

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE**



**REDISEÑO DE LA CONFIGURACIÓN DE
SOPORTES EN LINEA DE TRANSPORTE DE AGUA**

Joaquín Ignacio Arenas Cataldo

Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico

Profesor guía: Dr.Ing. Patricio Arrué

Profesor correferente: Dr.Ing. Joaquín Mura

Fecha:01-03-2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: REDISEÑO DE LA CONFIGURACIÓN DE SOPORTES EN LÍNEA DE TRANSPORTE DE AGUA nombre del candidato(a): JOAQUIN IGNACIO ARENAS CATALDO

Carrera / Grado: INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

Campus: SAN JOAQUIN Departamento: INGENIERÍA MECÁNICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, PATRICIO ARRÚE CORNEJO, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 13/03/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 14/03/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo aborda el análisis y rediseño de la configuración de soportes en una línea de transporte de agua utilizada en un contexto minero, compuesta por tramos de tubería de HDPE y acero. La configuración original incorporaba un bloque de hormigón rígido que actuaba como punto de anclaje, generando restricciones significativas frente a las deformaciones térmicas del sistema y provocando concentraciones de esfuerzos potencialmente críticas. El objetivo principal del estudio consistió en evaluar el comportamiento estructural de esta configuración y proponer una alternativa de soportación que permita mejorar el desempeño mecánico de la línea.

Para ello se desarrolló una modelación tridimensional del sistema mediante el software de análisis de flexibilidad AutoPIPE, considerando cargas sostenidas, térmicas y ocasionales, así como las propiedades mecánicas específicas de los materiales involucrados. Se analizaron y compararon tres configuraciones: un modelo base con anclaje rígido, una configuración intermedia con junta flexible y bloque de hormigón, y un modelo de solución que elimina el bloque e incorpora nuevos soportes metálicos.

Los resultados permitieron identificar las zonas críticas del sistema, particularmente en el tramo curvo asociado al ascenso del talud, donde se concentraban los mayores desplazamientos y esfuerzos. El rediseño propuesto reduce las restricciones estructurales, mejora la distribución de esfuerzos y permite una mayor compatibilidad con las deformaciones térmicas del sistema, demostrando ser una alternativa técnicamente más eficiente para la operación de la línea.



AGRADECIMIENTOS

Este es un trabajo hecho desde el primer año de universidad. Desde la resiliencia. Tuve momentos en los que tirar la toalla era la opción más viable, sin embargo, lograr llegar a este punto es un logro, aunque muchas veces no me sentí merecedor. No me sentí merecedor porque no tenía fe de mí mismo, la confianza que tenía era paupérrima. La confianza se crea a partir de lo que realmente creas que tienes dentro y de cómo tomas las decisiones que te hagan cumplir tus propias promesas. Por eso agradezco aquellas personas que siempre confiaron en mí aun cuando yo dudé. A esos amigos que siempre estaban alentándome a dar el último esfuerzo. A mi hermano mayor que siempre estuvo aconsejándome, apoyándome y sosteniéndome. A mis padres que fruto de su esfuerzo y sus enseñanzas lograron entregarme la base y las respuestas a las preguntas que siempre surgen en el camino. A los profesores, ayudantes, mentores, tías del aseo y del negocio, que hacen la universidad. A Dios, que su palabra y sabiduría este siempre guiándome en cada etapa de mi vida.

CONTENIDO

Agradecimientos	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
Capítulo 1 : ANTECEDENTES	8
1.1 Introducción	8
1.2 Contexto	9
1.3 Motivación	11
1.4 Objetivos	13
1.5 Alcance	14
1.5.1 . Información de la zona	14
1.5.2 Datos operacionales.....	14
1.6 Estado del arte	14
Capítulo 2 : MARCO TEÓRICO	17
2.1 Sistemas de tuberías industriales como estructura flexible.....	17
2.2 Soportes y restricciones en sistemas de tuberías.....	18
2.2.1 Restricción del sistema	20
2.2.2 Criterios para la selección de soportes en tuberías de diámetro mayor a 20”	21
2.3 Fundamento del análisis de flexibilidad en tubería.....	22
2.4 Clasificación de esfuerzos en el análisis de tubería	24
2.5 Cargas solicitantes	24
2.5.1 Cargas primarias.....	24
2.5.2 Cargas secundarias	25
2.5.3 Cargas ocasionales	25
2.5.4 Cargas dinámicas.....	25
2.6 Materiales utilizados y su impacto en la flexibilidad.....	26
2.6.1 La tubería de polietileno de alta densidad (HDPE).....	26
2.6.2 Consideraciones de diseño de sistemas de tubería en HDPE	27
2.7 Fundamentación normativa del análisis	28
2.7.1 Alcance de la norma ASME B31.4	29

2.7.2 Clasificación de esfuerzos según ASME B31.4.....	29
2.7.3 Criterios de compatibilidad con materiales termoplásticos.....	32
Capítulo 3 : METODOLOGÍA.....	34
3.1 Enfoque metodológico	34
3.2 Definición del modelo de análisis	34
3.2.1 Configuración inicial.....	35
3.2.2 Modelado de la configuración actual	37
3.2.3 Configuración alternativa de soportes	38
3.3 Supuestos y simplificaciones clave.....	38
3.4 Propiedades de los materiales	39
3.4.1 Tubería acero ASTM A-53 Gr B.....	39
3.4.2 Tubería de HDPE PE100.....	39
3.5 Soportes y restricciones	39
3.5.1 Especificación técnica de los soportes reales	39
3.6 Caracterización de cargas	41
3.6.1 Cargas primarias.....	41
3.6.2 Cargas secundarias	42
3.6.3 Cargas ocasionales	42
3.7 Combinación y aplicación de cargas.....	44
3.7.1 Combinación de Cargas	44
3.8 Criterios de evaluación	44
3.8.1 Cumplimiento normativo	44
3.8.2 Distribución de reacciones en soportes y anclajes	45
3.8.3 Control de desplazamientos	45
3.8.4 Constructibilidad y costo asociado a la soportación	45
Capítulo 4 : RESULTADOS	46
4.1 Construcción de la configuración inicial	46
4.2 Esfuerzos permisibles	49
4.2.1 Esfuerzos permisibles en acero	49
4.2.2 Criterio de esfuerzos permisibles en HDPE	49
4.2.3 Resultados por esfuerzo sostenido	50
4.2.4 Resultados por esfuerzo de expansión térmica	52

4.2.5 Resultados por esfuerzos ocasionales	54
4.2.6 Resultados de fuerzas en el bloque de hormigón	56
4.2.7 Resultados de fuerzas en soportes	58
4.2.8 Resultados del desplazamiento máximo	60
4.3 Modelación de la configuración actual	63
4.3.1 Modelado de la condición actual.....	63
4.3.2 Resultados por cargas sostenidas	64
4.3.3 Resultados por cargas de expansión térmica.....	65
4.3.4 Resultados por cargas ocasionales	65
4.3.5 Resultados de fuerzas en el bloque de hormigón	66
4.3.6 Resultados de fuerzas en soportes	67
4.3.7 Resultados del desplazamiento máximo	67
4.4 Configuración del modelo solución de soporte	70
4.4.1 Criterios de configuración de la propuesta del modelo	70
4.4.2 Esquema del modelo solución	70
4.4.3 Resultados del modelo solución bajo cargas sostenidas	71
4.4.4 Resultados bajo cargas térmicas	73
4.4.5 Resultados por cargas ocasionales	74
4.4.6 Resultados de fuerzas máximas en la reconfiguración de soportes	76
4.4.7 Resultados del desplazamiento máximo	78
4.5 Comparativa en costos de soportes	80
4.5.1 Desglose del coste del bloque de hormigón	80
4.5.2 Desglose del coste soporte simple.....	81
Capítulo 5 : DISCUSIÓN	82
5.1 Alcance	82
5.2 Evaluación de la base comparativa	82
5.2.1 Influencia de la configuración de restricciones y la identificación de zonas críticas	82
5.2.2 Comportamiento del HDPE frente a restricciones severas	82
5.2.3 Comparación estructural directa con el modelo base	83
5.2.4 Mejora en las reacciones del bloque	84
5.2.5 Evaluación de los desplazamientos en la zona crítica	85
5.3 Configuración de la solución	85

5.3.1 Cambio y mejora de los puntos críticos	86
5.3.2 Diferencias constructivas y soportación.....	86
5.3.3 Comparativa en las reacciones del soporte más exigido	89
5.3.4 Evaluación de la configuración de los nuevos soportes	91
5.4 Síntesis de la discusión técnica	93
5.5 Evaluación económica	94
Capítulo 6 : CONCLUSIONES.....	95
Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA	97
Capítulo 8 ANEXOS	99
ANEXO A: Modelacion	99
8.1.1 Definición de la geometría y elementos.	99
8.1.2 Intensificador de esfuerzo (SIF)	100
8.1.3 Junta de expansión flexible (manguerote).....	101
ANEXO B: Planos de construccion.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de extracción de relave.	10
Figura 2: Vista satelital de las instalaciones de Minera Valle central en Requínoa, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	12
Figura 3: Configuración de la línea.	13
Figura 4: Planta de tratamiento de agua modelada en AutoPIPE.	16
Figura 5: Tareas del análisis de estrés.	19
Figura 6: Representación esquemática del anclaje rígido.	20
Figura 7: Soporte guía fabricado.	21
Figura 8: Lira o curva de flexibilidad.	23
Figura 9: Disposición de los esfuerzos de tubería.	24
Figura 10: Condición de presión interna en recipiente de pared semi delgada.	24
Figura 11: Discontinuidad del estrés en un cambio de material.	29
Figura 12: Vista isométrica de la conexión.	36
Figura 13: Vista isométrica del modelo.	37
Figura 14: Configuración inicial del tramo comprendido por la tubería.	37
Figura 15: Modelo del tramo aguas arriba al bloque de hormigón.	38
Figura 16: Esquema del tramo sustituido.	39
Figura 17: Soporte de anillo guía.	41
Figura 18: Soportación de la línea.	41
Figura 19: Soporte base de la línea.	42
Figura 20: Estructura soporte de entrada al cajón de reparto.	42
Figura 21: Representación del tramo superior del modelo.	48
Figura 22: Representación completa del tramo superior del modelo.	48
Figura 23: Representación del tramo inferior del modelo.	49
Figura 24: Representación de la conexión del modelo.	49
Figura 25: Distribución de esfuerzos en zonas previas al bloque.	52
Figura 26: Distribución de esfuerzo en las líneas de HDPE.	53

Figura 27: Distribución del esfuerzo máximo por las restricciones ante los cambios de temperatura.	54
Figura 28: Distribución de esfuerzo por cambio de temperatura en la tubería de HDPE. ...	55
Figura 29: Punto de esfuerzo máximo en condición de esfuerzo ocasional.	56
Figura 30: Distribución de esfuerzos en la tubería de HDPE.	57
Figura 31: Puntos de referencia en el bloque.	59
Figura 32: Representación de soporte con mayor carga.	61
Figura 33: Desplazamiento de la tubería de HDPE.	62
Figura 34: Representación del desplazamiento máximo.	63
Figura 35: Modelación del cambio de componentes de la línea (configuración actual).	64
Figura 36: Distribución de esfuerzo por cargas sostenidas.	65
Figura 37: Distribución de esfuerzos por carga térmica máxima.	66
Figura 38: Distribución del esfuerzo máximo por cargas ocasionales.	67
Figura 39: Representación de los desplazamientos máximos en el modelo actual.	70
Figura 40: Identificación de zonas críticas.	71
Figura 41: Representación de la eliminación de las restricciones impuestas.	72
Figura 42: Distribución del esfuerzo sostenido en zonas críticas.	73
Figura 43: Distribución de esfuerzo sostenido en la línea.	74
Figura 44: Distribución de esfuerzo bajo condiciones térmicas en zona crítica.	75
Figura 45: Esfuerzos ocasionales en el modelo propuesto.	76
Figura 46: Esfuerzos ocasionales en la zona superior del modelo propuesto.	77
Figura 47: Soportes reemplazantes del bloque de hormigón.	78
Figura 48: Coordenadas locales de los elementos.	100
Figura 49: Modelación de codos y elementos curvos.	101
Figura 50: Elementos que utilizan SIF.	101
Figura 51: Modelado de junta flexible.	102

CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES

1.1 INTRODUCCIÓN

La minería del cobre es la piedra angular del sector productivo en Chile, siendo el país número 1 en el ranking de producción mundial al año 2023 aportando alrededor del 20% del mercado mundial (Consejo minero, 2024). Mantener estos niveles de producción exige operaciones de gran escala a nivel local, lo que implica enfrentar desafíos relevantes en términos operacionales, económicos, y de seguridad estructural. Aunque no existe una cifra oficial exacta, la industria minera en Chile invierte decenas de miles de millones de dólares en temas relacionados a la creación de nuevos proyectos y a la mantención de estos.

