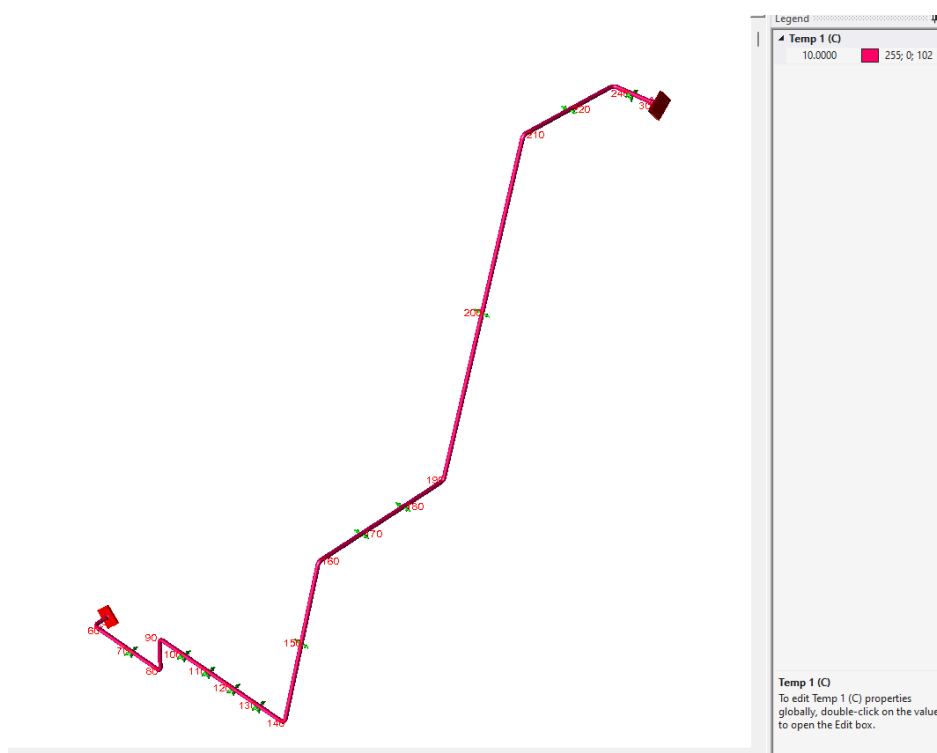
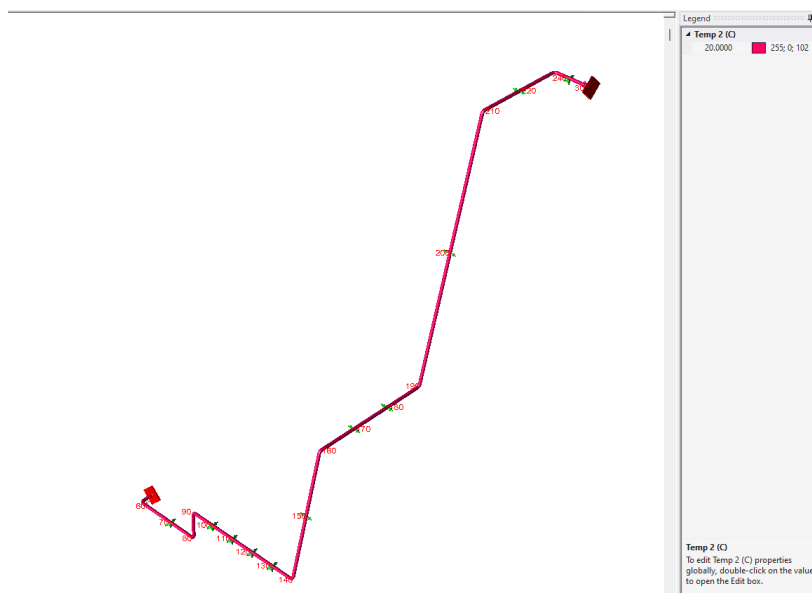
Figura 29*Temperatura de análisis 1 (10 °C).***Figura 30***Temperatura de análisis 1 (20 °C)*

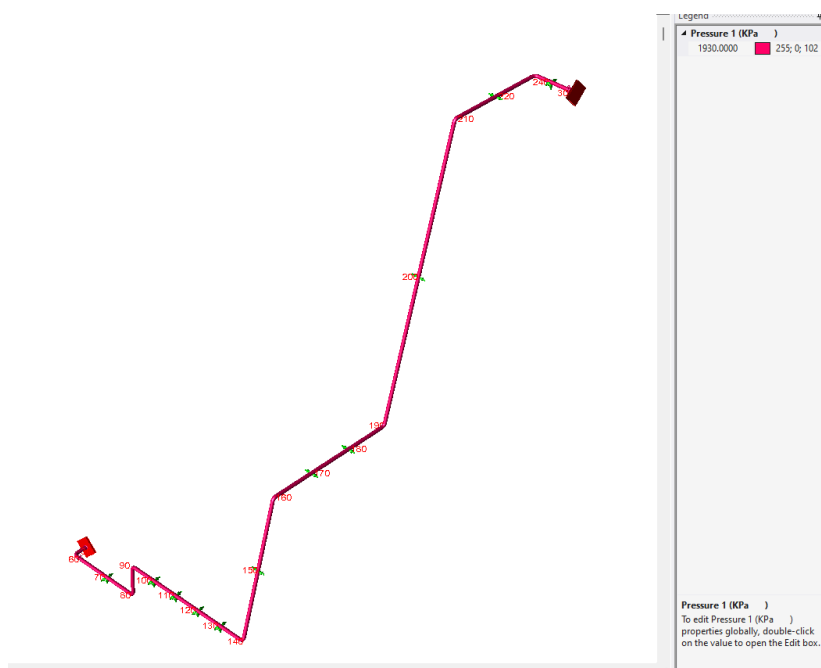
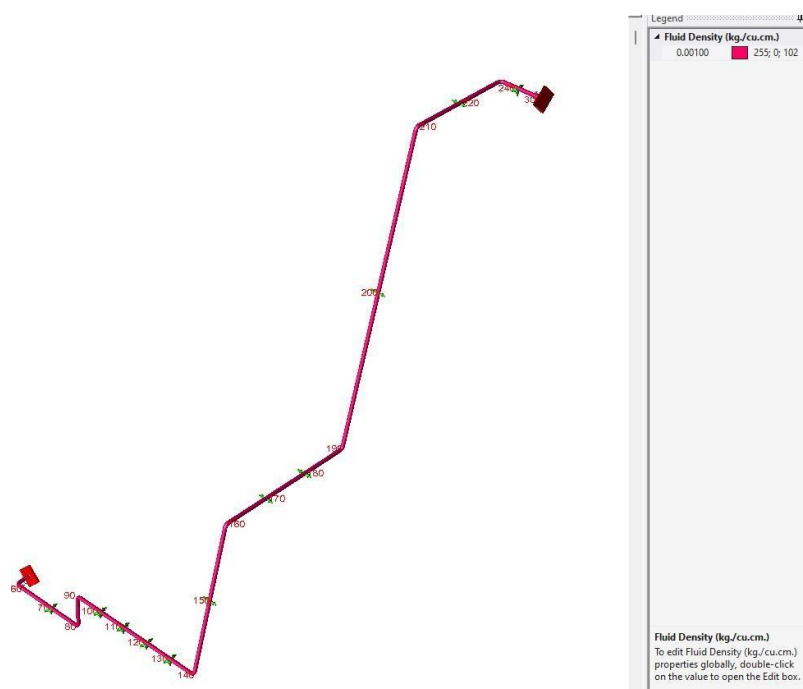
Figura 31*Presión manométrica 280 psig***Figura 32***Densidad del fluido 1000 kg/m³*

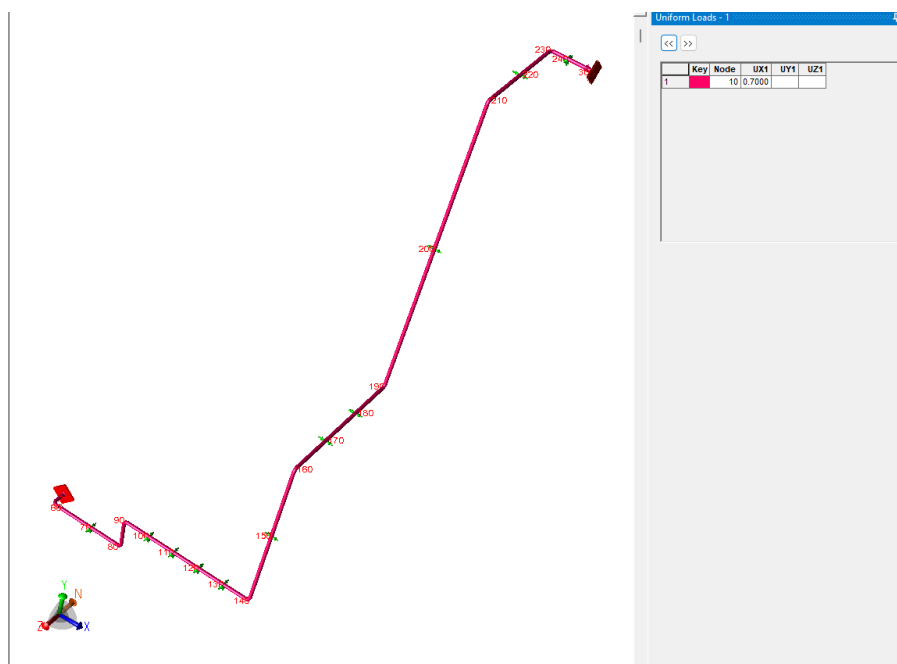
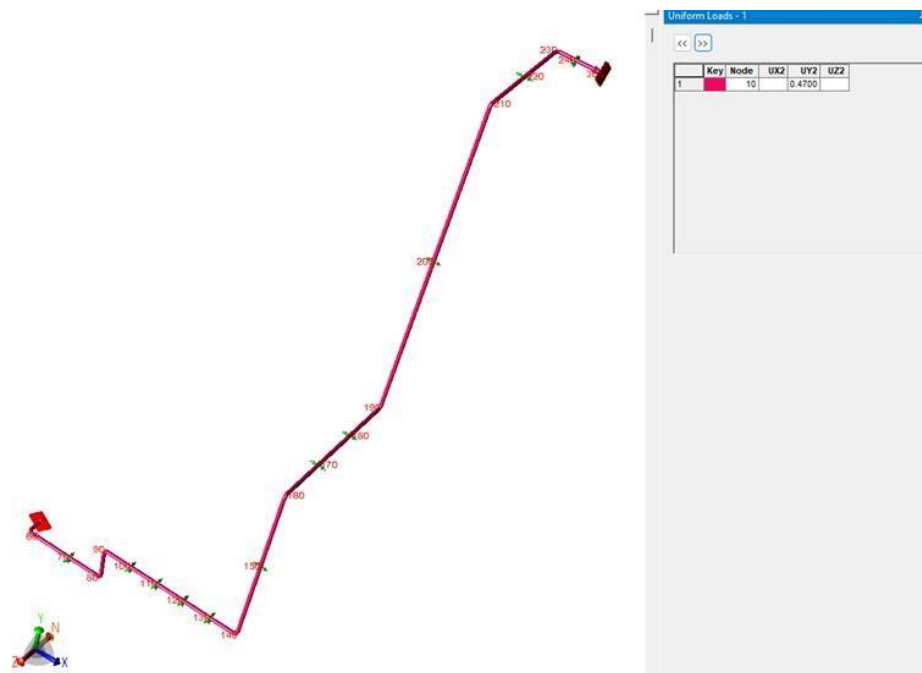
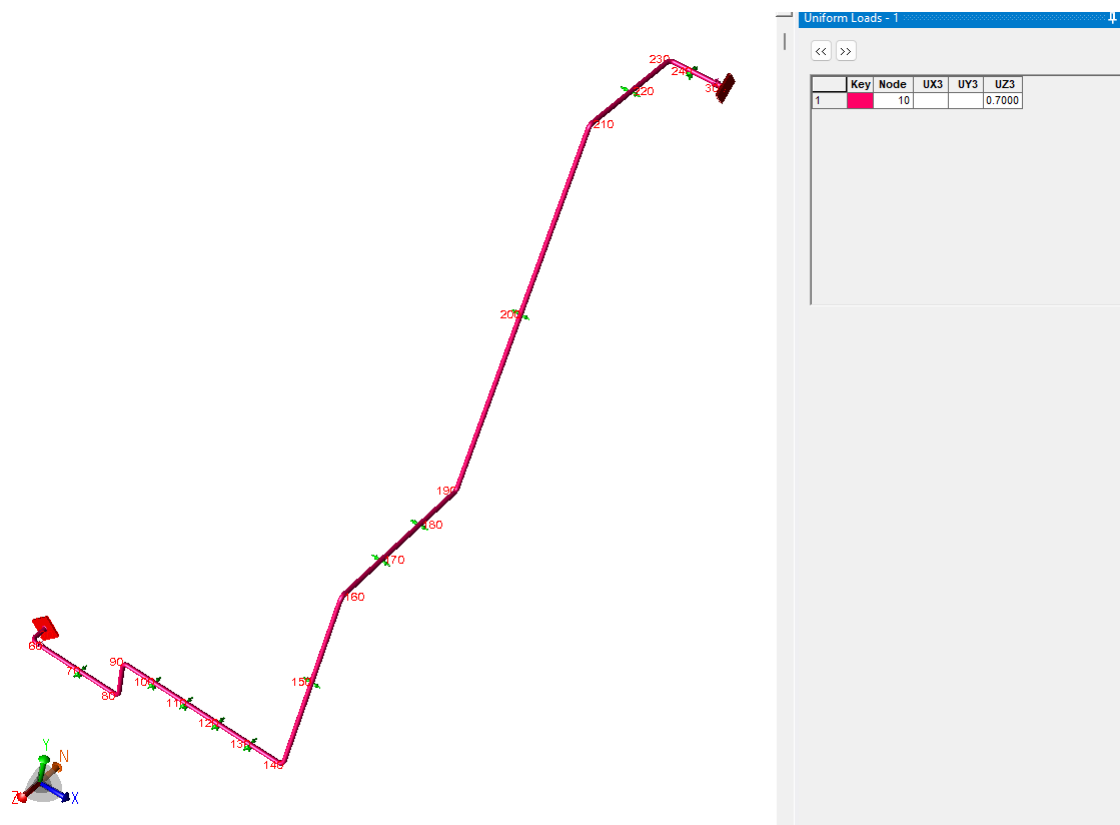
Figura 33*Sismo en "X" 0.7 g***Figura 34***Sismo en "Y" 0.47g (2/3)*

Figura 35

Sismo en “Z” 0.7 g



Las siguiente son las cagas aplicadas al modelo analizado:

Figura 36

Cargas aplicadas al sistema de tuberías del modelo

Loads Defined in Input
W - Weight
T1 - Thermal Case #1
T2 - Thermal Case #2
P1 - Pressure Case #1
HP - Hydro. Pressure
U1 - Unif Load Case #1
U2 - Unif Load Case #2
U3 - Unif Load Case #3
WW - Water Filled Weight
WNC - Weight No Contents

La combinación de cargas se basa en varios escenarios, donde se evalúan la simultaneidad de casos y eventos posibles. Se puede verificar que se están evaluado un total de 32 casos de carga. Con este análisis detallado de todos los escenarios se podrán evidenciar los diferentes tipos fallas y se plantearán las soluciones a nivel de estabilidad de las tuberías y con el cumplimiento de los esfuerzos admisibles según ASME B31.3