En este contexto, uno de los principales proyectos asociados a la industria es el transporte y control de fluidos, el cual, se reconoce como un elemento crítico para la continuidad operacional y la eficiencia de los procesos (Ediciones Maipo S.A., 2025). Dentro de estas actividades, el bombeo y transporte de fluidos adquiere un rol fundamental, ya que permite articular las distintas etapas del proceso productivo, identificándose, así como un foco clave en la selección y evaluación de los equipos involucrados. En particular, entre los equipos que participan en esta acción se logra identificar, bombas, válvulas y tuberías, este último es el más importante dentro del contexto de este trabajo, su rol es vital para el funcionamiento de la planta, y desde la etapa de diseño se debe considerar cuidadosamente tres aspectos prioritarios: el funcionamiento, la seguridad y el costo de construcción. Mantener un equilibrio entre estos factores es crucial para garantizar un diseño eficiente y viable, sin embargo, resulta ser una tarea realmente compleja. Tarea que se otorga a distintas disciplinas de la ingeniería, desde el diseño hasta la construcción y dentro de una de ellas, la ingeniería en estrés de tuberías, una ingeniería específica dentro del contexto.

Los ingenieros en los años 50 comenzaron a analizar las tuberías con un objetivo: calcular el estrés debido a la dilatación térmica. (Peng & Peng, 2009). Contenido que ha ido evolucionando a través de los años, evidenciando un gran avance en la detección del espectro de fallas de los complejos de tubería. El aporte que logra el análisis de estrés tiene que ver mucho con el balance de los tres pilares desde el diseño hasta la construcción, si es llevado al contexto más de campo uno de los problemas recurrentes en los proyectos es el sobredimensionamiento, que, si bien busca asegurar el desempeño en seguridad, provoca un incremento en el costo que siempre puede ser evitado.

El presente trabajo toma como eje principal el análisis de flexibilidad en tuberías detallando un caso particular para la industria minera en Chile, cuyo principal objetivo es la optimización de los recursos basándose en el control de los esfuerzos en una línea de transporte de agua industrial.

1.2 CONTEXTO

La planta está situada en la comuna de Requínoa, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, su principal proceso de extracción consiste en el desmoronamiento controlado del terreno, en este caso, relave seco mediante la inyección de agua en alta velocidad, extrayendo principalmente la mezcla entre agua y relave. Mezcla que se traslada hacia la planta. En el proceso de transporte de material, todo el material extraído proveniente del reservorio de relave seco conecta en un cajón de reparto¹.

En la Figura 1 se visualiza el proceso principal de extracción de la planta, donde, por cada tobera se lanza un chorro de agua de grandes dimensiones, cuyo material se debe transportar.



Figura 1: Proceso de extracción de relave. (Minera Valle Central, 2026)

Uno de los sistemas de tubería, alimenta un cajón de reparto en la planta. Esta línea cuenta con un diámetro de 24 pulgadas y una longitud aproximada de 100 metros lineales desde la conexión hasta la descarga. Su función principal es facilitar la circulación de agua para diluir el contenido sólido provenientes de la extracción y optimizar la recuperación de concentrado en los procesos posteriores. La ejecución de la construcción de este sistema implicó un alto grado de complejidad. La ubicación de la línea está en la ladera de un cerro el cual presenta una diferencia de cota cercana a los 40 metros de altura y una pendiente 1:1, aproximada de 45°. Para llevar a cabo la construcción, se usaron grúas de alto tonelaje y la

¹ Cajón de reparto, estructura hecha de concreto similar a una piscina que distribuye el material extraído

realización de maniobras de alto riesgo. Resultó ser un montaje muy complejo en términos de seguridad. Uno de los principales porqués se atribuye a los soportes de la tubería, que incluye la construcción de un importante bloque de hormigón o machón de hormigón que ancla la tubería restringiendo totalmente su movimiento, una solución ampliamente usada en tuberías de alto impacto y de gran diámetro (Strydom, 2024). Esto se tradujo en el aseguramiento operativo de la línea, sin embargo, en términos de esfuerzo constructivo y posterior indicio de sobre tensionado en la tubería, comprometió un incremento considerable en el costo de construcción.

La Figura 2 muestra la vista satelital de la línea, identificando que las distancias correspondientes a las limitaciones de maquinaria son suficientes para requerir equipos de gran envergadura.



Figura 2: Vista satelital de las instalaciones de Minera Valle central en Requínoa, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. (Google earth, 2025)

1.3 MOTIVACIÓN

La necesidad de este trabajo surge a partir de las dificultades constructivas y los altos costos asociados al diseño ejecutado para el proyecto “Conducción de agua a cajón de reparto”, desarrollado en las instalaciones de Minera Valle Central. Uno de los principales desafíos radicó en la imposibilidad de ingresar maquinaria directamente al área de trabajo ubicada en un talud con alta pendiente, lo que obligó a emplear grúas de gran tonelaje. Esta condición, si bien fue planificada desde un principio, no solo incrementa significativamente los costos operacionales, sino que también genera riesgos adicionales durante la ejecución. Asimismo, se debió construir un bloque de hormigón en el centro del talud, cuya ejecución resultó ser compleja tanto desde el punto de vista del cronograma como de las técnicas constructivas utilizadas. Posterior a la construcción, se evidencia una sobre tensión presente en la tubería y en los soportes. Esta sobretensión no fue cuantificable numéricamente sino una rigurosidad evaluada bajo la experiencia técnica. Los niveles de estrés asociados a la tubería se atribuyen a la expansión térmica de esta y a la materialidad que la compone (Figura 3), siendo esta reemplazada con una tubería de acero carbono y una junta flexible, lo que corresponde al diseño en la actualidad. Estas dificultades evidencian la necesidad de replantear desde el origen el diseño estructural de la línea de conducción, incorporando criterios que consideren tanto el movimiento como las restricciones y condiciones de construcción en terreno.

Como primera etapa del estudio, se identifican elementos y condiciones críticas que llevaron a realizar la sustitución de los componentes de la línea.

Evaluar técnicamente el reemplazo de la sección antigua de la línea, bajo la hipótesis de apuntar a los esfuerzos anteriores al cambio, considerando que estos fueron aceptables o por lo menos controlables en acciones simples.

Desarrollar una propuesta de configuración de soportes en la sección del bloque de hormigón, implementando el análisis de flexibilidad orientado en los límites establecidos según la normativa ASME B31, esto con el fin de garantizar seguridad operacional, estabilidad estructural y gestión eficiente de los esfuerzos permisibles por la normativa.



Figura 3: Configuración de la línea.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo general:

Desarrollar un diseño mejorado de la actual configuración de soportes en una línea de transporte de agua mediante el análisis de flexibilidad.

Objetivos específicos:

- Identificar las condiciones de carga y restricciones del diseño actual, en base a la norma ASME B31
- Modelar computacionalmente el diseño con las condiciones actuales, buscando mejoras posibles en la estructura validando por resultados obtenidos de la mecánica de sólidos.
- Proponer una nueva configuración de soporte optimizada considerando mejoras de operación y costos asociados.

1.5 ALCANCE

Se establece el marco normativo de referencia a la asociación americana de ingenieros mecánicos ASME cuyo principal objetivo es entregar las directrices para el diseño de sistemas de tuberías, desde los elementos utilizados a las capacidades soportadas. El código de diseño específico corresponde al internacionalmente conocido ASME B31, el cual adopta

una visión bastante amplia en cuanto al diseño y seguridad operacional de distintos tipos de tubería.

El estudio del estado de esfuerzo será medido por análisis especializado de estrés de tuberías AutoPIPE. Además, toda la información relevante de la empresa es adjuntada en anexos y todos los datos referentes a costes se asumen constantes para el periodo.

1.5.1. Información de la zona

El alcance se limita a la ubicación de las instalaciones en la sexta región del Libertador General Bernardo O'Higgins, comuna de Requínoa, perteneciente a la ciudad de Rancagua. Desde el punto de vista climático, la zona presenta una temperatura media anual de 25 °C, una temperatura máxima promedio de 30 °C y una temperatura mínima promedio de 1°C (Dirección Meteorológica de Chile, 2026).

1.5.2 Datos operacionales

El análisis considera la tubería operando en régimen estacionario.

- Fluido transportado: agua
- Flujo estimado 300 [L/s] (promedio)
- Densidad del fluido: 1000 [kg/m³] (agua)
- Temperatura de operación: 25 °C
- Temperatura de diseño: $T_{\text{ope}} + 10^{\circ}\text{C}$
- Temperatura mínima: 1 °C
- Presión de operación: 55 [Psi] – 0.4 [MPa]
- Presión de diseño: 100 [Psi] – 0.69 [MPa]

1.6 ESTADO DEL ARTE

El análisis de flexibilidad constituye una herramienta fundamental, ya que, permite evaluar las condiciones estructurales de los sistemas de tubería. Su aplicación en esta etapa de ingeniería proporciona beneficios significativos, tales como la reducción del riesgo de fallos, optimización del diseño, el aumento de la seguridad operativa y la mejora en la eficiencia del sistema.

Actualmente, existen diversos programas de cálculo especializados, como *CAESAR II*, *Autopipe*, *ROHR2*, *Start-prof*, entre otros que permiten realizar modelaciones detalladas del comportamiento mecánico de los sistemas de tuberías ante distintas condiciones de carga. En el marco de este trabajo, dichas herramientas son empleadas no solo para abordar los desafíos técnicos del caso de estudio, sino también para proponer un enfoque metodológico que pueda ser replicado en futuros proyectos de similar complejidad.

Un caso representativo que evidencia el valor del análisis de flexibilidad es el proyecto de ampliación del sistema de agua potable en la ciudad de Arequipa, Perú. Este proyecto, con una inversión aproximada de USD 83 millones, consideró la instalación de una conducción de 11 kilómetros desde el río Chili hasta la planta de tratamiento. Se utilizó la herramienta AutoPIPE para llevar a cabo un análisis detallado de esfuerzos en tuberías. Este análisis permitió determinar la ubicación óptima de soportes y anclajes, así como minimizar

el uso de estructuras de hormigón y reducir la cantidad total de soportes requeridos y como resultado, se estimó un ahorro económico de aproximadamente USD 500.000. (Bentley Systems, 2014).

Otro caso corresponde a un proyecto de 350 millones ejecutado también en la ciudad de Arequipa, cuyo objetivo fue transportar un caudal de 6.480 metros cúbicos por hora de agua desde una poza de reparto hasta un estanque de almacenamiento de agua fresca, ubicado en una planta concentradora de cobre con capacidad de procesamiento de 240.000 toneladas por día. Se utilizó el software Bentley AutoPIPE para el análisis de esfuerzos en tuberías, diseño de soportes y bloques de anclaje (Figura 4).(Bentley Systems, 2014).



Figura 4: Planta de tratamiento de agua modelada en AutoPIPE.

En la literatura académica, se han desarrollado diversos estudios que han abordado el análisis de flexibilidad en sistemas de tuberías mediante herramientas computacionales especializadas. En este contexto, el trabajo “*Flexibility and Stress Analysis of Piping System using CAESAR II – Case Study*” presenta un caso aplicado donde se evalúan desplazamientos, esfuerzos sostenidos y térmicos a través de modelación en CAESAR II, evidenciando la relevancia del análisis computacional para la validación estructural conforme a normativa. (Prachi et al., 2014).

En ámbito de los desarrollos recientes en el análisis de flexibilidad de sistemas de tuberías, Ham, An, Kim, Choi y Kim proponen un enfoque de optimización de soportes basado en técnicas de *machine learning*, orientado a mejorar la configuración estructural del sistema mediante el aprendizaje a partir de múltiples escenarios de carga y restricciones geométricas. El estudio demuestra que la integración de algoritmos de aprendizaje automático permite identificar disposiciones de soportación más eficientes en términos de reducción de esfuerzos y desplazamientos, optimizando simultáneamente criterios de desempeño estructural y economía del diseño. Este enfoque representa una evolución respecto de los métodos tradicionales determinísticos, incorporando herramientas de inteligencia artificial en la toma de decisiones dentro del análisis de flexibilidad de *piping* (Ham et al., 2017).

CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico establece los fundamentos necesarios para el análisis de flexibilidad aplicado al rediseño de la configuración de soportes de una línea de transporte de agua industrial, abordando los conceptos estructurales, mecánicos y normativos que sustentan la metodología y la evaluación de resultados desarrolladas en los capítulos posteriores

2.1 SISTEMAS DE TUBERÍAS INDUSTRIALES COMO ESTRUCTURA FLEXIBLE

Los sistemas de tuberías industriales cumplen una función esencial en el transporte de fluidos dentro de instalaciones productivas; sin embargo, su análisis no puede limitarse únicamente a criterios hidráulicos o de contención de presión. Desde el punto de vista estructural, una línea de tuberías debe entenderse como una estructura continua y deformable, cuyo comportamiento mecánico está fuertemente condicionado por las restricciones impuestas a su movimiento y por las variaciones de las condiciones operacionales.

A diferencia de otros componentes mecánicos, los sistemas de tuberías suelen estar gobernados en gran medida por condiciones de operación y desplazamientos impuestos. Dentro de esto, los cambios de temperatura, variaciones geométricas del trazado y restricciones locales inducen deformaciones que, al verse parcial o totalmente impedidas, generan esfuerzos internos significativos. Este comportamiento distingue al análisis de esfuerzos en tuberías del análisis estructural clásico, en el cual las cargas externas suelen constituir la fuente principal de sollicitación (Mohinder L Nayyar, 2000). Diversos autores especializados en ingeniería señalan que los esfuerzos térmicos desarrollados en un sistema de tuberías no dependen primordialmente de la magnitud de la variación de temperatura, sino del grado de restricción del movimiento natural del sistema (Peng & Peng, 2009).

En una condición ideal de libertad de desplazamiento, la expansión térmica puede absorberse sin inducir esfuerzos relevantes; en contraste, una restricción rígida del movimiento axial o transversal puede generar niveles elevados de tensión aún bajo condiciones de operación moderadas. La Figura 5 muestra los diferentes puntos de carga que se logran evaluar en un análisis de flexibilidad las cuales derivan desde las condiciones del entorno y del componente de diseño.

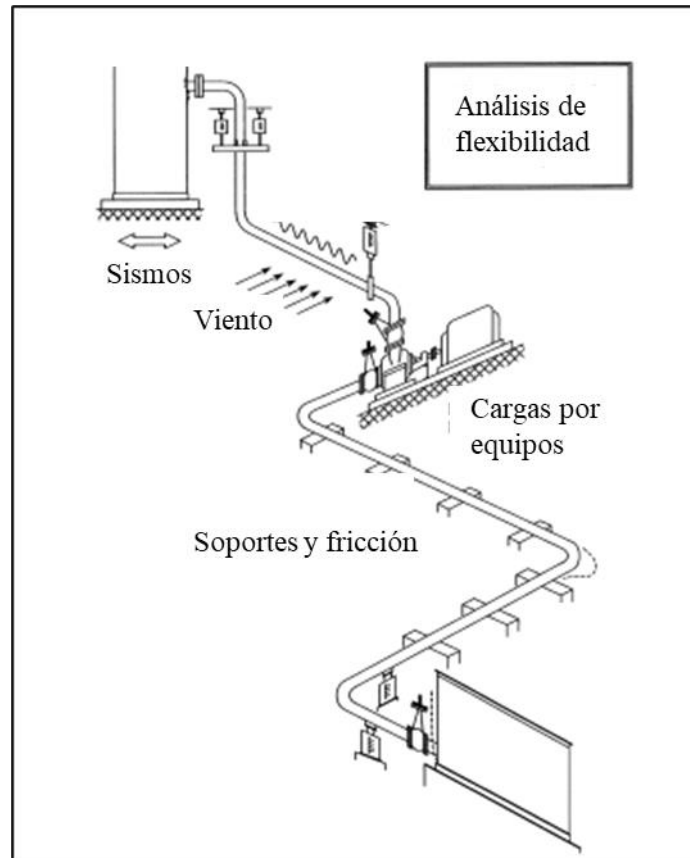


Figura 5: Tareas del análisis de estrés. (Peng & Peng, 2009)

2.2 SOPORTES Y RESTRICCIONES EN SISTEMAS DE TUBERÍAS

La respuesta estructural de un sistema de tuberías está determinada por las propiedades mecánicas del material, el espesor de pared y también por su flexibilidad global, entendida como la capacidad del sistema completo para deformarse de manera distribuida (Peng & Peng, 2009). Esta flexibilidad depende de la longitud efectiva disponible para la deformación, de la disposición geométrica del trazado, de la presencia de cambios de dirección y, de forma determinante, del tipo y la ubicación de los soportes y anclajes.

Bajo este enfoque, los soportes y anclajes no deben considerarse únicamente como elementos destinados a resistir el peso propio de la tubería, sino como elementos estructurales activos que definen las condiciones de borde del sistema. La correcta selección y disposición de estos elementos controlan los grados de libertad disponibles para la tubería, condicionan la magnitud y localización de los esfuerzos asociados a la expansión térmica y a otras acciones operacionales. Una configuración de soportación inadecuada puede introducir gradientes abruptos de rigidez, concentrando esfuerzos en zonas localizadas y dando lugar a un comportamiento estructural poco eficiente (Manufacturers Standardization Society, 2009; ASME, 2019).

Desde un enfoque funcional, los soportes se clasifican según el grado de restricción que imponen al movimiento de la tubería. Los soportes o apoyos simples restringen el

desplazamiento vertical asociado al peso, permitiendo el movimiento axial transversal, incluso la rotación libre. Son los de menor coste económico y de fácil construcción e instalación; Los soportes guiados mantienen la tubería fija evitando el movimiento radial y, dependiendo de su ancho, la rotación en ciertos puntos, dejando libre el movimiento axial; Los anclajes rígidos restringen completamente los desplazamientos y rotaciones en todas las direcciones, generan reacciones en todas direcciones.

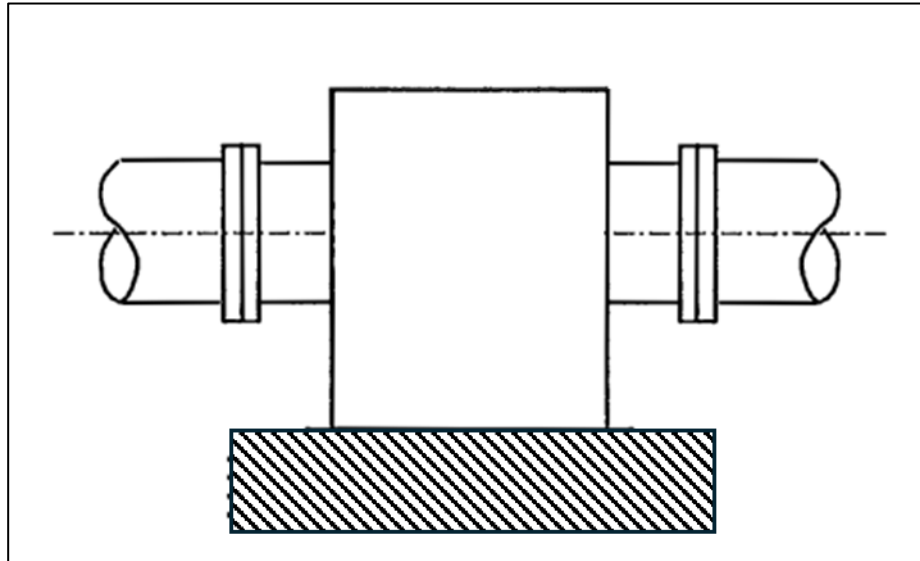


Figura 6: Representación esquemática del anclaje rígido.

En la Figura 6 se muestra el esquema que indica la implementación de un bloque de hormigón conectado a una tubería, este considera una restricción total del movimiento generando reacciones de momento y de fuerza en todos los ejes. La Figura 7 muestra la estructura de un soporte guía el cual permite el movimiento axial de la tubería, pero restringe el radial.



Figura 7: Soporte guía fabricado. (AMSI Engineer Pvt Ltd, 2020)

2.2.1 Restricción del sistema

Los principales soportes abordados en contextos minero/industrial se clasifican en anclajes, guiados y simples. Cada uno de estos, genera restricciones en la tubería. Se vio anteriormente las restricciones causadas por los distintos tipos de soporte. La manera en la que se comporta el sistema está determinada por el patrón de la ubicación de los soportes y los grados de libertad que en conjunto pueden aportar (M. W. Kellogg Company, 1956). Cuando el sistema tiene poca movilidad se denomina sobre restricción. La condición en la cual el sistema presenta un número o configuración de restricciones superior al estrictamente necesario para garantizar el equilibrio estático, sin consideración de las eventuales cargas que genera en los soportes. El control de fuerzas ejercidas por el movimiento de la tubería es la principal función del soporte. Hay casos particulares donde se enfatiza principalmente en fuerzas de empuje. Las fuerzas de empuje ejercidas por una tubería son generalmente de carácter térmico. Para la justificación de la instalación de un bloque de hormigón es cuando estas fuerzas de empuje generadas son intensamente elevadas, de hecho, el bloque actúa como mecanismo de equilibrio frente al empuje interno (Hussien, 2021). De esto se logra concluir que un sistema muy rígido a nivel de flexibilidad entrega menor esfuerzo, sin embargo, la rigidez en ciertos casos es esencial para un correcto funcionamiento.

2.2.2 Criterios para la selección de soportes en tuberías de diámetro mayor a 20"

Se conoce que el comportamiento global de la flexibilidad del sistema depende del tipo y de la interacción con los soportes. Una correcta selección de estos depende del objetivo funcional y la compatibilidad que se tiene con respecto a las demandas externas. La manifestación de criterios de selección se basa esencialmente en parámetros generales, que engloban en su mayoría un conjunto condiciones locales construidas.

A partir de esto entidades como la sociedad de manufacturación estándar, establece criterios mínimos que sirven de guía paramétrica para establecer los diseños de tubería los cuales considera la carga actuante, condiciones de movimiento, interacciones con el medio, condiciones de servicio y espaciamiento entre soportes, este último tiene un criterio más tangible el cual puede determinarse mediante un enfoque analítico basado en la teoría de vigas y la tensión máxima de flexión, o bien mediante criterios normativos prácticos como los establecidos en MSS SP-69, los cuales limitan la deflexión vertical y entregan valores orientativos de separación en función del diámetro y condición de carga. Mientras el enfoque analítico controla directamente el esfuerzo interno, el criterio MSS prioriza el desempeño en servicio y la experiencia industrial (Manufacturers Standardization Society, 2018). La Tabla 1 es resultado de ensayos empíricos expuestos por el MSS del cual, en tuberías de acero de espesor estándar según su diámetro se establecen los típicos espaciamientos que son recomendados como guía de diseño en la industria. Esto, sin embargo, siempre puede verse variado entre otras condiciones como el contenido de transporte o condiciones externas que afecten en la integridad y se necesite más restricción que lo recomendado.

Tabla 1: Espaciamiento típico recomendado de tuberías según MSS-SP69.

Diámetro	Espaciamiento típico
6"	3 – 4 metros
12"	4 – 5 metros
24"	6 – 7 metros

La ubicación estratégica de soportes permite aumentar la longitud efectiva deformable del sistema, reduciendo gradientes de rigidez y evitando concentraciones de demanda estructural. En consecuencia, la soportación en sistemas de tuberías constituye un problema de ingeniería estructural integral, donde la configuración geométrica y las condiciones de borde resultan tan determinantes como las propiedades mecánicas del material o la presión interna de operación.

2.3 FUNDAMENTO DEL ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD EN TUBERÍA

El análisis de flexibilidad constituye una disciplina consolidada dentro de la ingeniería de tuberías, cuyo desarrollo sistemático se remonta a la década de 1950, particularmente en la industria química y del petróleo. Su evolución ha estado asociada al perfeccionamiento de métodos analíticos y herramientas de cálculo orientadas a optimizar el diseño estructural de sistemas sometidos a cargas térmicas y mecánicas.

Tiene como concepto global dotar a un sistema de tubería con la capacidad de absorber deformaciones inducidas, principalmente por temperatura para que limite tensiones y reacciones excesivas en soportes y en la propia tubería. Para lograr esto, el trazado no debe ser rígido, pero tampoco debe ser innecesariamente flexible porque esto requiere más material, lo que lleva a un mayor costo (Sam Kannappan, 1986).

El fenómeno puede ilustrarse mediante el comportamiento de una barra sometida a desplazamientos restringidos en sus extremos. Cuando la dilatación térmica es impedida, se generan esfuerzos de compresión que pueden inducir inestabilidad por flexión, fenómeno análogo al comportamiento de una tubería cuyos extremos se encuentran rigidizados (Gere & Barry J. Goodno, 2009). En sistemas reales, el fluido transportado produce variaciones térmicas que inducen expansión o contracción del material; dicha deformación libre se encuentra gobernada por el coeficiente de dilatación térmica (α). Si el desplazamiento está restringido, la incompatibilidad de deformaciones genera esfuerzos internos proporcionales a la rigidez del sistema y a la variación de temperatura (Boresi et al., 2003).