Figura 37

Casos de carga analizados

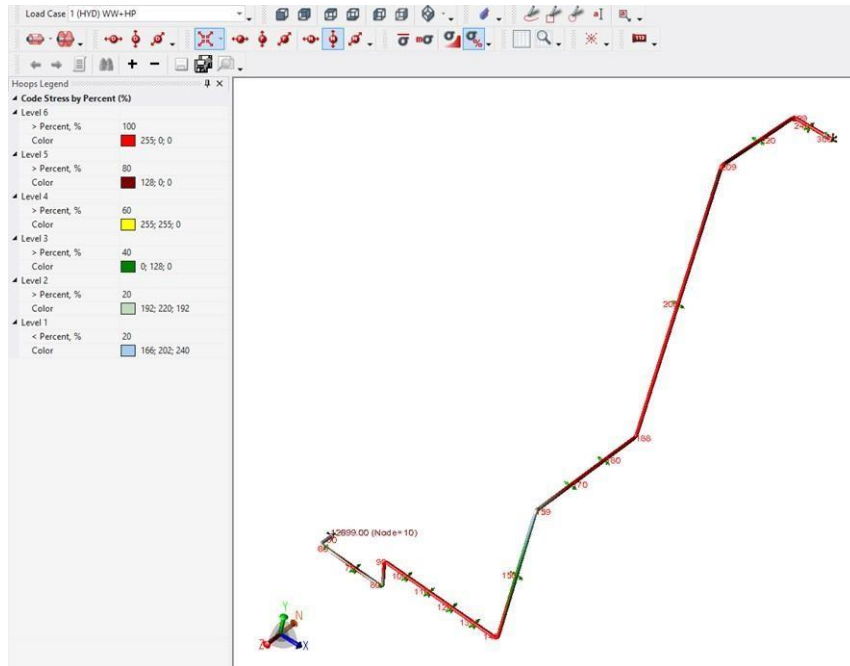
Drag a column header and drop it here to group by that column															
	Exclude	Definition	Name	Stress Type	Alternate SUS/OCC	Load Cycles	Output Status	Output Type	Combination Method	Snubbers Active	Hanger Stiffness	Elastic Modulus	Elbow Stiffening Pressure	Elbow Stiffening Elastic Modulus	SUS/OCC Case Sh
L1	☐	WW+HP	PRUEBA HIDROSTATICA	HTD			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L2	☐	W-T1+P1	W-T1+P1 (OPE1)	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L3	☐	W-T2+P1	W-T2+P1 (OPE2)	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L4	☐	W-T1+P1+U1	W-T1+P1 (OPE1)+SISMO-X	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L5	☐	W-T1+P1+U1	W-T1+P1 (OPE1)+SISMO-X	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L6	☐	W-T1+P1+U2	W-T1+P1 (OPE1)+SISMO-Y	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L7	☐	W-T1+P1+U2	W-T1+P1 (OPE1)+SISMO-Y	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L8	☐	W-T1+P1+U3	W-T1+P1 (OPE1)+SISMO-Z	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L9	☐	W-T1+P1+U3	W-T1+P1 (OPE1)+SISMO-Z	OPE			Keep	Disp/Force		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L10	☐	W-T1+P1+U1+U2	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOX+SISMOY	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L11	☐	W-T1+P1+U1+U2	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOX+SISMOY	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L12	☐	W-T1+P1+U1+U2	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOX+SISMOY	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L13	☐	W-T1+P1+U1+U2	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOX+SISMOY	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L14	☐	W-T1+P1+U2+U3	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOY+SISMOZ	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L15	☐	W-T1+P1+U2+U3	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOY+SISMOZ	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L16	☐	W-T1+P1+U2+U3	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOY+SISMOZ	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L17	☐	W-T1+P1+U2+U3	W-T1+P1 (OPE1)+SISMOY+SISMOZ	OPE			Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	
L18	☐	W+P1	W+P1 (SUS)	SUS	☐		Keep	Disp/Force/Stress		☐	As Designed	EC	PhMax	EC	Sh_Min
L19	☐	L2-L18	EXPANSIÓN TEMPERATURA MAXIMA T1	EXP			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L20	☐	L3-L18	EXPANSIÓN TEMPERATURA MAXIMA T2	EXP			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L21	☐	L4-L2	SISMO NETO-X	OPE			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L22	☐	L5-L2	SISMO NETO-X	OPE			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L23	☐	L6-L2	SISMO NETO-Y	OPE			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L24	☐	L7-L2	SISMO NETO-Y	OPE			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L25	☐	L8-L2	SISMO NETO-Z	OPE			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L26	☐	L9-L2	SISMO NETO-Z	OPE			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	
L27	☐	L21-L18	SISMO NETO-X + SUS	OCC			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	Sh_Min
L28	☐	L22-L18	SISMO NETO-X + SUS	OCC			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	Sh_Min
L29	☐	L23-L18	SISMO NETO-Y + SUS	OCC			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	Sh_Min
L30	☐	L24-L18	SISMO NETO-Y + SUS	OCC			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	Sh_Min
L31	☐	L25-L18	SISMO NETO-Z + SUS	OCC			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	Sh_Min
L32	☐	L26-L18	SISMO NETO-Z + SUS	OCC			Keep	Disp/Force/Stress	Algebraic				PhMax	EC	Sh_Min

Realizada la evaluación, se evidencia fallas en los siguientes escenarios de carga:

- Escenario de prueba hidrostática (Caso No.1)
- Escenario con carga de sostenimiento (Caso No.18)
- Cargas ocasionales (Caso No.27 a No.32)

Figura 38

Casos No.1 Prueba Hidrostática (% esfuerzo máximo).

**Figura 39**

Casos No.18 Sostenimiento (% esfuerzo máximo).

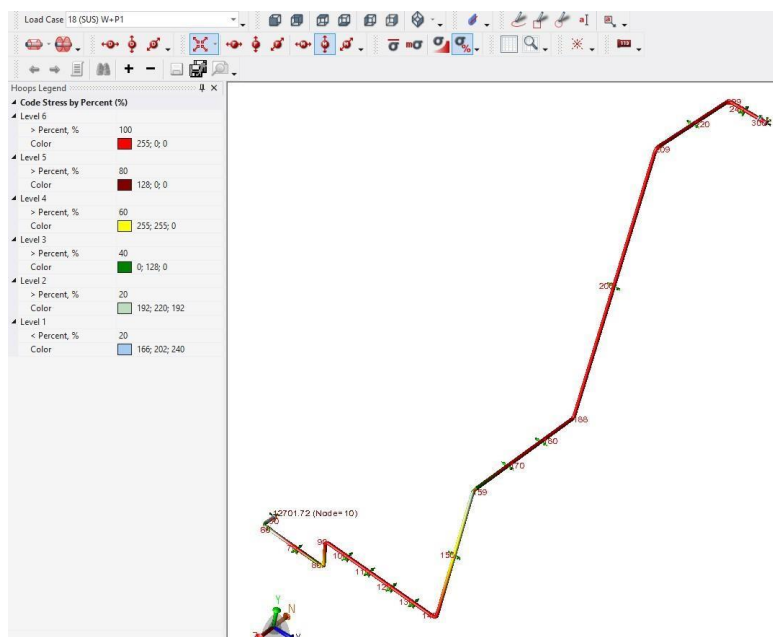
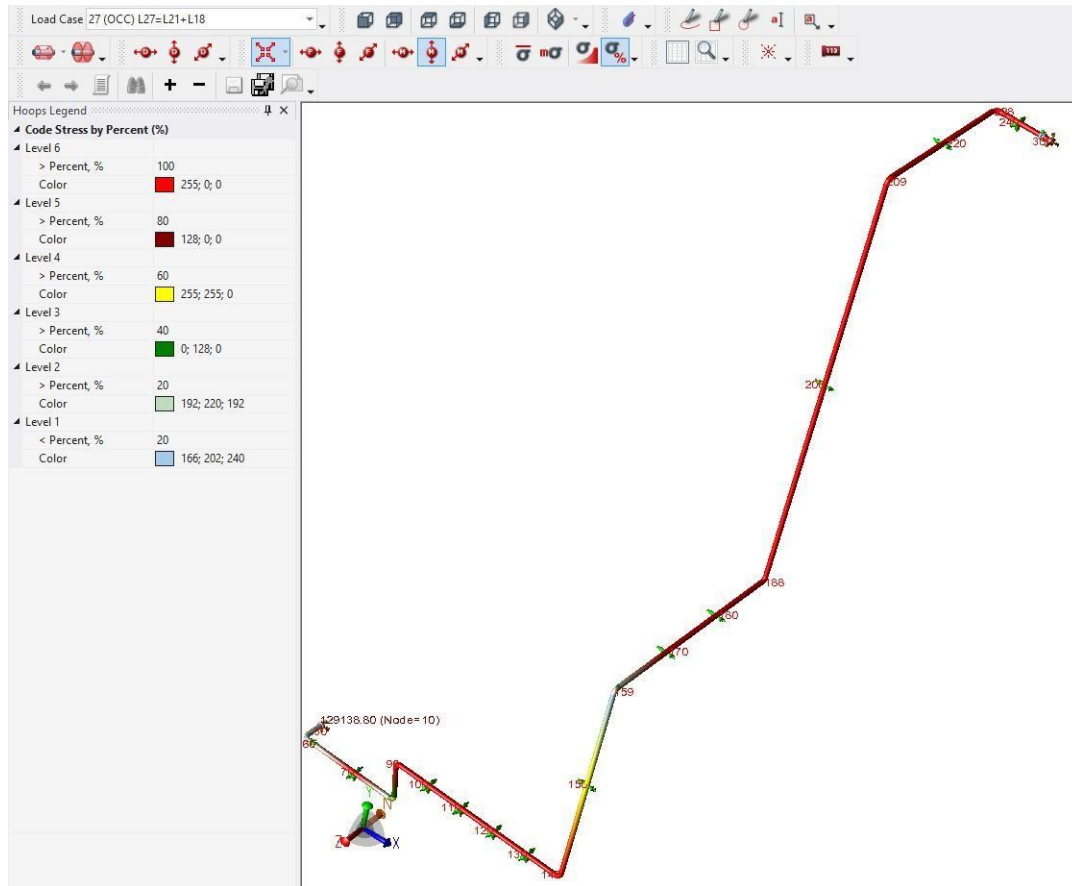


Figura 40

Casos No.27 Cargas Ocasionales (% esfuerzo máximo)



4.8.2. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS CON EL PROGRAMA

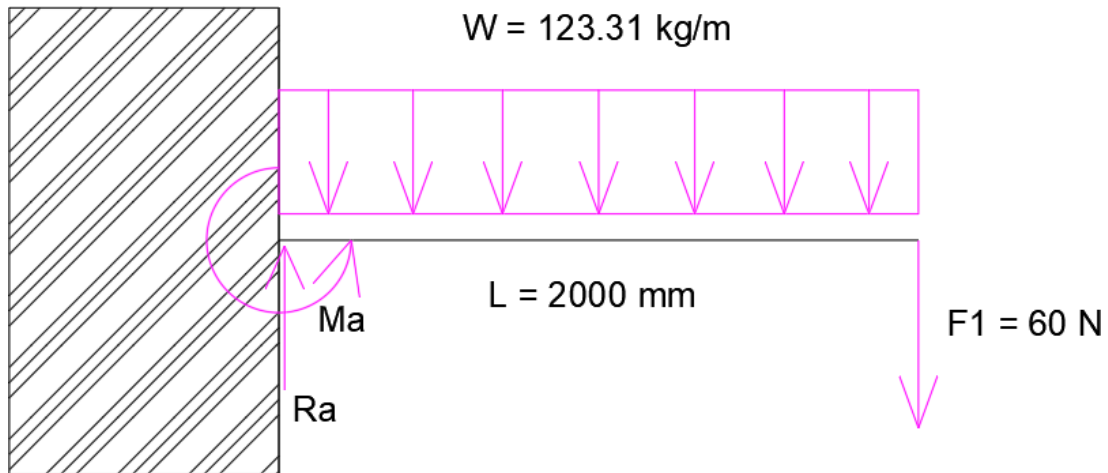
Los cálculos de deformaciones y esfuerzos en tuberías serán realizados por el programa CAESAR II de la empresa HEXAGON. Este programa permite evaluar desplazamientos y deformaciones de un sistema de tuberías. El modelo de análisis es un modelo estructural, también llamado modelo de líneas. Este uso permite una interpretación similar a los modelos analíticos tradicionales. El diseño de flexibilidad será abordado bajo normativa ASME B31.3.

Para realizar la verificación consideraremos una tubería de empotrada sin fluido como se muestra en la figura siguiente. Al extremo de la tubería se aplica una fuerza vertical. El

empotramiento de un extremo de la tubería constituye un tipo de soporte estructural similar a un dado de concreto.

Figura 41

Diagrama de cuerpo libre de una tubería vacía cargada



$$\sum F_y = 0$$

$$R_a = 60 + 123.31 \times 9.81 \times 21$$

$$R_a = 2479.34 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$M_A = 60 \times 2 + 123.31 \times 9.81 \times 2$$

$$M_A = 2539.34 \text{ N}$$

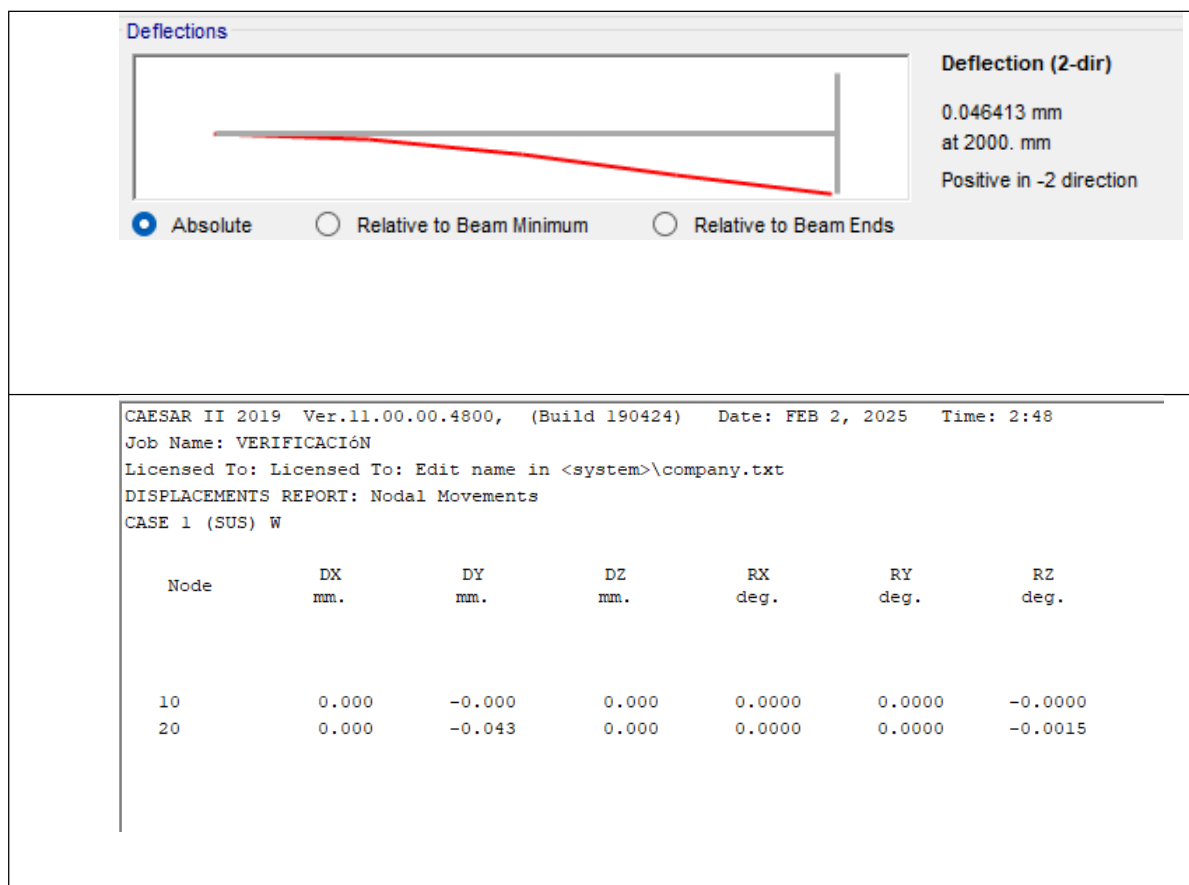
La siguiente imagen muestra los valores obtenidos a través del programa CAESAR II.

Para las reacciones, así como para los desplazamientos.

La siguiente imagen muestra el resultado del desplazamiento analizado en el programa CAESAR II.

Figura 43

Valores de desplazamiento



Realizado la comparación entre los valores de la reacción, momento y desplazamiento. Los valores se encuentran indicados en la siguiente tabla.

Tabla 26

Variación verificada

Ítem	Descripción	Método analítico	CAESAR II	Variación
1	Reacción “A”	2479 N	2413 N	2.70%
2	Momento “A”	2539 N-m	2413 N-m	4.96%
3	Desplazamiento en extremo	0.046 mm	0.043 mm	6.5 %

Con una variación menor del 10% se concluye que los valores obtenidos por el programa pueden ser empleados como válidos a efecto de realizar los ensayos numéricos

4.8.3. IDEALIZACIONES DEL MODELO

Los métodos de construcción para soportar un sistema de tuberías están basados en las diferentes condiciones de borde que definen ciertas características particulares del tipo de soportes. En la siguiente sección, se presentarán las condiciones de borde como idealización para el diseño de cada tipo de soportes y algunas consideraciones iniciales.

A continuación, las siguiente son las asunciones realizadas en el modelo anteriormente presentado.

1. Los cuerpos adosados a la brida de la tubería en estudio, tendrán un comportamiento rígido. Esto quiere decir que ambas bridas estarán conectadas a elementos rígidos.

2. La conexión de tubería bridada y soldada tendrán el mismo comportamiento. Esto quiere decir que ambas uniones de tubería tendrán un comportamiento rígido y los métodos de construcción serán soldar las bridas Slip-on en la tubería o soldar extremos de tubería biselada para garantizar la rigidez.
3. No se trabajarán con conexiones flexibles o semirrígidas. Esto quiere decir que el modelo no considera juntas de expansión o juntas Victaulic.
4. Se considerarán las siguientes cuatro (04) condiciones de contorno para el estudio del sistema de tuberías. No existen criterios bien establecidos para determinar sin dificultad, si un sistema requiere o no análisis de esfuerzos formal. La dificultad estriba en acertar si dicho sistema puede ser ruteado en campo, o si requiere una solución analítica completa.

Figura 44

Condición de borde en extremo de tubería

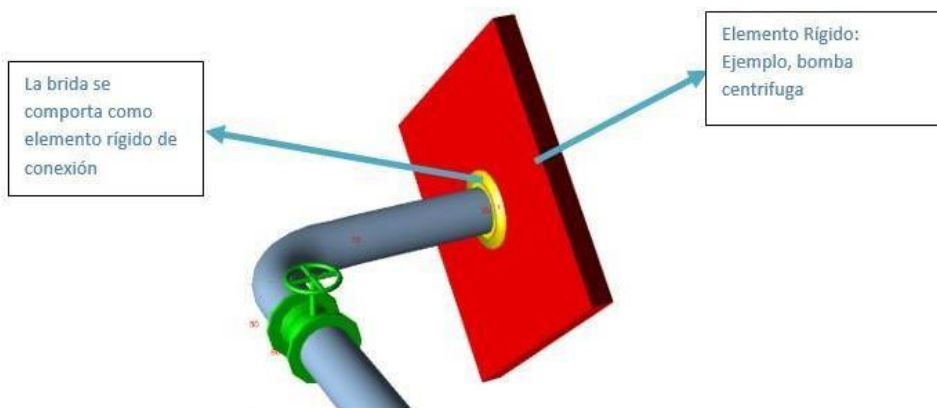
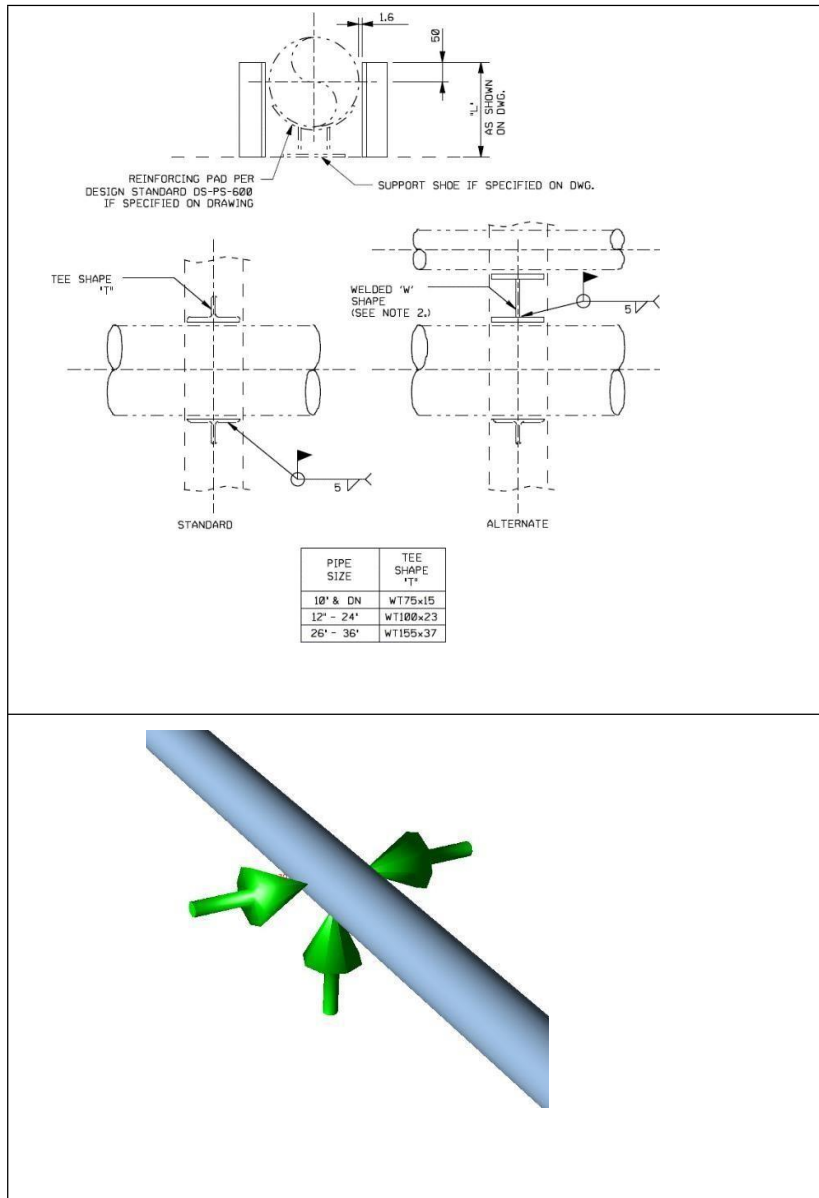
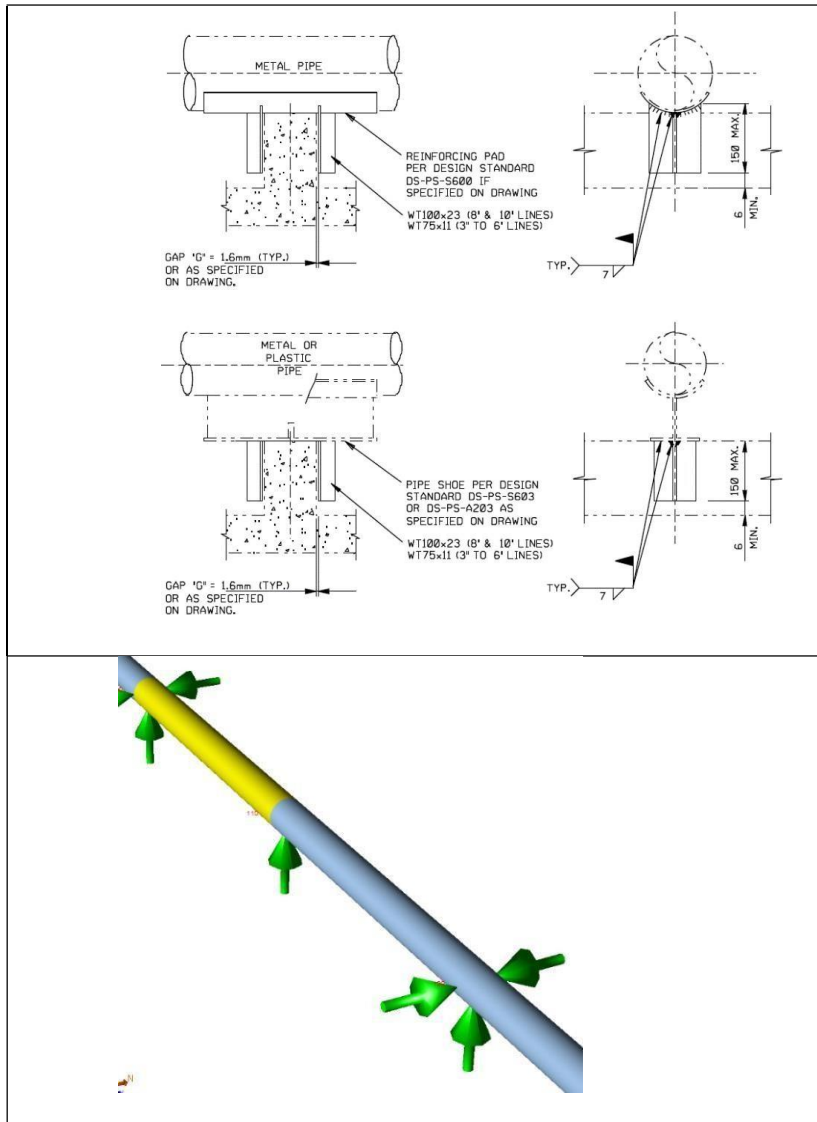


Figura 45

Condición de contorno 1: Soporte tipo guía tubería.



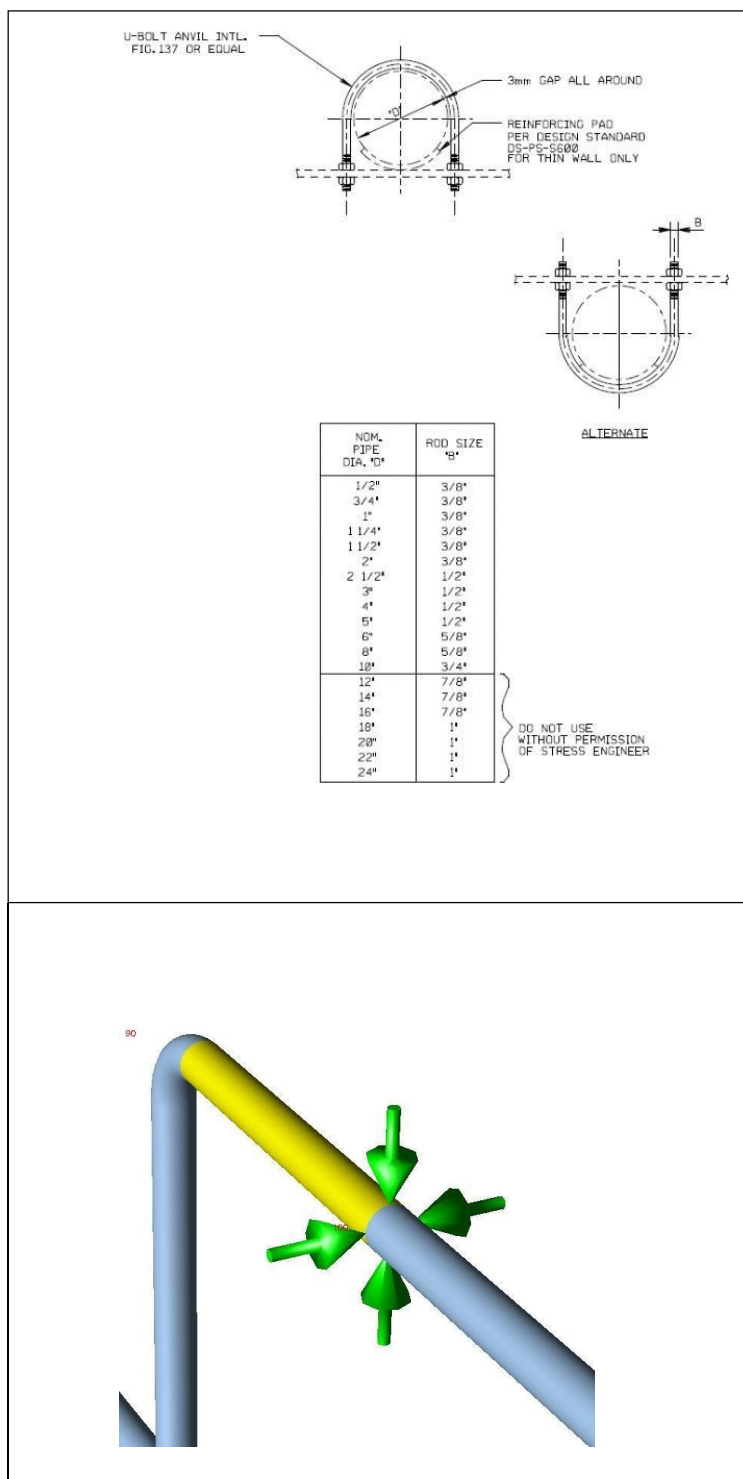
Nota: Fluor Design Standard pipe support

Figura 46*Condición de contorno 2: Apoyo tipo silleta*

Nota: Fluor Design Standard pipe support

Figura 47

Condición de contorno 3: Abrazadera o U-bolt. Fuente: Fluor Design Standard pipe support



Nota: Fluor Design Standard pipe support

4.8.4. RESULTADOS DEL MODELO MODIFICADO

Lo primero que se debe revisar son las condiciones donde los esfuerzos y desplazamientos analizados en cada caso de carga superan o exceden lo aceptable bajo la normativa ASME B31.3. En ese sentido se evidencia que los casos de carga No.1, No.18, No.27 @ 32 corresponden a casos donde se deben corregir las condiciones de flexibilidad y analizar las condiciones de la soportaría originalmente diseñada. Se evidencia que los casos de carga No.27 @ 32 corresponden a eventos sísmicos.