La flexibilidad global de un sistema de tuberías puede incrementarse mediante distintas estrategias de diseño. Una de las más utilizadas consiste en incorporar configuraciones geométricas que permitan absorber deformaciones, como liras de expansión (Figura 8), las cuales introducen tramos curvos capaces de transformar la expansión axial en desplazamientos laterales controlados. Alternativamente, pueden emplearse juntas flexibles instaladas en puntos específicos del sistema, diseñadas para acomodar desplazamientos relativos y reducir la transmisión de esfuerzos hacia la tubería principal y los equipos conectados (Mohinder L Nayyar, 2000; Peng & Peng, 2009).

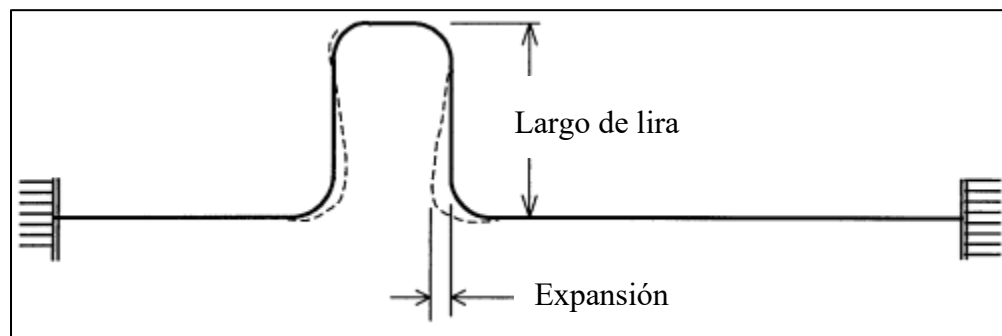


Figura 8: Lira o curva de flexibilidad.

Desde el punto de vista mecánico, el análisis de flexibilidad se sustenta en los principios de la mecánica de sólidos, particularmente en la evaluación de esfuerzos,

deformaciones y desplazamientos en elementos comparables a sistemas de vigas. La respuesta estructural de la tubería depende tanto de su geometría y propiedades mecánicas como de las condiciones de soporte y restricción impuestas.

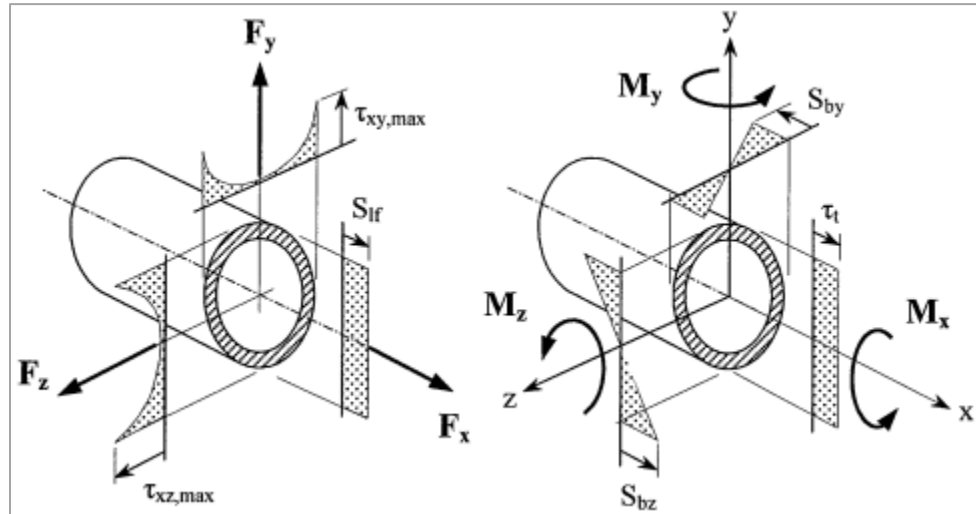


Figura 9: Disposición de los esfuerzos de tubería.

En la Figura 9 es posible encuadrar los diferentes tipos de esfuerzos asociados a la respuesta estructural natural de un sistema. Estos diagramas realzan el comportamiento de la tubería ante cargas sostenidas, es decir, de magnitud constante, como lo es el peso propio y el contenido presente.

La condición de presión interna es considerada una carga asociada también al comportamiento estructural. Es al igual que las condiciones de esfuerzo sostenido la carga que está permanentemente actuando a lo largo de la tubería.

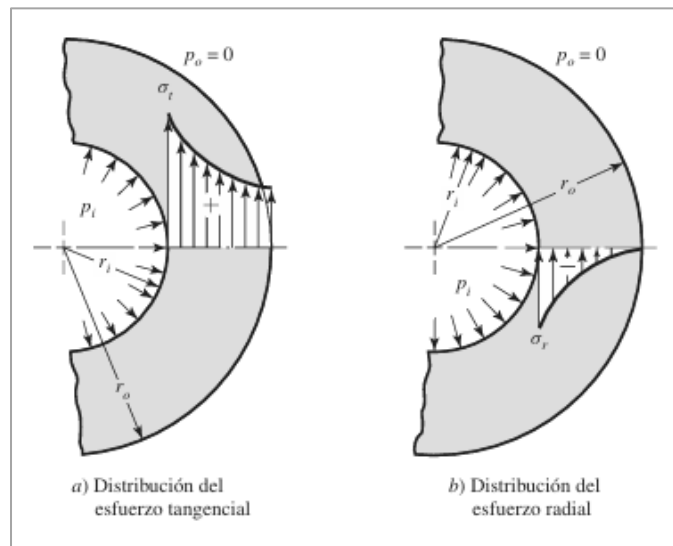


Figura 10: Condición de presión interna en recipiente de pared semi delgada.

a) distribución del esfuerzo tangencial, b) distribución del esfuerzo radial.

La Figura 10 separa en dos comportamientos la presión ejercida internamente. La distribución del esfuerzo tangencial (a) muestra como el esfuerzo axial se distribuye en la pared. La distribución del esfuerzo radial (b) muestra cómo se disipa el esfuerzo hasta llegar a la pared externa. La cuantificación de estos esfuerzos se describe mediante las ecuaciones de Lamé, las cuales permiten determinar la distribución de esfuerzos radial y circunferencial en cilindros sometidos a presión interna, en función de la presión aplicada y de los radios interno y externo del conducto (Boresi et al., 2003).

2.4 CLASIFICACIÓN DE ESFUERZOS EN EL ANÁLISIS DE TUBERÍA

Esfuerzo sostenido (SUS): Corresponde a los esfuerzos permanentes más relevantes en un sistema de tuberías. Estos derivan principalmente del peso propio, la presión interna de operación y otras cargas constantes. Tradicionalmente, muchos diseños antiguos consideraban únicamente este tipo de esfuerzos (ASME, 2019; Peng & Peng, 2009).

Esfuerzos ocasionales (OCC): Se definen como esfuerzos sostenidos que ocurren esporádicamente, generados por eventos como terremotos, viento, transitorios hidráulicos (golpes de ariete) y variaciones rápidas en el régimen del fluido. El análisis bajo esta categoría se enfoca únicamente en el componente sostenido del esfuerzo.

Esfuerzos por desplazamientos (EXP): Se originan por desplazamientos inducidos por cambios de temperatura. Estos esfuerzos son autolimitantes, ya que la expansión alcanza un máximo tras el cual se estabiliza el sistema. La magnitud de estos esfuerzos depende de la capacidad del sistema para absorber los desplazamientos sin exceder los límites de diseño.

Esfuerzos de presión interna (HOP): Estos esfuerzos son clasificados por separado porque son autolimitantes, ya que la expansión interna alcanza un máximo tras el cual se estabiliza el sistema. La magnitud de estos esfuerzos depende de la capacidad del sistema para absorber la expansión.

2.5 CARGAS SOLICITANTES

Las solicitaciones que actúan sobre un sistema de tuberías pueden clasificarse, desde el punto de vista del análisis estructural, en cargas primarias, secundarias y ocasionales, las cuales a su vez pueden tener un carácter sostenido, cuasi-estático o dinámico según su naturaleza y forma de aplicación (Mohinder L Nayyar, 2000; Peng & Peng, 2009).

2.5.1 Cargas primarias

Las cargas primarias corresponden a aquellas solicitaciones necesarias para el equilibrio del sistema y cuya magnitud no depende de la deformación de la tubería. En general, actúan de manera permanente o cuasi permanente durante la operación normal:

- **Peso propio:** incluye el peso de la tubería, accesorios, bridas, válvulas, aislamiento térmico y el fluido contenido. Estas cargas generan esfuerzos gravitacionales y deflexiones que deben ser adecuadamente controladas mediante la soportación para evitar sobreesfuerzos o deformaciones excesivas.
- **Presión interna:** produce esfuerzos circunferenciales y longitudinales en la pared de la tubería, condicionando directamente el espesor requerido y la resistencia mecánica del sistema.

- Presión externa: menos frecuente, pero relevante en tuberías enterradas, sometidas a vacío o expuestas a cargas externas, ya que puede inducir fenómenos de pandeo o colapso estructural.

Estas cargas se evalúan comúnmente como cargas sostenidas, dado que su acción es continua durante la operación.

2.5.2 Cargas secundarias

Las cargas secundarias se originan por deformaciones impuestas al sistema, principalmente asociadas a variaciones térmicas. A diferencia de las primarias, su magnitud depende de la rigidez global del sistema y de las condiciones de restricción:

- Expansión y contracción térmica: las variaciones de temperatura inducen cambios dimensionales en la tubería. Cuando estos desplazamientos están parcial o totalmente restringidos por anclajes, guías o conexiones a equipos, se generan esfuerzos térmicos. Estas cargas se consideran cuasi-estáticas, ya que los cambios térmicos suelen ocurrir de manera gradual.
- Restricciones de soportes y anclajes: la ubicación, rigidez y tipo de soportación condicionan los grados de libertad del sistema. Restricciones excesivas pueden amplificar los esfuerzos secundarios, mientras que una disposición adecuada permite disipar deformaciones mediante flexibilidad geométrica.

Este tipo de cargas se caracteriza por ser auto-limitante, ya que la redistribución de deformaciones reduce la magnitud de los esfuerzos generados (ASME, 2019; Peng & Peng, 2009).

2.5.3 Cargas ocasionales

Las cargas ocasionales corresponden a solicitaciones de baja probabilidad de ocurrencia, pero potencialmente críticas, que se consideran en combinaciones específicas de diseño:

- Carga sísmica: generada por movimientos telúricos, se evalúa como una carga ocasional.
- Viento: afecta principalmente a tuberías aéreas o elevadas, generando esfuerzos laterales y momentos adicionales que pueden comprometer la estabilidad global del sistema.
- Carga de nieve: relevante en instalaciones expuestas en zonas de climas fríos o cordilleranos, donde la acumulación de nieve incrementa las cargas gravitacionales sobre la tubería y sus soportes.
- Impactos y golpes de carga: asociados a eventos súbitos como el cierre rápido de válvulas o golpes de ariete, que generan esfuerzos transitorios de corta duración.
- Arranque, parada y descarga: cargas generadas durante condiciones no permanentes de operación, como puesta en marcha, purgas o vaciados, particularmente relevantes en líneas de gran diámetro o longitud.

2.5.4 Cargas dinámicas

Dentro de las cargas ocasionales, algunas presentan un carácter claramente dinámico:

- Vibraciones mecánicas: originadas por equipos rotativos, desbalances o resonancias estructurales.
- Vibraciones fluidodinámicas: asociadas a turbulencias, pulsaciones de flujo o cavitación, las cuales pueden inducir fenómenos de fatiga si no son adecuadamente controladas (Peng & Peng, 2009).

Esta clasificación permite identificar de forma clara el origen, la naturaleza y el tratamiento normativo de cada tipo de carga, constituyendo una base fundamental para el análisis de flexibilidad y el diseño estructural de sistemas de tuberías.

2.6 MATERIALES UTILIZADOS Y SU IMPACTO EN LA FLEXIBILIDAD

El material de la tubería influye de manera directa en la respuesta estructural de un sistema de tuberías, particularmente en lo relativo a su capacidad de deformación frente a variaciones térmicas y a la interacción con las restricciones impuestas por la soportación. En este contexto, más que la resistencia mecánica última, resultan determinantes el coeficiente de dilatación térmica y el módulo de elasticidad efectivo del material, ya que estos parámetros gobiernan los desplazamientos inducidos y la magnitud de los esfuerzos por restricción. El material con creces de mayor utilización es el acero. Las tuberías de acero al carbono presentan un comportamiento predominantemente elástico lineal, con un módulo de elasticidad elevado y un coeficiente de dilatación térmica relativamente bajo. Estas características se traducen en desplazamientos térmicos moderados para variaciones típicas de temperatura, lo que permite controlar la expansión mediante configuraciones convencionales de soportes y guías sin generar concentraciones significativas de esfuerzo.