Figura 49

Casos de carga Analizados a ser evaluados

Load Cases Analyzed	
1 (HYD)	WW+HP
2 (OPE)	W+T1+P1
3 (OPE)	W+T2+P1
4 (OPE)	W+T1+P1+U1
5 (OPE)	W+T1+P1-U1
6 (OPE)	W+T1+P1+U2
7 (OPE)	W+T1+P1-U2
8 (OPE)	W+T1+P1+U3
9 (OPE)	W+T1+P1-U3
10 (OPE)	W+T1+P1+U1+U2
11 (OPE)	W+T1+P1+U1-U2
12 (OPE)	W+T1+P1-U1+U2
13 (OPE)	W+T1+P1-U1-U2
14 (OPE)	W+T1+P1+U2+U3
15 (OPE)	W+T1+P1+U2-U3
16 (OPE)	W+T1+P1-U2+U3
17 (OPE)	W+T1+P1-U2-U3
18 (SUS)	W+P1
19 (EXP)	L19=L2-L18
20 (EXP)	L20=L3-L18
21 (OPE)	L21=L4-L2
22 (OPE)	L22=L5-L2
23 (OPE)	L23=L6-L2
24 (OPE)	L24=L7-L2
25 (OPE)	L25=L8-L2
26 (OPE)	L26=L9-L2
27 (OCC)	L27=L21+L18
28 (OCC)	L28=L22+L18
29 (OCC)	L29=L23+L18
30 (OCC)	L30=L24+L18
31 (OCC)	L31=L25+L18
32 (OCC)	L32=L26+L18

La siguiente tabla muestra los valores originales de las reacciones en cada anclaje propuesto. Todos los anclajes serán verificados y posiblemente modificados en base a los resultados. Los anclajes tienen la ubicación descrita en los nodos de la siguiente tabla.

Tabla 27

Valores originales de las reacciones en cada anclaje propuesto

Nodo	FX N.	FY N.	FZ N.	MX N.m.	MY N.m.	MZ N.m.	Tipo de soporte
10	-15035	-16236	-57067	-32162	12699	-20838	TYPE=Rigid ANC;
70	0	0	119073	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
70	0	-33151	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
100	0	0	-136096	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
100	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
110	0	0	91807	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
110	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
120	0	0	-18645	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
120	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
130	0	0	187	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
130	0	-145988	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
150	16844	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;

Nodo	FX N.	FY N.	FZ N.	MX N.m.	MY N.m.	MZ N.m.	Tipo de soporte
170	242	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
180	-3259	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
200	6461	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
220	-12593	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
240	0	0	3817	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
240	0	-223353	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
300	7339	83176	-3077	1280497	-4135	117737	TYPE=Rigid ANC;

Se realizó la evaluación de las características de los diferentes tipos de soporte, realizando varias modificaciones basadas en los ratios de diseño. Finalmente se levantó todos los errores y fallos del modelo obteniéndose un ratio máximo de 84.3% en el nodo 150 en el caso de carga No. 27.

Figura 50

Resultados del modelo modificado, analizado en el nodo 150

```

Highest Stresses: (KPa      ) LOADCASE 27 (OCC) L27=L21+L18
Ratio (%):              84.3      @Node    150
Code Stress:            154668.9    Allowable Stress:    183396.4
Axial Stress:            17402.1    @Node     40
Bending Stress:          141724.1    @Node    150
Torsion Stress:           14466.8    @Node    160
Hoop Stress:              28950.0    @Node     30
Max Stress Intensity:    158079.3    @Node    150

```

Tabla 28*Reacciones en cada soporte de tubería luego de las modificaciones*

Node	FX N.	FY N.	FZ N.	MX N.m.	MY N.m.	MZ N.m.	Tipo de soporte
10	3439	-3937	-8124	46263	18976	15417	TYPE=Rigid ANC;
70	0	0	55563	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
70	0	-15588	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
100	0	-20548	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
110	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
120	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
130	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
150	-3439	-46798	66406	-40270	26528	-15719	TYPE=Rigid ANC;
170	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
180	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
195	160	-28518	64682	-17851	-803	-931	TYPE=Rigid ANC;
205	-432	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
205	0	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
220	4180	0	0	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;
220	0	-23323	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
240	0	0	86263	0	0	0	TYPE=Rigid GUI;

Node	FX N.	FY N.	FZ N.	MX N.m.	MY N.m.	MZ N.m.	Tipo de soporte
240	0	-8330	0	0	0	0	TYPE=Rigid +Y;
300	-3907	-2319	-29854	-1036	-44287	-33	TYPE=Rigid ANC;

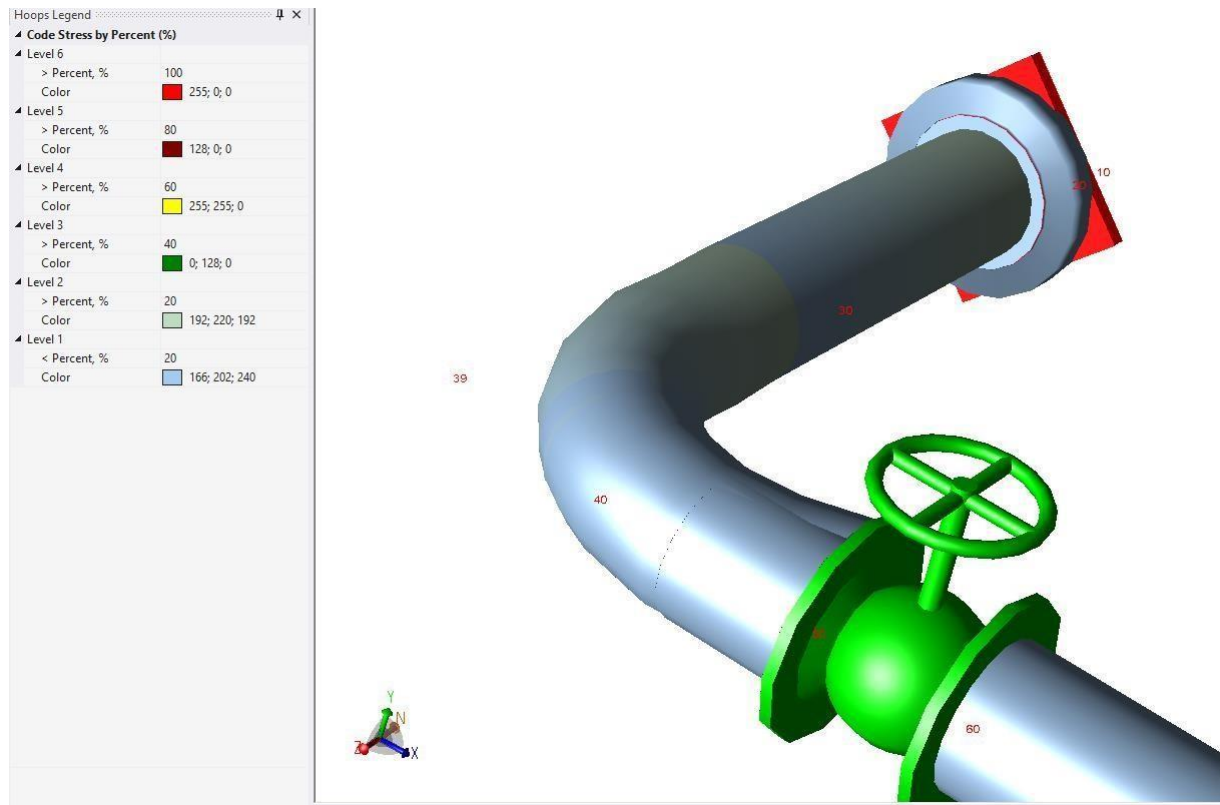
4.8.5. DESCRIPCIÓN DE LOS ESFUERZOS OBTENIDOS A LO LARGO DE LA TUBERÍA

En esta sección se explica y se describen las modificaciones realizadas en los soportes de tubería y el comportamiento de todos los nodos del sistema. A efectos de conocer la condición más crítica, se describe el escenario de análisis de carga No. 27 que corresponde al comportamiento del sistema ante un evento sísmico. Los esfuerzos se expresarán en ratios que corresponden a porcentajes de la intensidad de esfuerzo aceptable por la normativa ASME B31.3. Si el valor del ratio supera el 100%, la tubería se pintará de rojo y significará una falla. Si el esfuerzo es próximo a 0%, significa que el esfuerzo es muy bajo y es una condición aceptable. Dentro de estos rangos, cada color significará un porcentaje dentro de estos límites.

La figura 50 muestra los esfuerzos de tubería desde el nodo No.10 hasta el nodo No.60. En la figura se puede verificar que el sistema está en voladizo sin ningún tipo de soportes con esfuerzos bajos y aceptable según normativa. Eso se explica principalmente por la condición de empotramiento del nodo No.10. y la configuración rígida de la válvula.

Figura 51

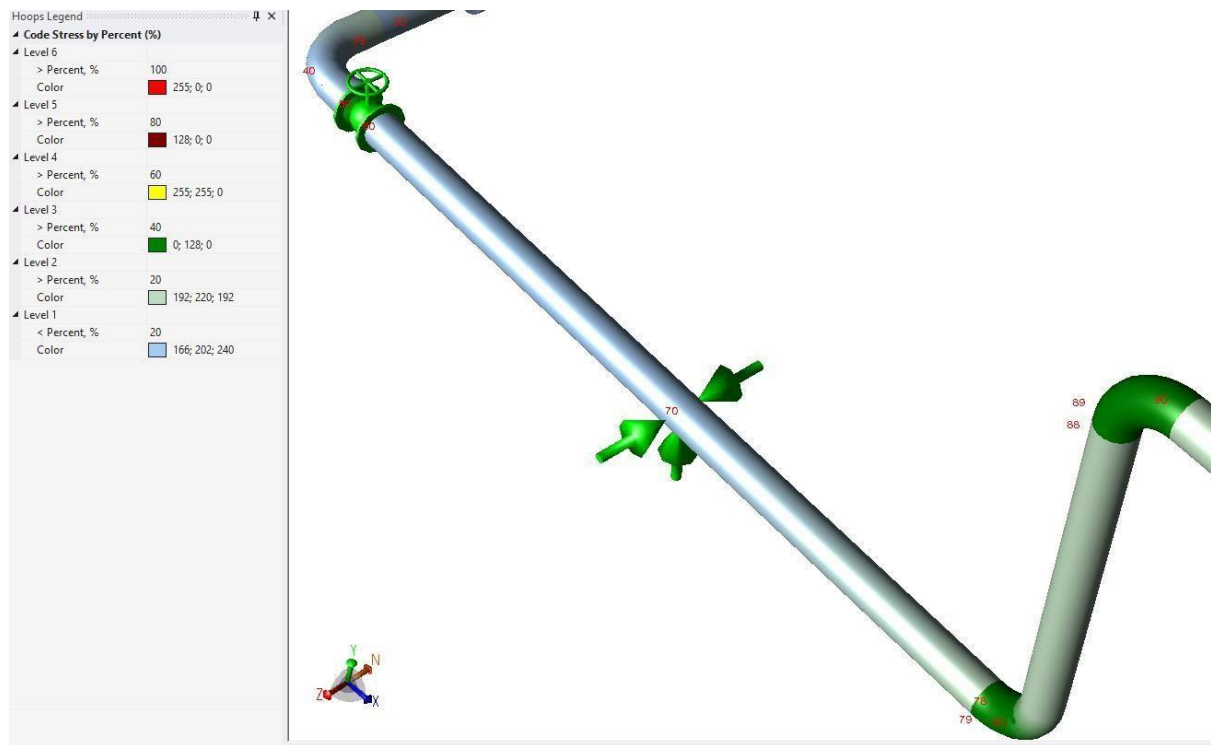
Resultados de esfuerzo: Nodo No10@60



La figura 51 muestra los esfuerzos de tubería desde el nodo No. 60 hasta el nodo No. 90. Se verifica que no se han realizado ninguna modificación del modelo original en cuanto a cantidad y tipo de soporte. Se confirma que los mayores esfuerzos están en los codos de cada sistema con una ratio entre 40% y 60%. Puede ser tentador anclar mediante un dado de concreto los dos (02) codos, sin embargo, hacerlo generaría un sobrecoste. El resto de la tubería tiene una ratio menor del 20%.

Figura 52

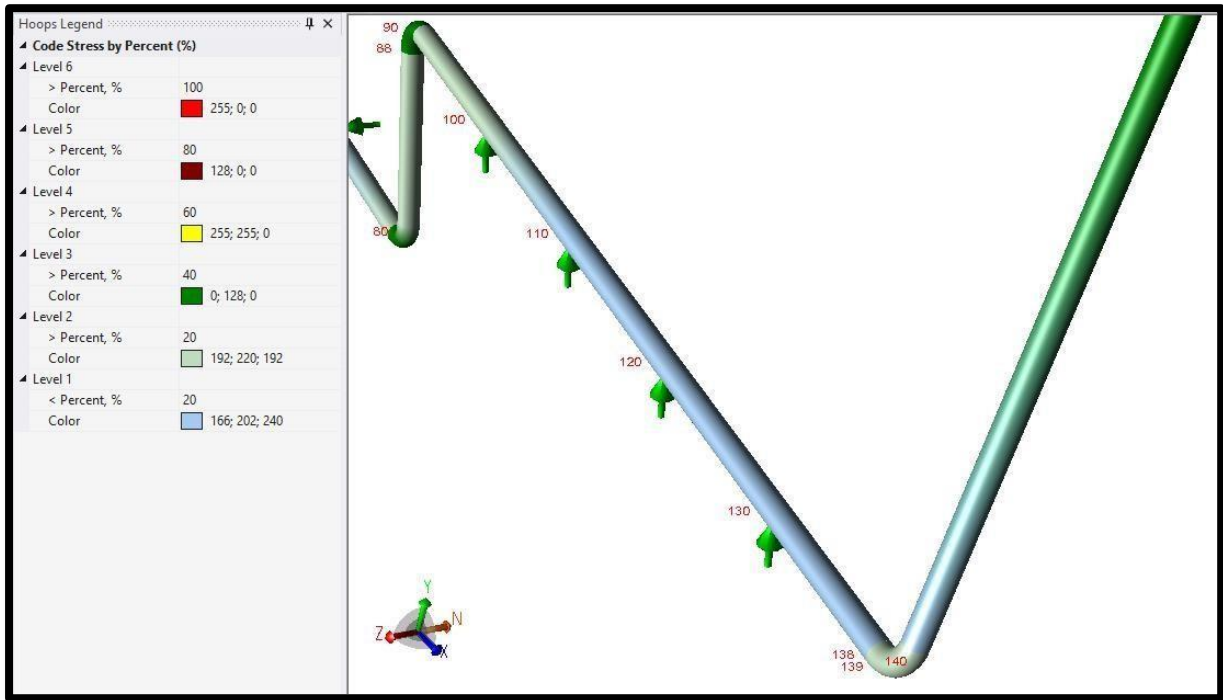
Resultados de esfuerzo: Nodo No60@90



En la figura 52 se muestran los esfuerzos de tubería desde el nodo No. 90 hasta el nodo No. 140. Los soportes ubicados en los nodos No.100, 110, 120 y 130 se modificaron para efectos de optimización de costos. Pasando de soportes tipo guía (condición de contorno No.1) a apoyos tipo silleta (Condición de contorno No.2). En el segmento descrito los esfuerzos son relativamente bajos con ratios menores al 20%.

Figura 53

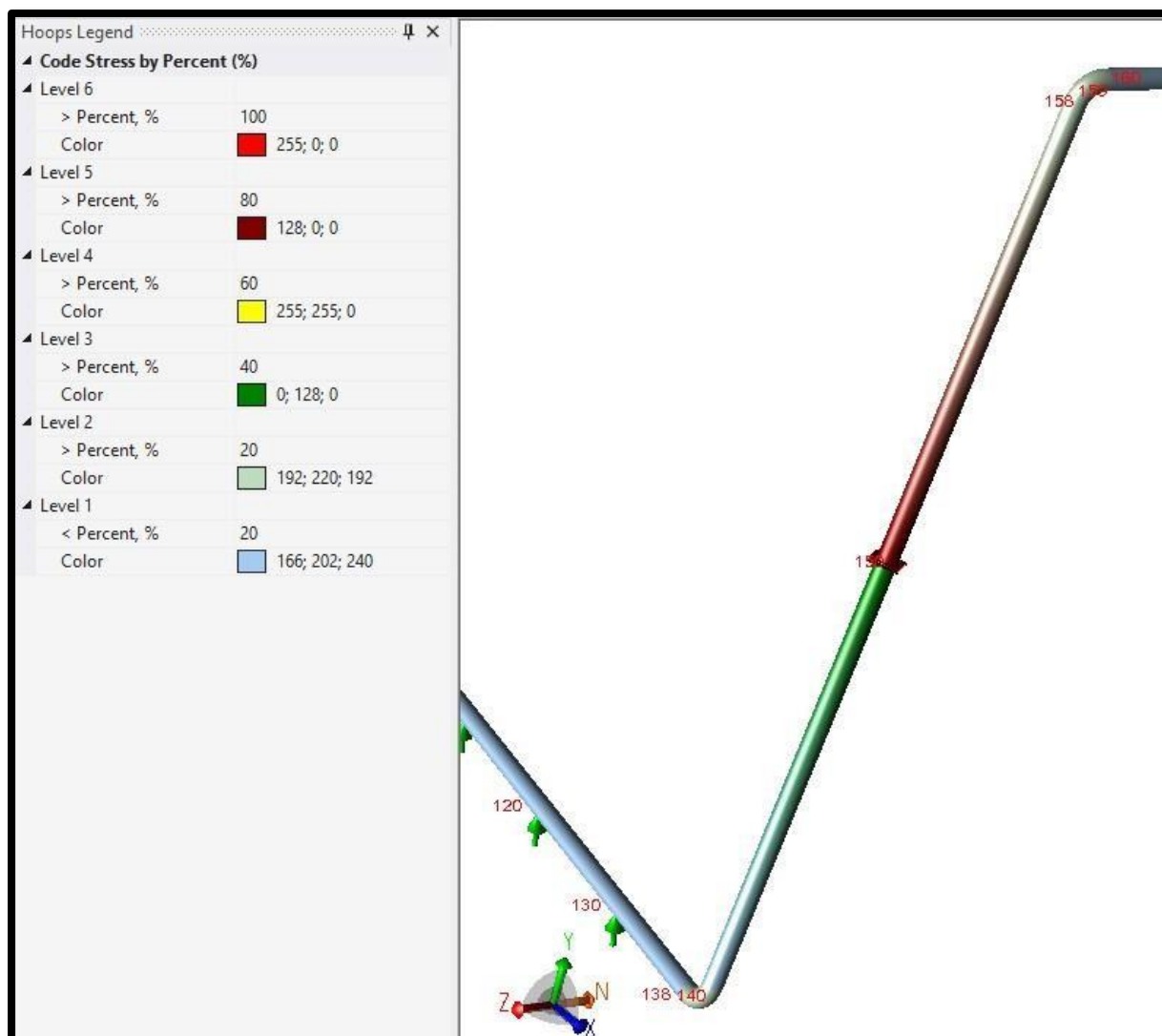
Resultados de esfuerzo: Nodo No90@140



En la figura 53 se muestran los esfuerzos de tubería desde el nodo No.140 hasta el nodo No. 160. El soporte ubicado en el nodo No.150 tuvo que ser modificado a un anclaje (condición de contorno No. 4). La condición inicial era un soporte tipo guía (condición de contorno No.1). Debido a este primer anclaje, los esfuerzos son altos en las inmediaciones del soporte. Las ratios son superiores al 80% llegando hasta 84.3% en el nodo No.150, siendo esta la condición más crítica del esfuerzo en la tubería. Aguas arriba y próximo a los nodos No.158 los valores vuelven a ser bajos reduciéndose a valores menores del 20%.

Figura 54

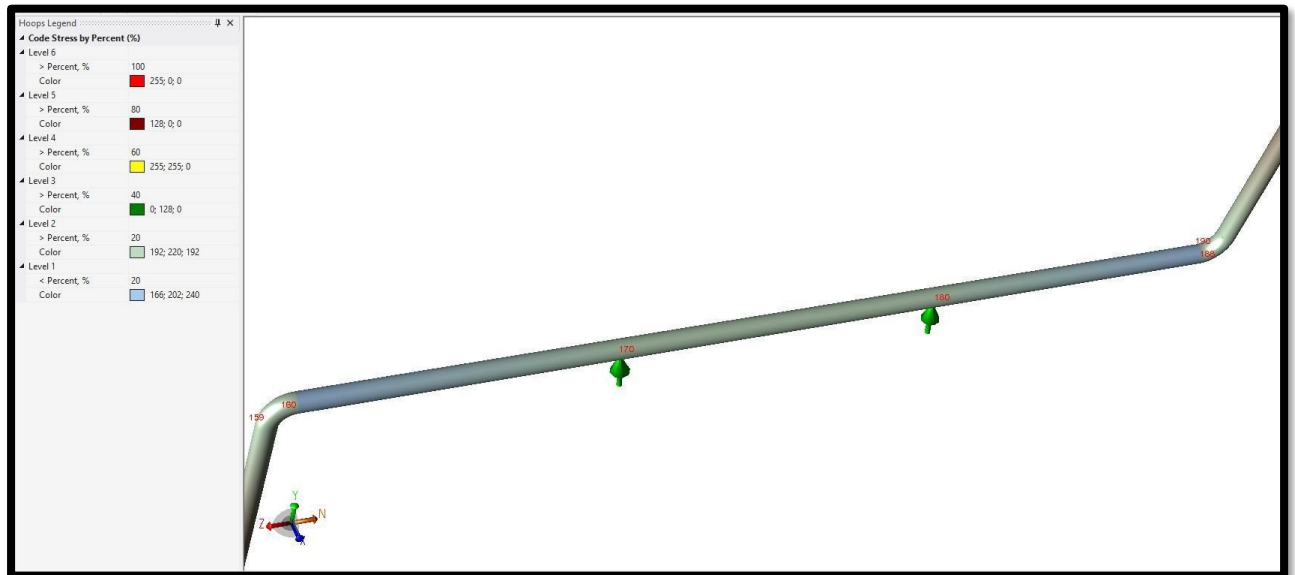
Resultados de esfuerzo: Nodo No.140@160



En la figura 54 se muestran los esfuerzos de tubería desde el nodo No.160 hasta el nodo No. 190. Los soportes ubicados en los nodos No.170 y No.180 fueron modificados de un diseño tipo guía (condición de contorno No.1) a un soporte simplemente apoyado (condición de contorno No.2). Los esfuerzos de tubería mantienen ratios entre 20% y 40%, relativamente bajos.

Figura 55

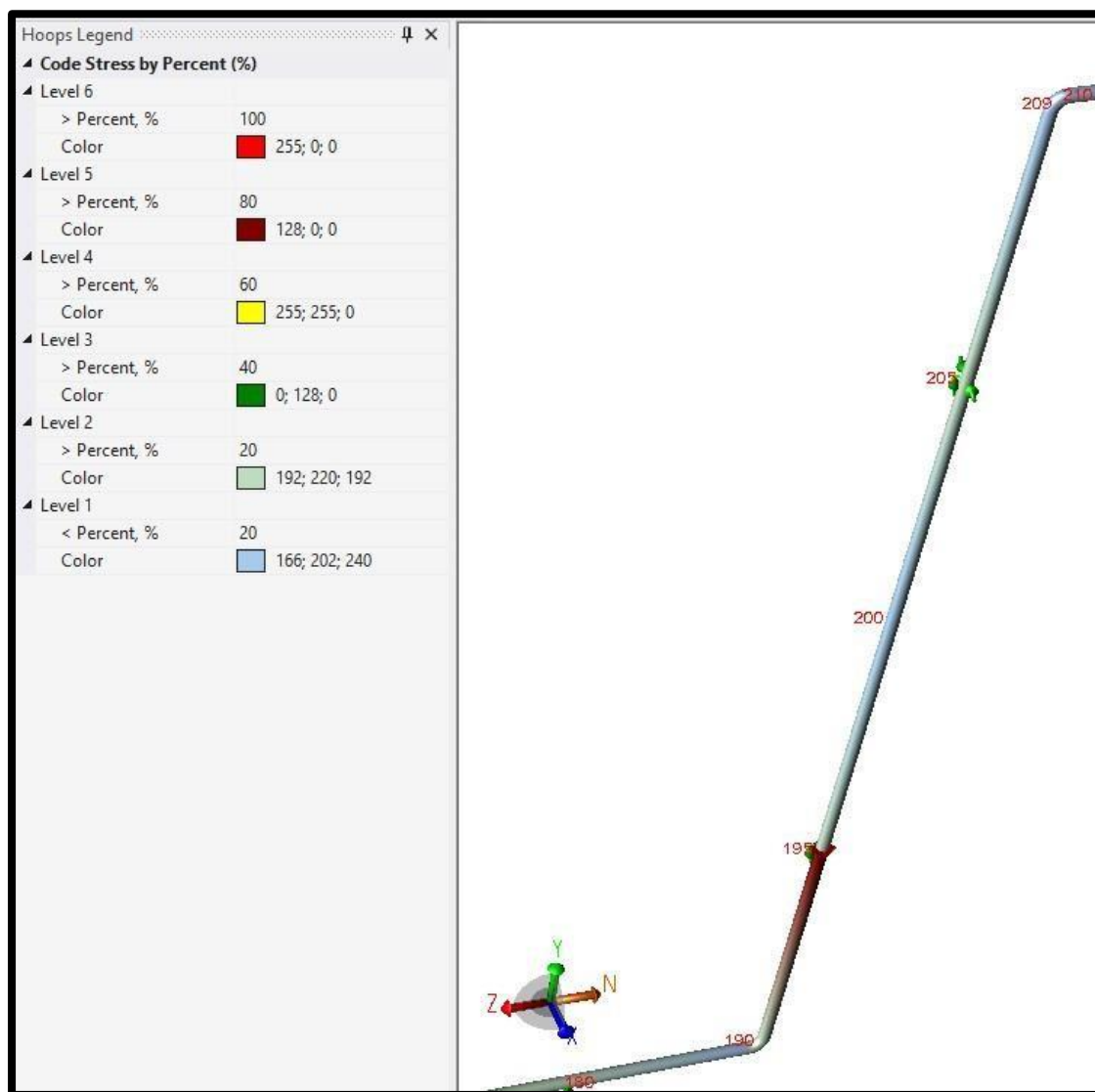
Resultados de esfuerzo: Nodo No.160@190



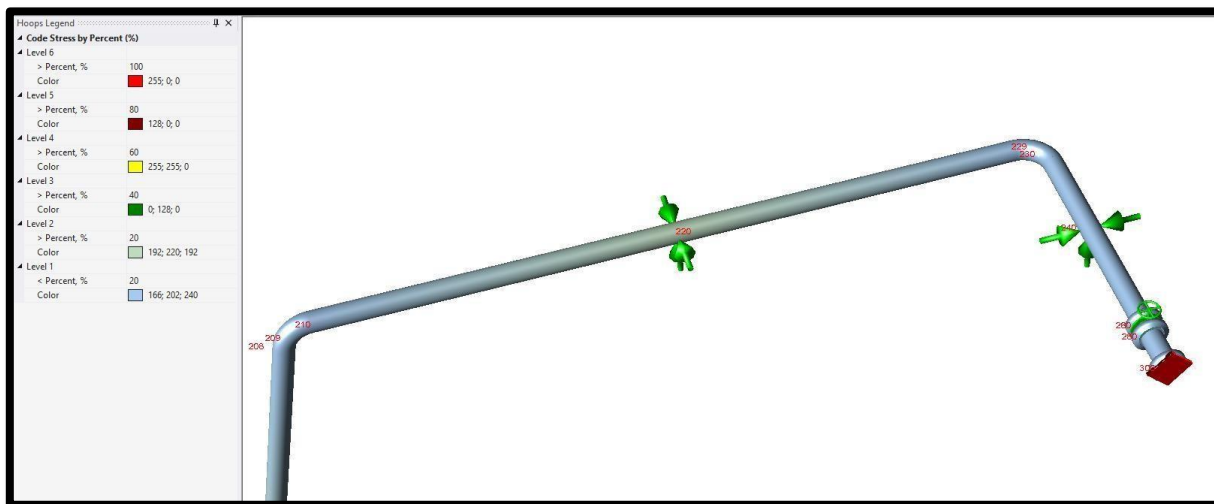
En la figura 55 se muestran los esfuerzos de tubería desde el nodo No.190 hasta el nodo No. 210. En este caso se prescindió del soporte ubicado en el nodo No.200. Sin embargo, se ha adicionado dos (02) soportes, uno de ellos es un soporte tipo anclaje (condición de contorno No. 4) en el nodo No.195 y el otro de ellos es un soporte tipo guía (condición de contorno No.1). Dado que en el nodo No. 195 se tiene un anclaje, los ratios de esfuerzos son superiores al 80%. Aguas arriba del nodo los esfuerzos son bajos menores al 20%.

Figura 56

Resultados de esfuerzo: Nodo No.190 @210



En la figura 56 se muestran los esfuerzos de tubería desde el nodo No.210 hasta el nodo No. 300. Los soportes en los nodos No.220 y No.240 no han sido modificados y se mantienen iguales.