2.6.1 La tubería de polietileno de alta densidad (HDPE)

En contraste, las tuberías fabricadas en polietileno de alta densidad exhiben un comportamiento viscoelástico, caracterizado por un coeficiente de dilatación térmica del orden de diez veces la magnitud del acero y en cuanto a propiedades mecánicas estas son dependientes del tiempo y la temperatura. De acuerdo con el Manual de tuberías termoplásticas del “Plastics Pipe Institute”, este elevado coeficiente de dilatación implica que, para una misma variación térmica, las tuberías de HDPE desarrollan desplazamientos significativamente mayores que los materiales metálicos, incrementando la demanda de flexibilidad del sistema (Plastics pipe institute, 2017). Vale analizar el comportamiento en principio del material. Es un material viscoelástico, que obedece al modelo de Maxwell para este tipo de material. En este modelo no se espera un comportamiento lineal modelado típicamente como resorte con un coeficiente de rigidez, sino un comportamiento amortiguado correspondiente a la propiedad de viscoelasticidad.

En consecuencia, el módulo de elasticidad del HDPE no es constante, sino que debe evaluarse mediante un módulo aparente o efectivo, asociado al periodo de servicio considerado. El PPI indica que, debido al fenómeno de relajación de esfuerzos propio de los materiales termoplásticos, el módulo del HDPE disminuye progresivamente con el tiempo bajo cargas sostenidas, alcanzando valores sustancialmente inferiores a los iniciales en

horizontes de diseño de largo plazo. Esta reducción del módulo efectivo implica una mayor deformabilidad del material frente a cargas térmicas y gravitacionales (Plastics Pipe Institute, 2017).

2.6.2 Consideraciones de diseño de sistemas de tubería en HDPE

Los sistemas de tubería que involucran elementos plásticos deben tener un enfoque esencial en la capacidad de resistencia por presión estática del material. Como se explica anteriormente, difiere significativamente de los componentes típicos en la construcción de tubería. Frente a la dificultad de la opción de tener un esfuerzo bien definido en tuberías de HDPE se define un parámetro como tensión de diseño hidrostática (HDS) o tensión de diseño, que se obtiene al reducir la resistencia a largo plazo del material. El HDS representa la máxima tensión circunferencial aplicable de manera continua, de la cual se logra obtener valores de referencia que permiten establecer un marco de referencia límite para el diseño con termoplásticos. Para obtener este valor se requiere también conocer las características de la tubería, de la cual depende su espesor y su presión nominal admisible. La ecuación (1) define como se evalúa el principal factor de diseño de tuberías de HDPE.

$$HDS = \frac{PR}{2(SDR - 1)} \quad (1)$$

Donde,

PR: presión nominal admisible

SDR: relación diámetro exterior/espesor

HDS: esfuerzo hidrostático [MPa]

Los valores que generalmente se asocian a tuberías utilizadas en el ámbito industrial son del tipo PE4710 que según catálogo tiene esfuerzos asociados entre 5 a 8 [MPa] (Petroflex, 2022).

No solamente existe una diferencia entre resistencia mecánica también lo es su capacidad de expandirse térmicamente. Una prueba de la diferencia entre materiales es demostrable teóricamente cuando dos materiales diferentes son unidos. La Figura 11 ilustra una unión simple entre dos materiales con propiedades mecánicas distintas donde a la temperatura ambiente se denota que están alineadas (línea puntada), sin embargo, ante un aumento de temperatura, uno de los materiales tiende a expandirse una cantidad Δa y el otro Δb ; la compatibilidad geométrica impide que ambas deformaciones se desarrollen libremente, generándose reacciones internas equivalentes a una fuerza axial P y un momento M_0 en la sección de transición.

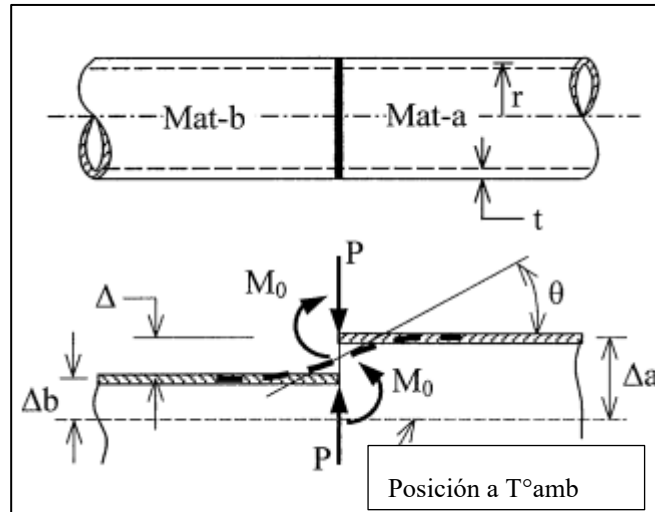


Figura 11: Discontinuidad del estrés en un cambio de material

Esto es llamado discontinuidad de esfuerzo. Cuando dos tuberías de distinto material están unidas, se produce una discontinuidad de tensiones asociada a diferencias en el coeficiente de expansión térmica, el espesor y el módulo de elasticidad, lo cual contempla un criterio a considerar en el diseño de sistemas (Peng & Peng, 2009).

En la consideración de distintos materiales al acero, expuestos a restricciones se tiene un ejemplo, donde, se enfatiza que el diseño de bloques de anclaje en sistemas de HDPE debe considerar explícitamente el comportamiento viscoelástico del material (Stewart et al., 2022). El documento señala que una restricción excesivamente rígida puede modificar el estado tensional previsto, inducir concentraciones locales de esfuerzos y alterar el desempeño a largo plazo del sistema, especialmente en zonas de transición o conexión con materiales de mayor rigidez. La combinación de un alto coeficiente de dilatación térmica y un módulo aparente reducido hace que las tuberías de HDPE sean particularmente sensibles a configuraciones de soportación rígidas. Cuando el movimiento térmico natural del material se ve restringido por anclajes o soportes guía, los desplazamientos inducidos no pueden desarrollarse de forma distribuida, generándose concentraciones de deformación y aumentando las demandas estructurales en los tramos adyacentes.

En consecuencia, el uso de HDPE en sistemas se debe tener en consideración, parámetros de resistencia, de conexiones y restricciones lo que implica un desafío asociado a la compatibilidad de deformaciones y a la gestión de la flexibilidad global del sistema, aspecto que debe ser considerado explícitamente en el diseño y análisis estructural de líneas de tuberías que incorporen materiales termoplásticos.

2.7 FUNDAMENTACIÓN NORMATIVA DEL ANÁLISIS

La construcción de sistemas además de criterios de diseño debe tener una base técnica que contemple una instalación segura y eficiente, sin embargo, debido a la ausencia de normativa nacional específica para el diseño estructural y mecánico de sistemas de tuberías, resulta habitual recurrir a normativas de carácter internacional ampliamente aceptadas en la

ingeniería. Entre ellas destaca el conjunto de códigos *ASME B31*, los cuales establecen los lineamientos de cálculo, diseño, construcción y análisis de esfuerzos para diversos tipos de transporte de fluidos. Estos códigos abarcan desde sistemas de alta presión, aplicaciones industriales generales, hasta líneas de transporte a gran escala. Un código específico de diseño da cuentas de cómo debe comportarse un sistema acorde al alcance de la normativa. La normativa específica adoptada corresponde a la normativa *ASME B31.4 “Pipeline transportation systems for liquid and slurries”*

2.7.1 Alcance de la norma ASME B31.4

La norma *ASME B31.4* establece los requisitos de diseño, construcción, operación, inspección, prueba y mantenimiento para sistemas de tuberías destinados al transporte de líquidos y suspensiones de sólidos en fase líquida, considerando la seguridad de las personas, la protección de los activos físicos y la prevención de daños al medio ambiente.

El ámbito de aplicación de esta normativa comprende los sistemas de tuberías utilizados para el transporte intermedio y de largo alcance de diversos fluidos, abarcando las siguientes etapas de proceso:

Áreas de aplicación: conexión entre campos de producción, instalaciones de procesamiento primario, estaciones de bombeo, terminales de almacenamiento y distribución, refinerías, terminales marítimos, ferroviarios, transporte por carretera y redes de distribución entre plantas industriales y estaciones de medición o regulación.

Tipos de fluidos contemplados: hidrocarburos líquidos (petróleo crudo, condensados, líquidos de gas natural, dióxido de carbono (incluyendo su transporte en estado supercrítico), alcoholes líquidos, aguas de producción, biocombustibles y *Slurries* de materiales no peligrosos (carbón, minerales, concentrados y otros sólidos transportados como suspensiones líquidas).

Componentes y elementos incluidos en el alcance: elementos de contención de presión: válvulas, bridas, juntas, pernos, empaques, dispositivos de alivio de presión y accesorios, sistemas de soportación y anclajes vinculados estructuralmente al sistema de tuberías.

En términos generales, *ASME B31.4* se orienta el diseño de tuberías de *pipelines* (tubería de largas distancias), gran diámetro, pocos accesorios dentro del diseño y condiciones de interacción con el suelo y otros materiales.

2.7.2 Clasificación de esfuerzos según ASME B31.4

La definición previa establecida por la normativa corresponde a la de tubería restringida o no restringida. Los criterios de esfuerzo admisible se adecuan según el tipo de restricción. Según la normativa la tubería sin restricción corresponde a aquella libre de desplazarse lateral y axialmente. En cambio, una tubería restringida correspondería a una tubería enterrada o anclada por soportes rígidos.

Los esfuerzos permisibles establecidos por la norma se establecen bajo el comportamiento del acero. Basa principalmente su comportamiento en el esfuerzo de fluencia del material. Solo evalúa los esfuerzos producidos en acero.

En primer lugar, establece el límite en el esfuerzo circunferencial por presión interna. La norma establece el esfuerzo permisible según la ecuación (2).

$$S = 0,72 E_j (SYMS) \quad (2)$$

Donde 0,72 es el factor de diseño por norma, E_j el factor específico de soldadura y el mínimo esfuerzo de fluencia específico *SYMS* por sus siglas en inglés. El factor de soldadura se encuentra tabulado.

Esfuerzo longitudinal por cargas sostenidas

El criterio de tubería restringida considera el cálculo del esfuerzo como la ecuación (3)

$$SL = SE + \nu SH + \frac{M}{Z} + \frac{F}{A} \quad (3)$$

Donde,

A: es el área de la sección transversal de la tubería [mm^2]

F: fuerza axial impuesta [N]

M: momento flector [N.m]

SE: expansión térmica [MPa]

SH: esfuerzo circunferencial [MPa]

Z: Módulo de la sección [cm^3]

ν : relación de Poisson

Para una tubería no restringida el cálculo se define según la ecuación (4)

$$SL = \frac{PD}{40t} + \frac{M}{Z} + \frac{F}{A} \quad (4)$$

Donde,

P: es la presión interna [MPa]

D: el diámetro [mm]

T: el espesor [mm]

En ambos casos se establece un criterio de aceptación donde se mantiene el esfuerzo de fluencia del material en un 80% de su capacidad, queda definido como $SL < 0,80 Sy$.

Esfuerzo por expansión térmica

También se hace la diferencia entre los criterios. La tubería restringida establece el cálculo como se muestra en la ecuación (5).

$$S_E = E\alpha(T_2 - T_1) \quad (5)$$

Por el otro lado, en la tubería no restringida se calcula el rango según la ecuación (6)

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} \quad (6)$$

El límite establecido para la tubería sin restricción corresponde a una fórmula que contempla cargas cíclicas. Se define según la ecuación (7)

$$S_A \leq f [1.25 (S_C + S_h) - S_L] \quad (7)$$

Donde f es el factor de fatiga, 1.2 para materiales ferrosos y 1 para otros materiales, S_c el menor entre $1/3 S_u$ o $2/3 S_y$ a la mínima temperatura de operación, S_h el menor entre $1/3 S_u$ o $2/3 S_y$ a la temperatura máxima de operación, S_u es el esfuerzo último y S_y el esfuerzo de fluencia. Sin embargo, se logra obtener un valor más conservador basándose en la combinación de ambos criterios, es decir, la combinación de restringido y no restringido. Esta toma valores cercanos al 90% del S_y por lo que la expresión para el valor límite del esfuerzo por expansión térmica se define $S_E < 0,9 S_Y$.

Esfuerzo por cargas ocasionales

El límite del esfuerzo ocasional no evalúa la restricción de la tubería por separado sino más bien considera la adición de carga en el esfuerzo sostenido longitudinal se considera como un 80% del esfuerzo de fluencia del material como muestra la ecuación (8).

$$S_{occ} = 0.9 SYMS \quad (8)$$

Criterios adicionales a la combinación por deformación

Cuando es posible anticipar los movimientos no cíclicos, por ejemplo, de asentamientos entre soportes, la normativa permite controlar en base a un límite de deformación longitudinal con un máximo del 2% del largo entre soportes.