Figura 57*Resultados de esfuerzo: Nodo No.210 @300*

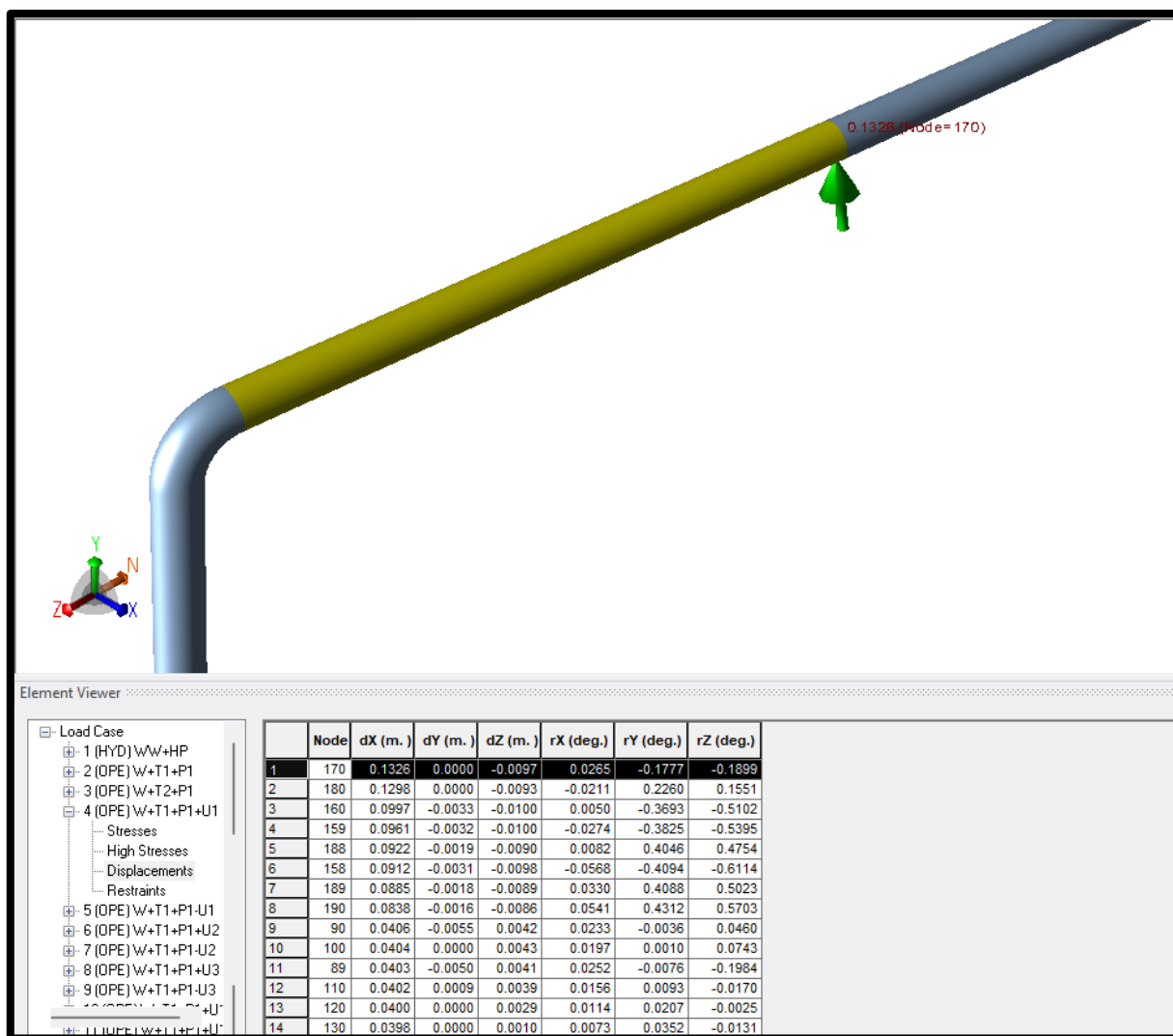
4.8.6. DESCRIPCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS

La evaluación de los desplazamientos en el sistema de tuberías está asociado a la deformación producida por los esfuerzos internos producto de los diferentes casos de carga que fueron evaluados. A continuación, se describen las principales deformaciones lineales encontradas en el análisis y diseño. Las deformaciones rotacionales no serán tomadas en cuenta en esta investigación considerando que no existen uniones flexibles.

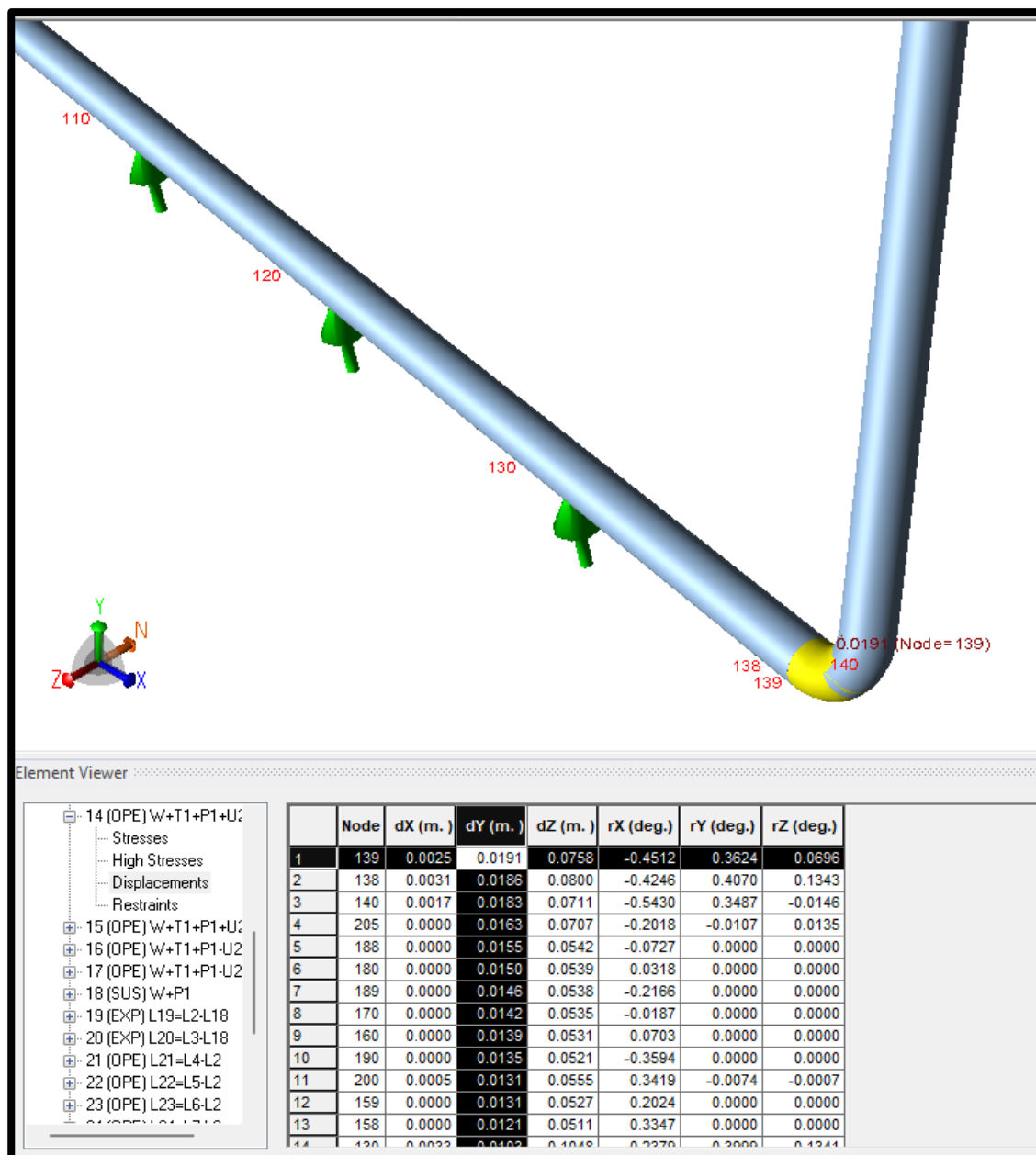
El máximo desplazamiento de la tubería en dirección “X”, se registra en el caso de cargas No.4, No.10@13, No. 21, No. 22, No. 27 y No. 28, donde el desplazamiento es de 13.5 cm en el nodo No.170. A pesar que es un valor elevado, esta condición no registra un incremento de esfuerzos en el nodo. Una alternativa a efectos de no tener esta condición es cambiar el soporte con U-Bolt (condición de contorno No.3).

Figura 58

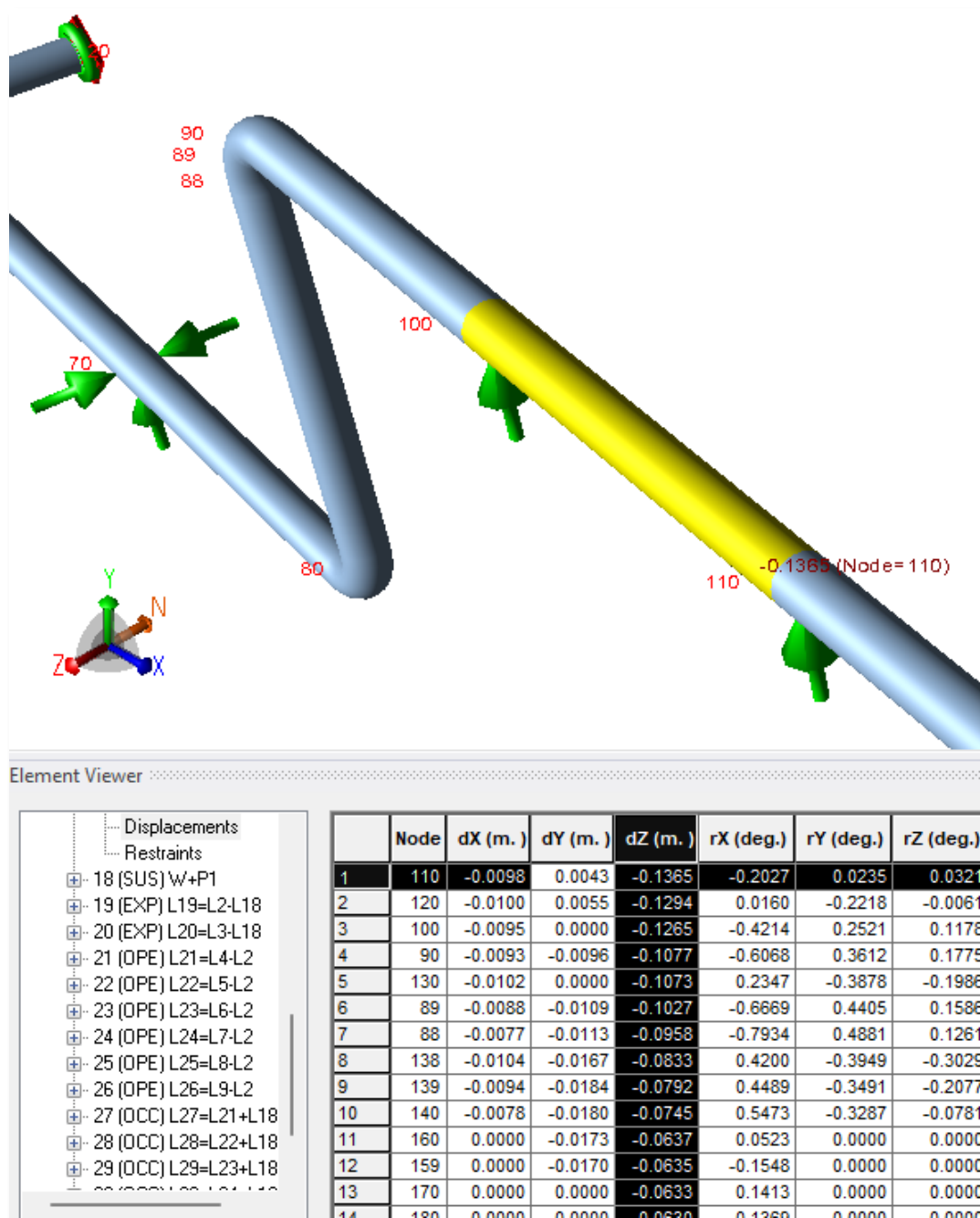
Desplazamiento máximo en dirección “X”



El máximo desplazamiento en la dirección “Y” se ubica en el nodo No.139 durante el caso de cargas No.14. El desplazamiento es de -1.9 cm. Dado que el valor del desplazamiento es bajo y no genera sobretensiones en el codo, no se realizará ninguna modificación al respecto.

Figura 59*Desplazamiento máximo en dirección “Y”*

El máximo desplazamiento en la dirección “Z” se ubica en el nodo No.110 durante el caso de cargas No.17. El desplazamiento es de -13.7 cm. A pesar que es un valor elevado, esta condición no registra un incremento de esfuerzos en el nodo. Una alternativa a efectos de no tener esta condición es cambiar el soporte con U-Bolt (condición de contorno No.3).

Figura 60*Desplazamiento máximo en dirección “Z”*

4.9. EVALUACIÓN DE COSTOS Y COMPARATIVA

A efectos de establecer los costos asociados a los cuatro (04) diferentes tipos de soporte descritos en la sección 2.7 y establecer el método constructivo, se considerarán los costos de Mano de obra directa, materiales de instalación y equipos utilizando la metodología de los precios unitarios. Los costos están basados en presupuestos similares en proyectos mineros realizados en la zona de trabajo. El objetivo será obtener el precio unitario para la fabricación e instalación de cada soporte y realizar las comparativas respectivas. Para realizar una comparación uniforme, no se considerarán los costos indirectos, gastos generales, utilidades, etc. La comparación se realizará basada únicamente en los costos directos. Tampoco se ha incluido los costos de las labores civiles de excavación y profundidad de desplante. Lo que se quiere con esta comparativa son los costos directos de los diferentes tipos de soporte para compararlos en orden de magnitud.

4.9.1. Condición de contorno 1: Soporte tipo guía tubería.

El diseño usado para medir y establecer el costo se encuentra en la figura 60. El valor de del costo total analizado cada partida se encuentra en la tabla 30.

Figura 61

Soporte tipo guía – Elaboración propia

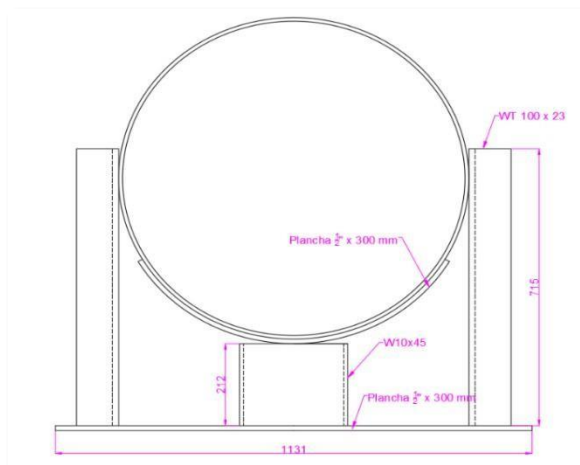


Tabla 29*Costo por cada soporte tipo guía*

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Fabricación de estructuras livianas	kg	107.3	3.8	403
2	Montaje de estructura livianas	kg	107.3	4.6	491
Total (USD)					894

4.9.2. Condición de contorno 2: Apoyo tipo silleta.

El diseño empleado para establecer el costo de este tipo de soporte se encuentra en la figura 61. El valor del costo total asociado a las partidas para la fabricación e instalación del siguiente soporte se encuentra en la tabla 31.

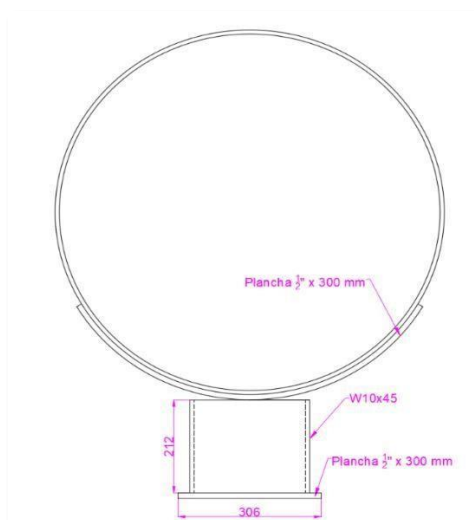
Figura 62*Soporte tipo apoyo – Elaboración propia*

Tabla 30*Costo por cada soporte tipo guía.*

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Fabricación de estructuras livianas	kg	49.7	3.8	187
2	Montaje de estructuras livianas	kg	49.7	4.6	227
Total (USD)					414

4.9.3. Condición de contorno 3: Abrazadera o U-bolt

El diseño empleado para establecer el costo de este tipo de soporte se encuentra en la figura 62. El valor del costo total asociado a las partidas para la fabricación e instalación del soporte tipo abrazadera o U-Bolt se encuentra en la tabla 32.