2.7.3 Criterios de compatibilidad con materiales termoplásticos

En ausencia de una implementación directa de la librería de materiales no metálicos en la normativa, los *softwares* de análisis carecen de una referencia exacta hacia las tuberías termoplásticas, diversos autores han justificado el uso de códigos metálicos como aproximación metodológica, siempre que exista equivalencia en las expresiones de cálculo de esfuerzos y se incorporen adecuadamente las propiedades dependientes del tiempo del material termoplástico. Fathi (2023) demuestra que las formulaciones de esfuerzos sostenidos, ocasionales y por expansión térmica definidas en ASME B31.1 “*Power piping*” presentan una estructura matemática análoga a las establecidas en ASME NM.1, código de diseño para tuberías no metálicas permitiendo su utilización como marco de cálculo, siempre que se ajusten correctamente parámetros como el módulo elástico aparente, el coeficiente de expansión térmica y los esfuerzos admisibles propios del HDPE. Este enfoque conserva coherencia estructural en la evaluación de esfuerzos, manteniendo el criterio de comparación frente a tensiones admisibles específicas del material no metálico. (Fathi, 2023).

El criterio adoptado en este estudio se fundamenta en esa compatibilidad estructural de las ecuaciones de esfuerzo, extendiendo el mismo principio al marco de ASME B31.4, código aplicable a sistemas de transporte de fluidos. La validez del enfoque no radica en asumir equivalencia material entre acero y HDPE, sino en reconocer que las expresiones de esfuerzo longitudinal, de expansión y combinado conservan la misma forma general, siendo el parámetro diferenciador el valor de las tensiones admisibles y el módulo de elasticidad utilizado en el análisis.

Para obtener una referencia se toma en cuenta la definición de presión nominal de la tubería o *pressure rating* (PR). Este valor se determina según lo establecido por el fabricante, según el espesor de pared de la tubería y su densidad. El factor definido anteriormente HDS depende del PR por lo que para una referencia de diseño se establece que el límite para cargas de presión interna como la ecuación (9)

$$S_{adm} = HDS \quad (9)$$

Donde,

HDS: la presión estática de diseño [MPa] (se establece en la nomenclatura del material, una tubería de HDPE PN10 tiene una presión de resistencia estática de 10 [bar])

Por otro lado, en los esfuerzos térmicos se espera una alta deformación lineal y esfuerzos según el grado de restricción, se define en la ecuación (10)

$$S_E = 1,3 S_{adm} \quad (10)$$

Donde, el valor de 1,3 se considera como un valor conservador dentro de los rangos permisibles en este tipo de material.

Ante esta referencia se considera el criterio complementario ante la deformación adoptado según ASME B31.4 donde, limita la deformación a un 2% de la longitud soportada. El cual establece una conexión mas directa con la norma.

CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

El presente estudio adopta un enfoque metodológico numérico y comparativo, orientado a evaluar el comportamiento estructural del sistema de tuberías mediante análisis de flexibilidad conforme a los criterios establecidos por la norma ASME B31.4. Con el fin de asegurar la consistencia y la comparabilidad de los resultados, todas las configuraciones analizadas se someten a idénticas condiciones de carga, para tener un punto de comparación genérico para cada uno de los modelos analizados y visualizar el comportamiento de cada uno ante las cargas solicitadas. Cada modelo cumple el objetivo de complementar el general, principalmente en la identificación de zonas y cargas en que la tubería se considere en condición crítica o desfavorable en condiciones normales. Luego, la comparación por modelo busca tener una base técnica sólida que respalde cada decisión tomada en el análisis del modelo de soportación optimizado y tenga una correcta justificación técnica.

3.2 DEFINICIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS

La modelación considera 2 puntos de base comparativa, la configuración inicial, que corresponde a la línea sin ninguna modificación, es decir, la disposición de la tubería en su diseño basal; y la configuración actual, que corresponde a la línea que establece una solución a la problemática que define a la configuración inicial.

Luego, se realiza una configuración de alternativa que contempla una posible optimización en los esfuerzos y costos en comparación de los dos modelos anteriores. La Tabla 2 resume el propósito de cada modelo en cuestión.

Tabla 2: Definición del propósito del modelo analizado.

Modelo	Propósito
Configuración inicial/original	Diagnosticar
Configuración actual	Validación de solución
Configuración rediseñada	Proponer optimización

3.2.1 Configuración inicial

El estudio contempla el estudio de la línea principal de 24 pulgadas construida en el inicio del contexto. El pertinente análisis inicial sirve como base comparativa y validación a los modelos siguientes, dando margen de recursos al punto de análisis del sistema alternativo. Además, permite identificar los elementos y/o zonas que se necesitan mayor evaluación estructural.

La línea inicia con una conexión a una matriz de 800 [mm] de diámetro. Ascende siguiendo la geometría de la planta a través de curvas, soportes y conexiones. La Figura 12 muestra el modelo en tres dimensiones que contempla la conexión a la línea matriz. Línea matriz fuera del alcance del análisis.

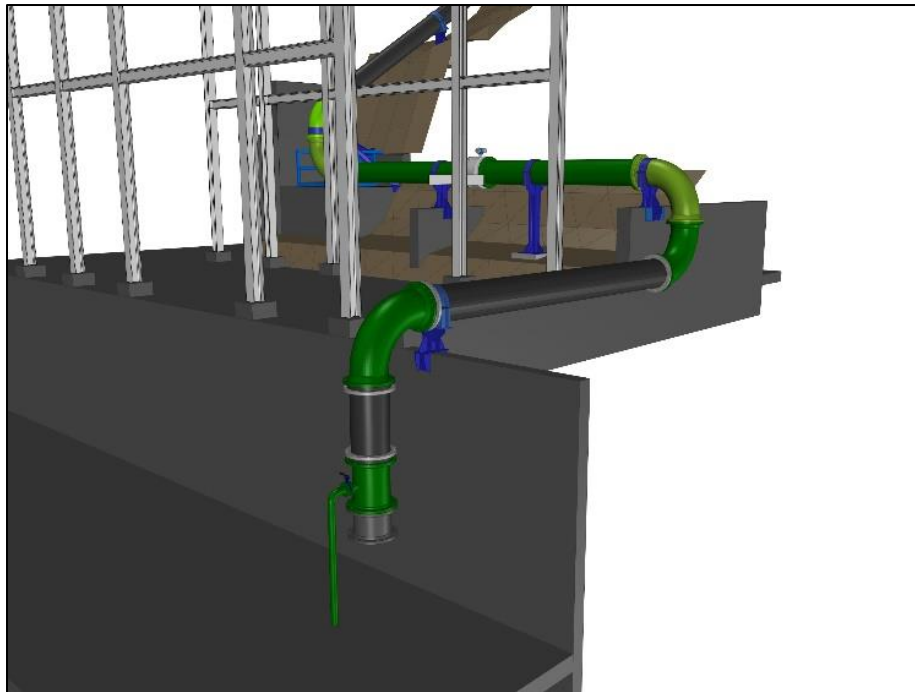


Figura 12: Vista isométrica de la conexión.

La línea continua se instala a la ladera del talud, manteniendo una geometría recta hasta el ascenso por el cerro. La Figura 13 muestra la soportación y el diseño de la línea a través de la ladera del talud, indicando ubicación de soportes y elementos de conexión y monitoreo. Posteriormente toma verticalidad para subir por la inclinación del terreno, la Figura 14 permite la visualización de la conexión al bloque de hormigón continuando la trayectoria hasta la bifurcación reductiva de 14" de la cual asciende por una estructura metálica. También es posible apreciar la ubicación de los elementos reemplazados en el modelo posterior.

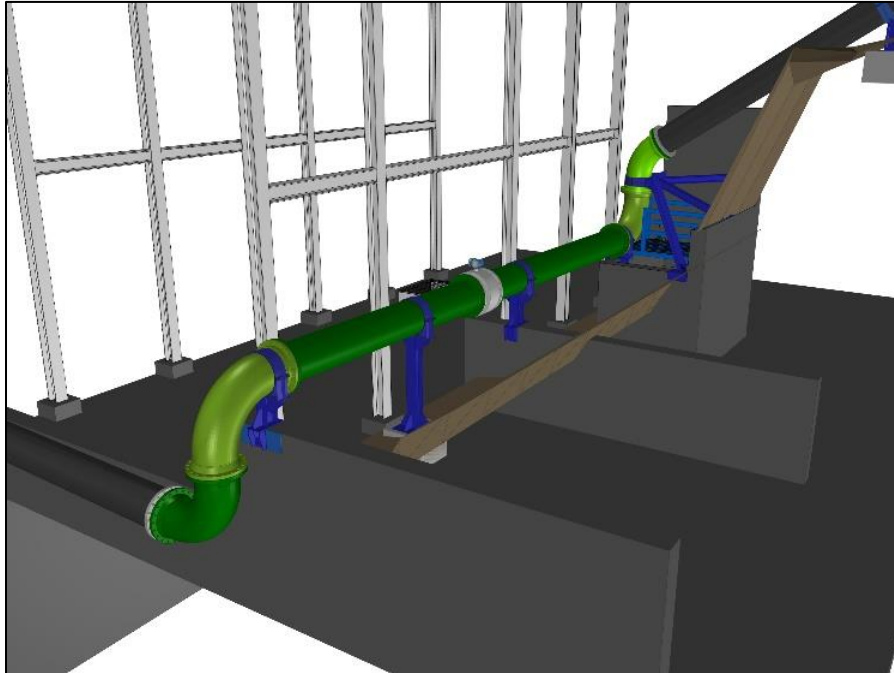


Figura 13: Vista isométrica del modelo.

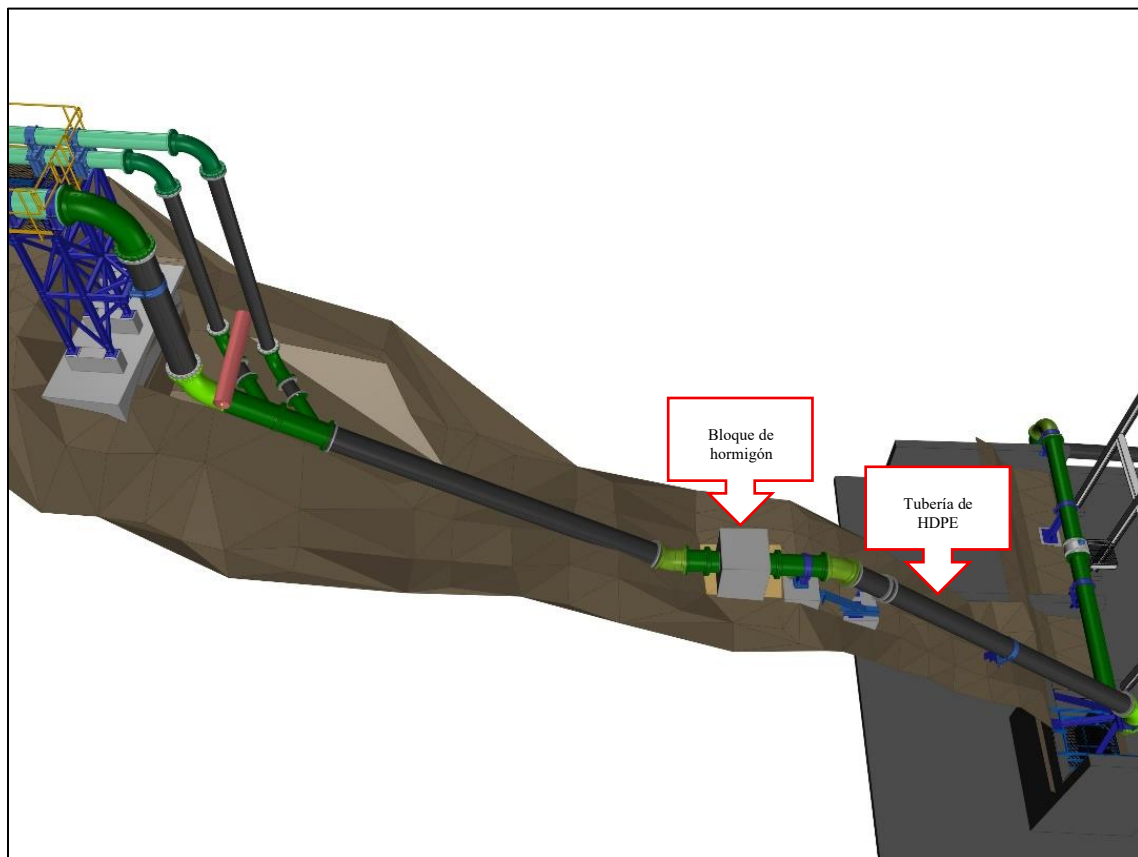


Figura 14: Configuración inicial del tramo comprendido por la tubería.