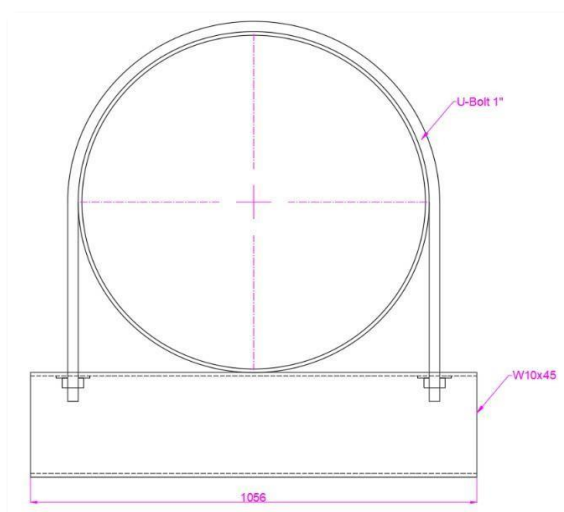
Figura 63*Soporte tipo apoyo – Elaboración propia*

Tabla 31*Costo por cada soporte tipo U-Bolt*

Ite m	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Fabricación de estructuras					
1	livianas	kg	71	3.8	265
Montaje de estructuras					
2	livianas	kg	71	4.6	323
2	U-bot + pernería	Und	1	10	10
Total (USD)					598

4.9.4. Condición de contorno 4: Anclaje tipo estructural o dado de concreto

El diseño empleado para establecer el costo de este tipo de soporte se encuentra en la figura 63. El valor del costo total asociado a las partidas para la fabricación e instalación del soporte tipo abrazadera o U-Bolt se encuentra en la tabla 33.

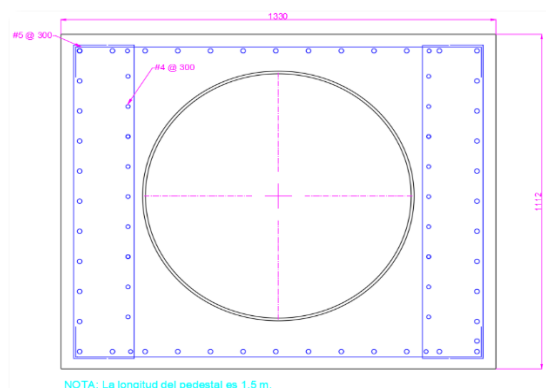
Figura 64*Soporte tipo dado – Elaboración propia*

Tabla 32

Costo por cada soporte tipo U-Bolt

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Suministro y colocación de acero de refuerzo	kg	10	2.4	24
2	Suministro y colocación de concreto armado	m ³	2.2	1015.9	2254
Total (USD)					2278

El análisis de todos los precios unitarios se encuentra en las siguientes figuras:

Tabla 33

Costos Unitarios – Fabricación de estructuras livianas

Partida	1	FABRICACION DE ESTRUCTURA LIVIANA					
Rendimiento	KG/DIA	240 EQ.	240	Costo unitario		3.8 USD/kg	
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
	Mano de Obra						
0101010002	CAPATAZ	HH	0.2	0.0067	9	0.06	
0101010005	OPERARIO	HH	0.5	0.0167	8	0.13	
0101010007	PEON	HH	2	0.0667	5	0.33	
							0.53
	Materiales						
0201010001	ROPA DE TRABAJO	HR		0.1067	0.38	0.04	
0201010002	EQUIPO DE SEGURIDAD	HR		0.1067	0.67	0.07	
0201010003	VIATICOS	HR		0.1067	2.65	0.28	
0201010004	PASAJES	HR		0.1067	1.38	0.15	
0201020004	DISCO DE CORTE	EA		0.025	7.31	0.18	
0201020005	DISCO DE DESBASTE	EA		0.025	5.56	0.14	
							0.86
	Equipos						
0301010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3	0.53	1.58	
0302010001	EQUIPO DE MOVILIZACION	%MO		1	0.53	0.53	
0303010005	MAQUINA DE SOLDAR 400AMP	HM	0.75	0.025	5.86	0.15	
0303010006	EQUIPO OXICORTE	HM	0.375	0.0125	2.35	0.03	
0303010007	ESMERIL ELECTRICO	HM	0.5	0.017	1.95	0.03	
0303010023	TALADRO ELECTRICO DE BASE MAGNETICA	HM	0.25	0.008	5.86	0.05	
							2.36

Tabla 34*Costos Unitarios – Montaje Estructuras livianas*

MONTAJE DE ESTRUCTURA						
Rendimiento: 576.0000 KG/DÍA – EQ.: 576.0000 – Costo unitario: 5.5 USD/kg						
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
Mano de Obra						
101010002	Capataz	HH	0.4	0.0056	15	0.08
101010005	Operario	HH	1	0.0139	10	0.14
101010006	Oficial	HH	2	0.0278	9	0.25
101010007	Peón	HH	1	0.0139	8.5	0.12
Subtotal Mano de Obra					0.59	
Materiales						
201010001	Ropa de trabajo	HR		0.0561	0.5	0.03
201010002	Equipo de seguridad	HR		0.0561	0.9	0.05
201010003	Viáticos	HR		0.0561	2.65	0.15
Subtotal Materiales					0.23	
Equipos						
301010001	Herramientas manuales	%MO	3	0.74		2.22
302010001	Equipo de movilización	%MO	3	0.74		2.22
301010002	Camión grúa	HM	0.2	0.0286	70	2
301010005	Máquina de soldar 400AMP	HM	0.25	0.0035	5.86	0.02
Subtotal Equipos					6.46	
TOTAL GENERAL					7.28	

Tabla 35*Costos Unitarios – Suministro y colocación acero refuerzo*

SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ACERO DE REFUERZO						
Rendimiento: 260 kg/DÍA – EQ.: 260 – Costo unitario: 2.4 USD/kg						
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (US\$)	Parcial (US\$)
Mano de Obra						
101010002	Capataz	HH	0.1	0.003	8.14	0.03
101010003	Operario	HH	1	0.031	5.48	0.17
101010004	Oficial	HH	1	0.031	4.95	0.15
Subtotal Mano de Obra					0.35	
Materiales						
2.0401E+12	Alambre negro N° 16	KG		0.2	2.7	0.54
204030001	Acero corrugado fy = 4200 kg/cm²	KG		1.1	1.32	1.452
Subtotal Materiales					1.992	
Equipos						
301010005	Herramientas manuales	%MO		5	0.35	0.017
Subtotal Equipos					0.017	
TOTAL, GENERAL					2.36	

Tabla 36*Costos Unitarios – Concreto armado*

SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CONCRETO ARMADO $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$						
Rendimiento: 2.5 m³/DÍA – EQ.: 10 – Costo unitario: 1015.9 USD/m³						
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio (US\$)	Parcial (US\$)
Mano de Obra						
101010002	Capataz	HH	0.1	0.32	15	4.8
101010003	Operario	HH	3.2	1	10	32
101010004	Oficial	HH	2	6.4	9	57.6
101010005	Peón	HH	5	16	8.5	136
Subtotal Mano de Obra					230.4	
Materiales						
201040001	Petróleo D-2	GAL		1.32	3.73	4.92
207010012	Piedra chancada 3/4"	M ³		0.7	10.05	7.04
207070001	Agua puesta en obra	M ³		0.2	10.3	2.06
203010007	Cemento Portland Tipo I	BL		8	8	64
231010011	SikaCem	BOL		0.8	4.38	3.5
293010014	Arena gruesa	M ³		0.6	9.02	5.41
Subtotal Materiales					86.93	
Equipos						
301010005	Herramientas manuales	%MO		3	230.4	691.2
301290012	Vibrador de concreto 4 HP 1 h	HM		0.8	3.55	2.84
301290012	Mezcladora de concreto 1 h	HM		0.8	5.7	4.56
Subtotal Equipos					698.6	
TOTAL GENERAL					1015.93	

A continuación, se resumen los costos unitarios de cada tipo de soporte:

Tabla 37*Resumen de costos para cada tipo de anclaje*

Ítem	Tipo de Soporte	Costo USD / Und.
1	Soporte tipo guía	894
2	Soporte tipo apoyo	414
3	Soporte tipo U-Bolt	599
4	Soporte tipo anclaje	2278

4.10. SIMULACIÓN DE FLUJO Y COMPORTAMIENTO OPERATIVO

En el análisis de la tubería conectada a las bombas en paralelo, se consideraron varios factores clave, esto incluyó la evaluación de la presión, teniendo en cuenta las tuberías rectas y sus accesorios, las pérdidas primarias y secundarias, la altura geodésica del sistema de bombeo y la propuesta analítica del sistema con una carga de 255 mca y 170 l/s de caudal. Se sustituyó una de las bombas por una de menor potencia, lo que impactó en el rendimiento del sistema. A continuación, se muestra la simulación del cálculo en las tuberías analizadas y la simulación estática (esfuerzo tangencial, radial y longitudinal) a través del software ANSYS de la parte más crítica en la tubería con una presión interna de 469psi.

Los datos de la tubería para poder realizar un cálculo estático son los siguientes:

- Tubería de acero A53 Grado “B”
- Dex es de 406.4mm
- Dint es de 381mm
- Espesor de la tubería es de 12.7mm

- $p_i=469\text{psi}$ (3.234Mpa)
- $r_i=190.5\text{mm}$
- $r_o=203.2\text{mm}$

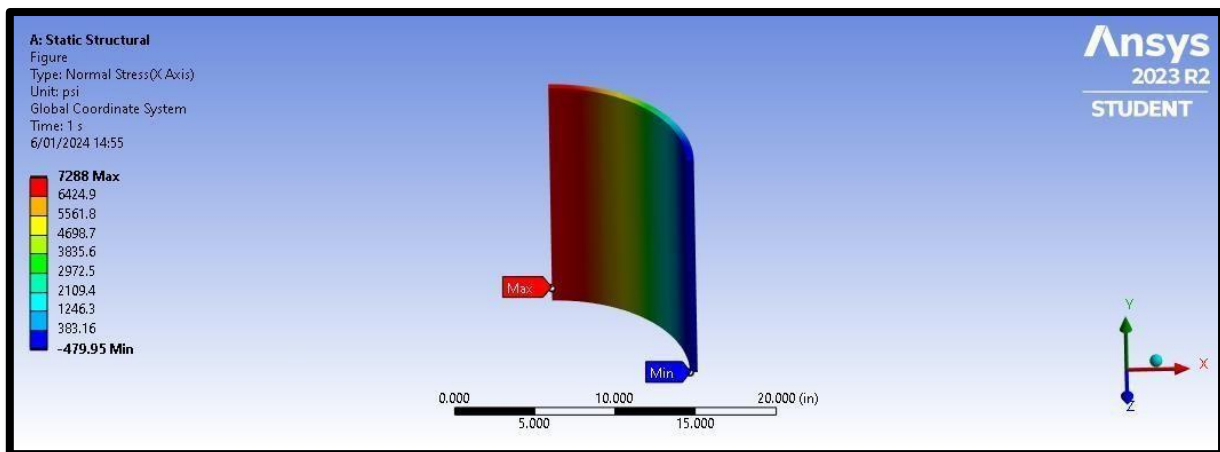
Esfuerzo Tangencial

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 * P_i}{r_o^2 - r_i^2} * \left(1 + \frac{r_o^2}{r_i^2}\right) = \frac{190.5^2 * 469\text{psi}}{203.2^2 - 190.5^2} * \left(1 + \frac{203.2^2}{190.5^2}\right) = 7277.1\text{psi}$$

$$< 110709.45\text{psi}$$

Figura 65

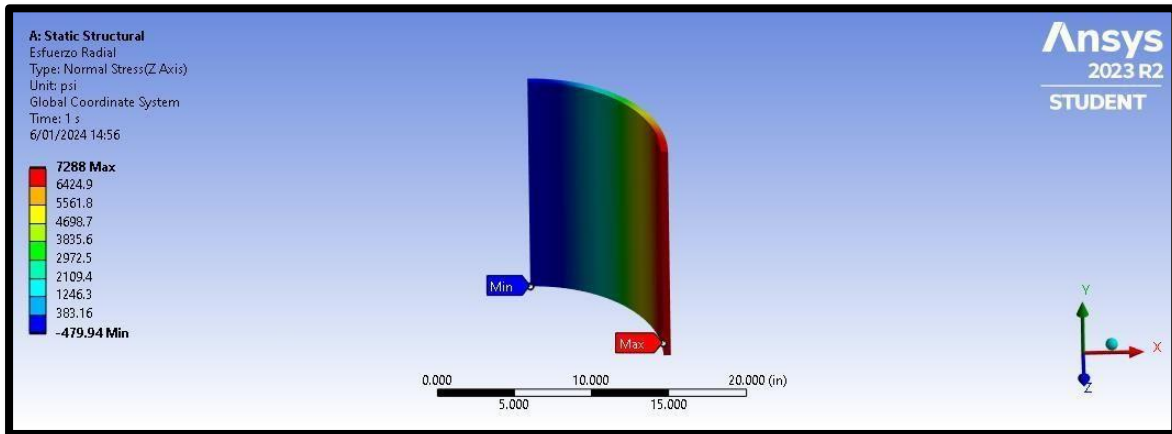
Simulación del esfuerzo tangencial



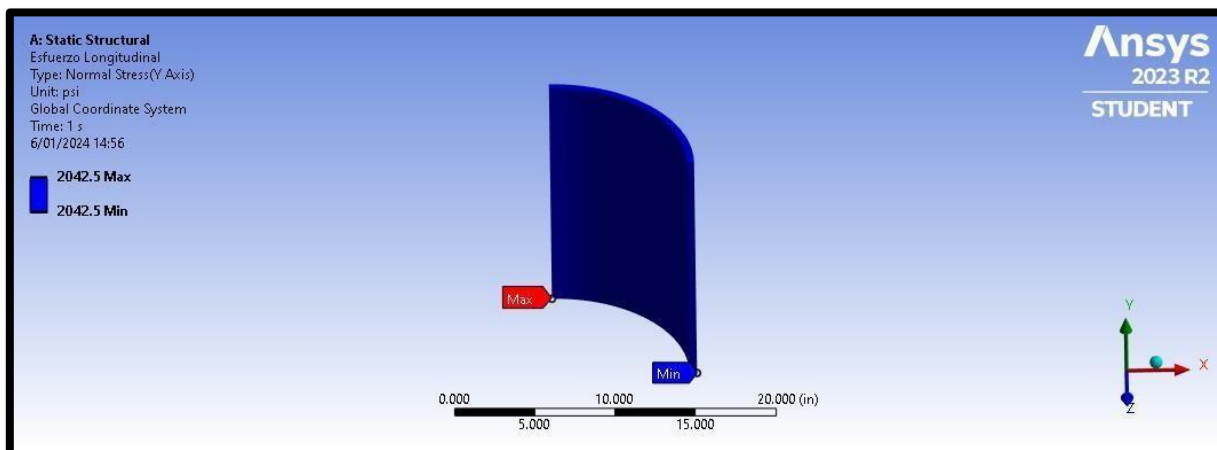
Esfuerzo Radial

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 * P_i}{r_o^2 - r_i^2} * \left(1 - \frac{r_o^2}{r_i^2}\right) = \frac{190.5^2 * 469\text{psi}}{203.2^2 - 190.5^2} * \left(1 - \frac{203.2^2}{190.5^2}\right) = -469\text{psi}$$

$$< 110709.45\text{psi}$$

Figura 66*Simulación del esfuerzo radial***Esfuerzo Longitudinal**

$$\sigma_l = \frac{r_i^2 * P_i}{r_o^2 - r_i^2} = \frac{190.5^2 * 469 \text{ psi}}{203.2^2 - 190.5^2} = 3404 \text{ psi} < 110709.45 \text{ psi}$$

Figura 67*Simulación del esfuerzo longitudinal*

4.11. DISCUSIÓN

Al evaluar los objetivos específicos de la presente investigación con toda la información consultada del estado del arte y los antecedentes revisados detalladamente, se pudo constatar muchas semejanzas en los resultados lo que permiten generar conocimiento y conclusiones importantes a partir de ellos. A continuación se describen los principales tópicos observados de debate que comprende la presente investigación.

Las presiones manométricas evaluadas como resultado de la energía cinética transformada en energía de presión generada por los equipos de bombeo se han podido verificar que no representan ningún efecto significativo al diseño como se suponía el antecedente señalado por Peñaloza (2020) en su trabajo de investigación. Realizando la revisión de los valores y empleando las fórmulas se han obtenido evidentemente valores coherentes al formulado previo. El factor de seguridad obtenido es 16. Lo que significa que es imposible obtener una falla por una condición de presión interna establecida en esta investigación si se cumplen las condiciones de separación de tubería señalada por el autor.

Diámetro NPS	Esfuerzo Longitudinal σ_L (MPa)			Esfuerzo Cortante τ (MPa)	Esfuerzo Radial σ_R (Mpa)	Esfuerzo Circunferencial σ_H (Mpa)	Intensidad de esfuerzo σ_{int} (Mpa)	Factor de Seguridad
	Por momento flector σ_{L3} (MPa)	Por presión interna σ_{L2} (MPa)	Por Fuerza Axial σ_{L1} (MPa)					
16	30.5	15.4	0	2.1	0	30.9	15.6	16

El espesor de la tubería es una variable relevante bajo escenarios de un modo de falla por exceso de desplazamientos o esfuerzo elevados posteriores al análisis. En muchos casos elevar el espesor de la tubería conlleva a incrementos sustanciales en los costos sin embargo existen maneras técnicamente aceptables de lidiar con espesores menores. Ya parte de estos resultados y una tendencia a las conclusiones que posteriormente serán presentadas, Fonseca (2018) pudo optimizar y diseñar sistemas haciendo ajustes y modificaciones de otras variables

diferentes al espesor de la tubería. Se puede inferir que cambiar los espesores de tubería a efectos de no sobrepasar los esfuerzos permisibles según la normativa ASME B31.3 sugiere una alternativa a emplearse en caso extremo. Se prefiere trabajar sobre la flexibilidad de la propia tubería.

De la misma forma Rojas (2021) también llegó a las mismas conclusiones asociadas sobre el impacto de la baja presión y temperatura sobre los sistemas de tuberías. La presente investigación también ha considerado variables de temperatura donde su efecto no es representativo sobre los resultados.

Solo tres (03) alternativas de construcción menos costosas de las múltiples opciones a ser evaluados fueron abordadas en la presente investigación. Porras (2018) permitió considerar varios efectos hidráulicos a nivel analítico lo que permite que en esta investigación se centre estrictamente en los métodos constructivos y la evaluación desde la perspectiva de flexibilidad y de mecánica de materiales basados en la normativa ASME B31.3.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- a) Se seleccionó el tipo de soporte a emplear basado en los costos que involucra su implementación constructiva con las condiciones de flexibilidad de la tubería generando mayores ganancias y reduciendo los costos de capital de la inversión. De la misma forma existe un aporte en el análisis de flexibilidad para sistemas de tuberías de baja presión (menores a 300 psig.) donde las temperaturas no son tan altas (inferiores a 30°C) en donde se realicen evaluaciones de ciertos parámetros que realmente tienen efecto sobre los esfuerzos y deformaciones en el sistema de tuberías evaluado.
- b) Se evaluó el sistema de tuberías de forma estable ante presiones de trabajo de 280 psi e incluso durante la prueba hidrostática de 420 psi, sin comprometer su integridad. Esto demuestra que el efecto de la presión no es crítico para este caso específico, siempre que se mantenga dentro de los límites de diseño. La presión, por tanto, no representa una condición determinante de falla estructural en este tipo de instalación bajo las condiciones planteadas.
- c) Se evaluó el espesor de la tubería no tuvo una influencia significativa en la flexibilidad del sistema. Aunque el espesor incrementa la rigidez estructural, esta medida no siempre es la más eficiente ni económica. Se identificó que el uso de soportes adecuados, especialmente anclajes en puntos estratégicos, representa una solución más efectiva para absorber esfuerzos. El análisis demostró que un espesor de 0,5" garantiza seguridad estructural sin comprometer la flexibilidad cuando se cumplen las recomendaciones de ASME B31.3

d) Se evaluó la temperatura del fluido si tiene un impacto relevante sobre la flexibilidad del sistema. Si bien en este estudio los efectos fueron mínimos debido a que las temperaturas del fluido (10–20 °C) son cercanas a la media ambiental (15 °C), un aumento mayor podría generar dilataciones y tensiones considerables. Este efecto debe ser considerado en el diseño inicial mediante la ecuación de flexibilidad del ASME B31.3 para evitar sobreesfuerzos y fallas prematuras.

e) Se planteó alternativas de construcción para haciendo la selección y ubicación estratégica de los soportes tiene un rol crítico en el desempeño del sistema. Se validó que los soportes tipo anclaje, aunque más costosos, permiten absorber cargas elevadas y momentos críticos. En cambio, los soportes tipo guía o U-Bolt, más económicos y comunes, ofrecen un desempeño aceptable pero limitado. Se recomienda una combinación de soportes optimizados según tramos, rigidez estructural y condiciones sísmicas. El diseño inicial arbitrario fue superado mediante rediseño con simulación estructural (CAESAR II y Ansys), reduciendo esfuerzos críticos hasta en un 84%.

5.2. RECOMENDACIONES

- a) Compruebe la información facilitada en planos u otros documentos para asegurarse de que la tubería que elija para sus tuberías y accesorios sea realmente pertinente.
- b) La altura geodésica, que es la que realmente constituye la altura dinámica, debe incluirse en la altura total. El funcionamiento de la bomba y sus tuberías depende del cálculo preciso de esta altura.
- c) Los cálculos de la presión hidráulica deben verificarse mediante métodos gráficos y algebraicos para garantizar que se encuentran dentro del intervalo admisible.
- d) Para poder elegir el tipo de tuberías y vínculos con la carga internacional, la temperatura y el espesor que deben tener las tuberías mencionadas, la altura geodésica y las pérdidas de altura como primarias y secundarias deben verificarse rigurosamente.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES

ASME B31.1. (2004). *American Society of Mechanical Engineers: B31.1 Power Piping*.

ASME B31. 3.. (2009). *American Society of Mechanical Engineers: Process Piping Guide*.
In *LANL Engineering Standards Manual PD342*.

Atpimsa. (2017). *Análisis de Flexibilidad de Tuberías*. <http://www.atpimsa.com/analisis-de-flexibilidad-de-tuberias/>

Baca, J. (2020). *Análisis y simulación de una línea interconexión de servicios auxiliares alternos del sistema de vapor de alta presión para mejorar su flexibilidad del proyecto modernización refinería Talara*. (Tesis, Universidad César Vallejo).
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/73233>

Blaz, A. (2021). *Cálculo del diámetro de una tubería que trabaja a presión*.
<https://www.faneci.com/calculo-del-diametro-de-una-tuberia-que-trabaja-a-presion/>

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8. ed.). McGraw Hill.

Cervera, A. (24 de enero de 2021). *Soluciones en minería para las tuberías de conducción*.
Tiempo minero.

<https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/soluciones-en-mineria-para-las-tuberias-de-conduccion/>

Chero, A. (2018). *Diseño de un sistema de bombeo mediante arete hidráulico*. (Tesis, Universidad de Piura).

https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3903/ICI_265.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Doria, S. (2022). *¿Qué es la presión manométrica?*

<https://www.bloginstrumentacion.com/knowhow/qu-es-la-presin-manomtrica/>

Fonseca, D. (2018). *Diseño y análisis computarizado de flexibilidad de tuberías en áreas de bombas de una facilidad de agua en la industria petrolera*. (Tesis, Fundación Universitaria Los Libertadores).

<https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/2168>

Gallardo, A. (2019). *Diseño y construcción de un sistema de pruebas hidráulico para el estudio de bombas en serie y paralelo*. Universidad San Francisco de Quito.

<https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8885>

Gutierrez, J. (14 de octubre de 2022). *Diseño flexible en tuberías*. pumpsbomas:

<https://pumpsbomas.com/tutorial-diseno-flexible-en-tuberias/>

Islas, B. (2009). *“Conceptos para el desarrollo básico de arreglos de tuberías en plantas industriales bajo la norma ASME/ANSI”*. (Tesis, Instituto Politécnico Nacional).

<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/4594/1/CONCEPTOSDESARR.pdf>

Janusz, S., Łukasz, Z., & Kolpakov, E. (2021). Methodology for the numerical calculation of

flexibility analysis of the cryogenic pipelines with vacuum insulation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 194(A), 1-14.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104512>

Lozano, G., & Medina, D. (2020). *“Metodología integrada para el diseño de tuberías en proceso de transporte de vapor saturado para asegurar la efectividad operacional para Centros Hospitalarios.* (Tesis, Universidad César Vallejo).

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/64408>

Montaño, E. (2017). *Análisis de esfuerzo en sistema de tuberías.* (Tesis Pregrado, Instituto Politécnico Nacional).

Repositorio institucional del Instituto Politécnico Nacional – Dspace

<https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/19454>

Moyano, J., & Naranjo, E. (2015). *Automatización de la adquisición de datos en un banco de pruebas de bombas centrífugas instaladas en serie y paralelo.* (Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4500/1/15T00615.pdf>

Nayyar, M. L. (2000). *Piping handbook.* McGraw-Hill.

Oliveras, J. (2018). El golpe de ariete a 1.000 frames por segundo. *IAGUA.*

<https://www.iagua.es/blogs/jordi-oliveras/golpe-ariete-1000-frames-segundo>

Pava, N. (2012). *Análisis del comportamiento mecánico de una línea de transporte de vapor ante la presencia de esfuerzos generados por cargas sísmicas y de viento.* (Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional).

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/17651/Analisis%20del%20comportamiento%20mecanico%20de%20una%20linea%20de%20transporte%20de%20vapor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pava, N., Morales, L., & Pava, J. (2014). Análisis mecánico de una línea de transporte de vapor ante cargas sísmicas y de viento. *Científica*, 3, 95-101.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61448036002>

Peng, L.-C. & L. (2010). Pipe Stress Engineering. In *Pipe Stress Engineering*, 1.

<https://doi.org/10.1115/1.802854>

Peñaloza, G. (2020). *Influencia de la variabilidad de parámetros de diseño en uniones con juntas mecánicas, para aplicaciones en codos de radio mayor de servicio de pulpa minera.* (Tesis de maestría).

https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/18793/PE%C3%91ALOZA_ARRAYA_GUSTAVO_INFLUENCIA_VARIABILIDAD_PAR%C3%81METROS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Porras, Á. (2018). *Análisis de un sistema de tuberías para la extracción de aguas subterráneas en la Compañía Minera Chungar.* (Tesis, Universidad Nacional del Centro de Perú).

<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4971>

Quiñonez, H. (2016). *Calor y Temperatura.*

<http://mundofluidos.blogspot.com/2012/07/calor-y-temperatura.html>

Rentería, M. (2014). *Diseño de metodología para el análisis de flexibilidad en sistemas de tuberías.* (Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú).

<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5997>

Rodrigo, R. (2020). *¿Qué es la gravedad específica? – Definición, fórmula, cálculo y ejemplos.*

<https://estudyando.com/que-es-la-gravedad-especifica-definicion-formula-calculo-y-ejemplos/>

Rojas, H. (2021). *Instrumentación, medición de deformaciones unitarias y cálculo del estado de esfuerzos de tuberías grado API X42, Cédula 40, Diámetro 8 pulgadas, sometidas a*

presión interna y flexión. (Tesis de Maestría, Universidad nacional de Colombia).

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79861/Instrumentaci%C3%B3n%20y%20medici%C3%B3n%20de%20deformaciones%20en%20tuber%C3%ADas%20API%20X42.7175974.2021.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Salgado, P. (2020). *Análisis de flexibilidad para un sistema de transporte de agua en tuberías incorporando el fenómeno de flashing mediante simulación numérica.* (Tesis, Universidad Técnica Federico Santamaría).

<https://repositorio.usm.cl/handle/11673/50032>

Sánchez, D. (2020). *Metodología para el diseño de estaciones de bombeo basado en el método AHP.* (Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Valencia).

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/146817/S%C3%A1nchez%20-%20METODOLOG%C3%8DA%20PARA%20EL%20DISE%C3%91O%20DE%20ESTACIONES%20DE%20BOMBEO%20BASADA%20EN%20EL%20M%C3%89TODO%20AHP.pdf?sequence=1>

Structuralia. (16 de noviembre de 2020). *Tipos de uniones estructurales mecánicas en ingeniería.*

<https://blog.structuralia.com/uniones>

Talens, P., Cortés, V., & Fuentes, A. (2016). *Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de un alimento fluido.*

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83406/Talens%3BCort%C3%A9s%3BFuentes%20-%20Efecto%20de%20la%20temperatura%20en%20el%20comportamiento%20reol%C3%B3gico%20de%20un%20alimento%20fluido.pdf?sequence=1>

Twyman, J. (2018). Golpe de ariete en una red de tuberías debido al cierre rápido de una válvula. *Revista ingeniería de construcción*, 33(2), 193-200.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000200193>

Universidad Nacional de Rosario. (2017). *Hidrostática-Hidrodinámica*.
<https://rehip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/7025/7401-17%20%20FISICA%20Hidrost%C3%A1tica%20-%20Hidrodin%C3%A1mica.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

VII. ANEXOS

Vistas del sistema de tuberías y la bomba



Descripción: Sistema de tuberías calculada en función de las cargas de diseño, la presión de diseño y la temperatura de diseño.



Descripción: Sistema de impulsión. Se visualiza el sistema de bombeo, véase las bridas y uniones en tubería.



Descripción: Vista de tuberías y bombas de impulsión. El sistema de soporte de tuberías, que a la vez que asegura la estabilidad de las tuberías, permite la flexibilidad ante fuerzas originadas por sismos.



Descripción: Bomba de impulsión. Con sus partes principales, la carcasa, el mecanismo impulsor, motor, y los cojinetes de apoyo.