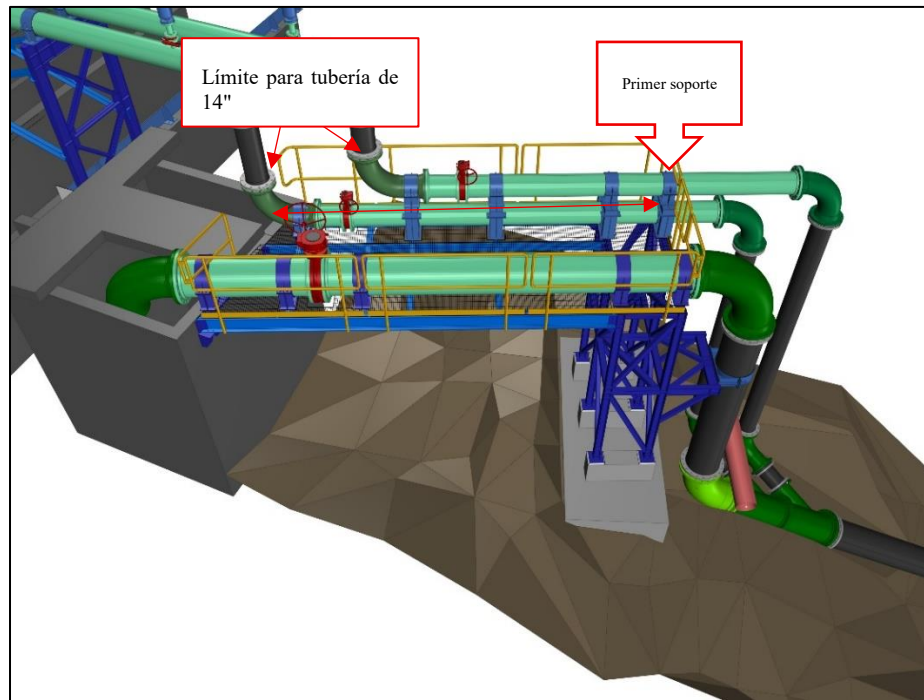


Figura 15: Modelo del tramo aguas arriba al bloque de hormigón.

Finalmente, la Figura 15 muestra la geometría superior del modelo, además del límite de análisis para la bifurcación en 14" quedando fuera del análisis global. Se estima que los efectos producidos por las líneas de menor envergadura son considerables hasta 5 [m] posteriores al primer soporte indicado en la figura, luego de esa distancia los efectos estructurales de la línea se pueden obviar ya que no implican una cantidad relevante.

3.2.2 Modelado de la configuración actual

La modelación de las condiciones actuales representa el cambio ejecutado en la línea. La configuración actual comprende un parámetro de comparación y validación para el modelo de solución y alternativa. La Figura 16 muestra el cambio de los elementos considerados críticos de la línea antes del análisis de esfuerzo, estos cambios corresponden al reemplazo de la tubería de HDPE por una tubería de acero y una junta flexible, sin la consideración de reemplazo o cambio de soportes.

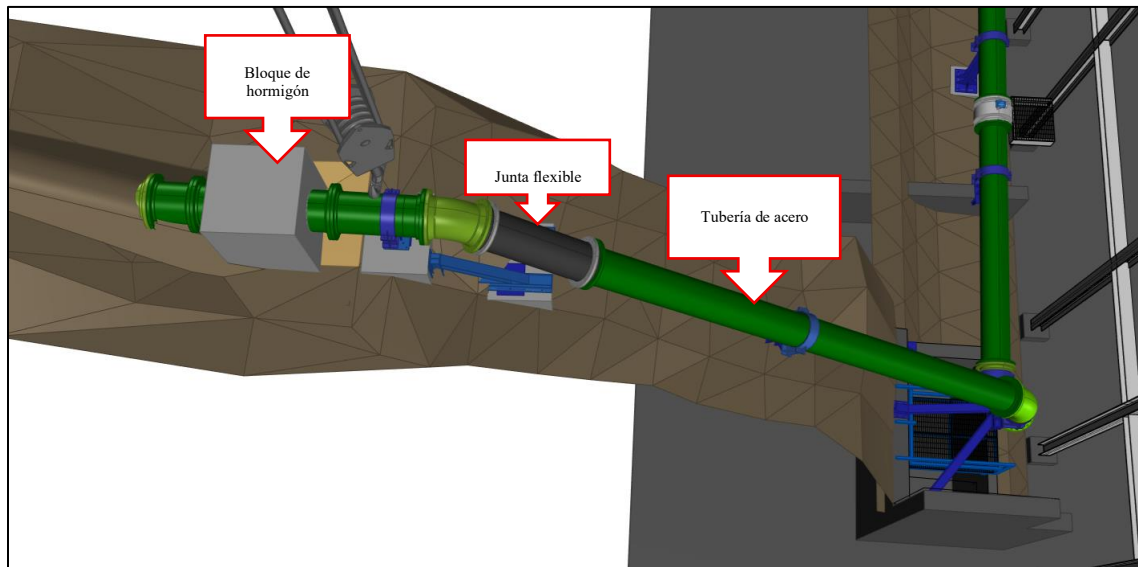


Figura 16: Esquema del tramo sustituido.

3.2.3 Configuración alternativa de soportes

Se da énfasis en el comportamiento de la tubería de 24 pulgadas ante los efectos de la eliminación de soportes. La identificación de zonas críticas en los modelos anteriores tiene el objetivo de acortar el análisis a zonas donde sea pertinente realizar cambios. Se espera un proceso iterativo entre cambios de posición y eliminación de soportación necesaria. En un principio no se establece un diseño funcional, este evolucionará en cuanto se analicen los modelos anteriores. Este modelo tendrá más relevancia en la sección de discusiones debido a la justificación por resultados obtenidos para seleccionar la configuración óptima en cuestión de esfuerzos y coste. También, la utilización de soportes extra en caso de ser necesario se utiliza los elementos de más bajo coste y estándar de construcción.

3.3 SUPUESTOS Y SIMPLIFICACIONES CLAVE

Algunos de los supuestos que se consideran en el análisis son principalmente:

- Régimen estacionario. El flujo interno de la tubería se considera en todo momento invariante en el tiempo, lo que refleja una condición sostenida en las cargas consideradas de operación. Un régimen transitorio, sin embargo, es evaluado como sobre presión en la línea en un determinado límite de tiempo.
- Bloque como anclaje rígido ideal. La condición de anclaje ideal se justifica por la rigidez del bloque, que en cuestiones generales es lo suficientemente rígida para limitar el movimiento total de la línea.
- Conexión a matriz rígida. Se considera la conexión rígida debido a la construcción de esta, considerando que siempre mantendrán una diferencia de temperatura idéntica y la línea no considera su peso total sobre la matriz.
- Límite en los efectos de fatiga. No se consideran efectos de fatiga por cargas cíclicas, bajo el supuesto de que el sistema opera mayoritariamente en condiciones estables,

con variaciones térmicas lentas y sin excitaciones dinámicas repetitivas de alta frecuencia.

- Análisis sísmico pseudo estático. La acción sísmica se modela mediante un enfoque pseudoestático equivalente, aplicando coeficientes de aceleración derivados de la normativa nacional vigente.
- Soportes idealizados como restricciones lineales. Los soportes se modelan mediante restricciones ideales (simple, guiada o anclada), sin considerar deformaciones locales de los elementos de apoyo ni la flexibilidad estructural de la obra civil asociada.

3.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

El diseño del modelo contempla dos clases de material para las tuberías, acero y HDPE, ambos presentan sus propiedades características definidas según normativa y para el caso del termoplástico definidas según catálogo.

3.4.1 Tubería acero ASTM A-53 Gr B.

Características del material:

- Diámetro nominal: 24 [in]
- Diámetro externo: 609.6 [mm]
- Espesor: STD 9.525 [mm]
- Densidad: 7388 [kg/m³]
- Relación de Poisson: 0.3 [mm/mm]
- Peso lineal: 255.43 [kg/m]
- Esfuerzo de fluencia: 241 [MPa]
- Módulo de elasticidad: 200 [GPa]
- Coeficiente de expansión térmica (α): 11.7 E-6 [mm/mm° C]

3.4.2 Tubería de HDPE PE100

Características del material:

- Diámetro nominal: 630 [mm]
- Espesor nominal PN 10: 37,4 [mm]
- Relación de Poisson: 0,45
- Densidad: 967 [kg/m³]
- Módulo de elasticidad aparente: 0,15 [GPa] 50 años de servicio.
- Módulo de elasticidad: 1.2[GPa]
- HDS : 8 [MPa]
- Coeficiente de expansión térmica (α): 1.2 E-4 [mm /mm °C]

3.5 SOPORTES Y RESTRICCIONES

3.5.1 Especificación técnica de los soportes reales

La soportación utilizada en la construcción es definida en soportes estándar y no estándar. En toda la línea se utiliza solo un tipo de soporte estándar, este corresponde a un soporte de abrazadera o anillo guía de diámetro 24". La Figura 17 muestra el diseño real del

soporte. En general este varía en su tamaño, pero no en la forma en la que se ajusta a la tubería, “abrazándola” y restringiendo su movimiento radial. Esta es la forma básica del soporte utilizado en la construcción del sistema.



Figura 17: Soporte de anillo guía.

En la parte de soportes fuera del estándar y de construcción más compleja se ubica el bloque o machón de hormigón. Este como es especificado anteriormente se ubica en la pendiente del talud soportando el total de la tubería y generando restricción total de movimiento. La Figura 18 enfoca la ubicación de un soporte simple junto al bloque, mostrando la ubicación real de las restricciones del sistema.



Figura 18: Soportación de la línea.

La Figura 19 representa la soportación del punto de ascenso por la ladera del cerro. Este soporte tiene una configuración similar a la estándar con la diferencia que tiene tres pilares continuos a él reforzando su integridad estructural. Este soporte genera una guía de

avance del codo de la tubería haciendo una restricción radial ante eventos de dilatación y contracción térmica.

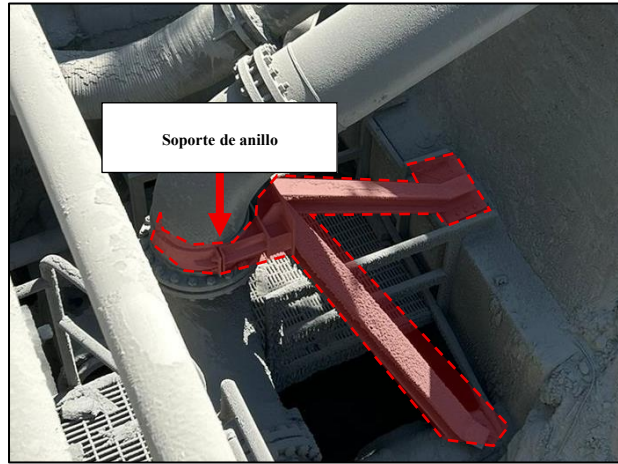


Figura 19: Soporte base de la línea.

La estructura metálica alineada a la línea se considera como soporte estructural pero no se considera una incidencia representativa en la línea más que otorgar estructura física a los soportes sobre esta. La Figura 20 constituye la construcción de la plataforma donde se logra identificar la soportación que corresponde sobre ella.



Figura 20: Estructura soporte de entrada al cajón de reparto.

3.6 CARACTERIZACIÓN DE CARGAS

3.6.1 Cargas primarias

La Tabla 3 resume las cargas primarias consideradas en el análisis, las cuales corresponden a solicitaciones de carácter sostenido necesarias para el equilibrio del sistema.

Estas cargas actúan de manera permanente durante la operación normal de la línea y constituyen la base para la evaluación de los esfuerzos longitudinales asociados al peso propio de la tubería, el fluido contenido y la presión interna de operación y diseño.

Tabla 3: Cargas aplicadas a la tubería.

Carga	Descripción	Valor
GR	Peso propio (cañería + fluido)	-
P1	Presión de operación	0.4 [MPa]
P2	Presión de diseño	0.69 [MPa]

3.6.2 Cargas secundarias

La Tabla 4 presenta las cargas secundarias incorporadas en el modelo, asociadas principalmente a las variaciones de temperatura de la tubería. Estas solicitaciones generan desplazamientos impuestos que, al verse restringidos por la configuración de soportes y anclajes, inducen esfuerzos térmicos de carácter autolimitante, cuya magnitud depende directamente de la flexibilidad global del sistema.

Tabla 4: Cargas aplicadas a la tubería.

Carga	Descripción	Valor
T1	Temperatura operación	25°
T2	Temperatura de diseño	T1 + 10°
T3	Temperatura mínima	1°

3.6.3 Cargas ocasionales

La aceleración de la carga sísmica es resultado de la ubicación, el coeficiente de importancia y el tipo de estructura estos valores son extraídos de la normativa nacional NCh2369. La Tabla 5 muestra los valores extraídos de la normativa nacional para la estimación de los coeficientes de carga sísmica estática, según la tabla, los factores que considera la norma se presentan desde la instalación del sistema analizado, el tipo de suelo de la zona, el coeficiente de aceleración por zona, los coeficientes de amortiguamiento, el valor de la respuesta según el tipo de estructura y el coeficiente de importancia. Estos parámetros se visualizan directamente en las tablas específicas de la normativa y según lo que establece, son suficientes para estimar las cargas por cargas sísmicas sin la necesidad de un análisis de espectro dinámico. (Instituto Nacional de Normalización (INN), 2003)

Tabla 5: Estimación de coeficiente sísmico.

Factores de carga sísmica	Descripción	Valor
Zona sísmica	De especificación técnica	2
Tipo de suelo III	De especificación técnica	Limo arcilloso
A ₀ , Aceleración efectiva máxima	De tabla 5.2	0.3g
Coeficiente de amortiguamiento de estructura	De tabla 5.5	0.02
R, valor máximo de respuesta	De tabla 5.6 (otras estructuras)	3
I, coeficiente de importancia C2	De 4.3.2	1.00
C coeficiente sísmico	De 5.7	0.30

Los resultados definidos por la normativa se muestran en la Tabla 6 donde se muestra el valor a utilizar del coeficiente de aceleración y la especificación por carga de cada uno de los valores. Se aplica un coeficiente Y proporcional establecido por la norma como 2/3 de la carga horizontal, esto debido a la definición de ondas de propagación que establece.

Conforme a lo determinado en el punto 5.1.1 de la norma NCh2369, se establece que el sismo vertical debe tomarse o no en cuenta cuando las cargas permanentes, como el peso propio y el peso del producto, superen el 75% de las cargas totales sobre los equipos evaluados.

Tabla 6: Coeficientes de carga sísmica

Carga	Descripción	Valor
E1	Carga sísmica horizontal en la dirección X	0,30 g
E2	Carga sísmica horizontal en la dirección Y	0,20 g
E3	Carga sísmica horizontal en la dirección Z	0,30 g

3.7 COMBINACIÓN Y APLICACIÓN DE CARGAS

3.7.1 Combinación de Cargas

La Tabla 7 presenta las combinaciones de carga adoptadas para el análisis, definidas de acuerdo con los lineamientos de la norma ASME B31.4. Estas combinaciones integran de forma coherente las cargas primarias, secundarias y ocasionales, y constituyen la base para la evaluación comparativa de los esfuerzos sostenidos, térmicos y ocasionales en los distintos modelos analizados.

Tabla 7: Combinación de cargas

Id. caso carga	Combinación de carga	Tipo carga
GR	GR	SUS
Amb to T2	GR+T2	EXP
Amb to T3	GR+T3	EXP
GT1P1	GR+T1+P1	OPE
GT2P2	GR+T2+P2	OPE
GT3P3	GR+T3+P1	OPE
GT1P1+E1	GR+T1+P1 + E1	OPE + OCC
GT1P1+E2	GR+T1+P1+E2	OPE + OCC
GT1P1+E3	GR+T1+P1+E3	OPE + OCC
GT1P1-E1	GR+T1+P1-E1	OPE + OCC
GT1P1-E2	GR+T1+P1-E2	OPE + OCC
GT1P1-E3	GR+T1+P1-E3	OPE + OCC

3.8 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

El análisis se estructura en función de un conjunto de criterios que permiten comparar de forma objetiva las alternativas.

3.8.1 Cumplimiento normativo

Cada configuración se evalúa verificando que los esfuerzos resultantes en la tubería se mantengan dentro de los límites permisibles establecidos por la norma ASME B31.4, distinguiendo entre esfuerzos sostenidos longitudinales (SUS), de expansión (EXP) y



ocasionales (OCC). La alternativa se considera aceptable únicamente cuando las relaciones de utilización $\sigma_{\text{diseño}}/\sigma_{\text{permisible}}$ se mantienen menores a 1,0 en los tramos críticos y se preserva un margen razonable de seguridad respecto del esfuerzo de fluencia del material.

3.8.2 Distribución de reacciones en soportes y anclajes

La modificación de la soportación se evalúa analizando la magnitud y distribución de las reacciones en los soportes, en especial en los anclajes rígidos y en los apoyos ubicados sobre obra civil de hormigón. Se enfatiza en aquellos soportes que presentan una carga encima del promedio, dando así un control mas específico en las zonas donde el soporte o los soportes se ven exigidos por las condiciones del sistema.

3.8.3 Control de desplazamientos

Las configuraciones propuestas se comparan en función de los desplazamientos máximos obtenidos en las zonas curvas (codos). Se busca minimizar la carga generada por la expansión térmica o las condiciones operativas evitando desplazamientos excesivos que comprometan la estabilidad del sistema o la integridad de los componentes.

3.8.4 Constructibilidad y costo asociado a la soportación

La evaluación técnica se complementa con un análisis cualitativo de constructibilidad y costo. Se priorizan soluciones que permitan reducir el volumen y complejidad de las estructuras de hormigón, que utilicen tipos de soporte estándar disponibles en obra y que minimicen la necesidad de intervenciones de alta complejidad en el talud. Las alternativas que requieren menos modificaciones estructurales, menor tiempo de montaje y un número acotado de nuevos soportes se consideran más favorables, siempre que mantengan el cumplimiento de los criterios estructurales anteriores.

CAPÍTULO 4 : RESULTADOS

4.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN INICIAL

La construcción del modelo se basa en los planos presentados en el anexo y se ajustan según el modelo 3d. Los elementos asociados se encuentran también desarrollados en los planos. El peso estimado según los planos de construcción es de 22.8 toneladas, por otro lado, el peso estimado según las bibliotecas de AutoPIPE 23.6 toneladas de peso muerto, es decir, un 3% mayor que el estimado en base a los planos; los soportes estándar son un total de 13 y dos son no estándar; hay un total de 6 codos en 90°, uno en 53°, dos en 25° y uno en 63°; dos bifurcaciones reductivas a 14"; un flujómetro y una válvula de cierre en guillotina.

En representación del modelo la Figura 21 y la Figura 22 muestran el desarrollo de la línea por sobre el bloque identificando tramos de tubería termoplástica, el bloque de hormigón y la bifurcación en 14"; En verde se muestran los soportes de la línea y en amarillo las conexiones bridadas; El bloque es representado por dos anclajes rígidos que simulan la fijación de la tubería con respecto a la estructura. En anaranjado se representa las vigas que componen la estructura metálica que da soporte a las líneas; La válvula es representada por un tramo de tubería rígida debido a que no existe en las librerías una válvula con las dimensiones en el modelo 3d, con un largo de apenas 200 [mm] entre bridas.

Luego, la Figura 23 y la Figura 24, cumplen el mismo objetivo mostrando la parte inferior al bloque, tomando en representación y de la misma forma que la válvula un flujómetro de rigidez mucho mayor a la de tubería de acero considerando un ancho de 600 [mm]; Se identifica la conexión a la matriz con una conexión rígida como es mencionado anteriormente.

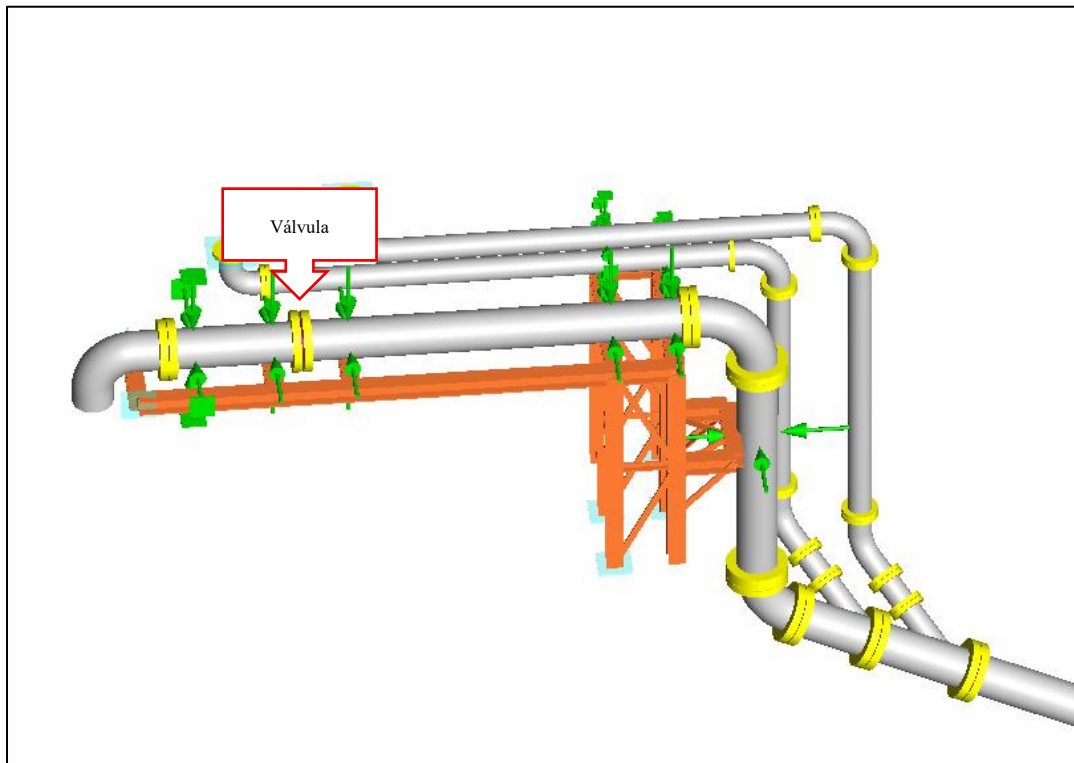


Figura 21: Representación del tramo superior del modelo.

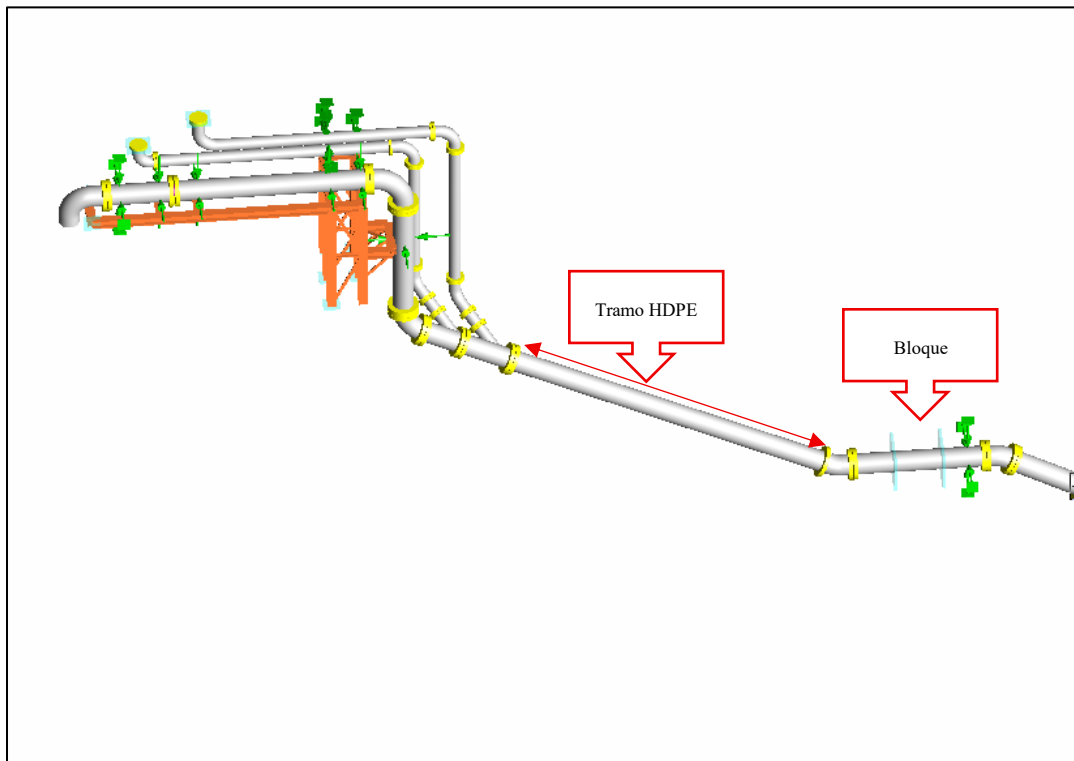


Figura 22: Representación completa del tramo superior del modelo.

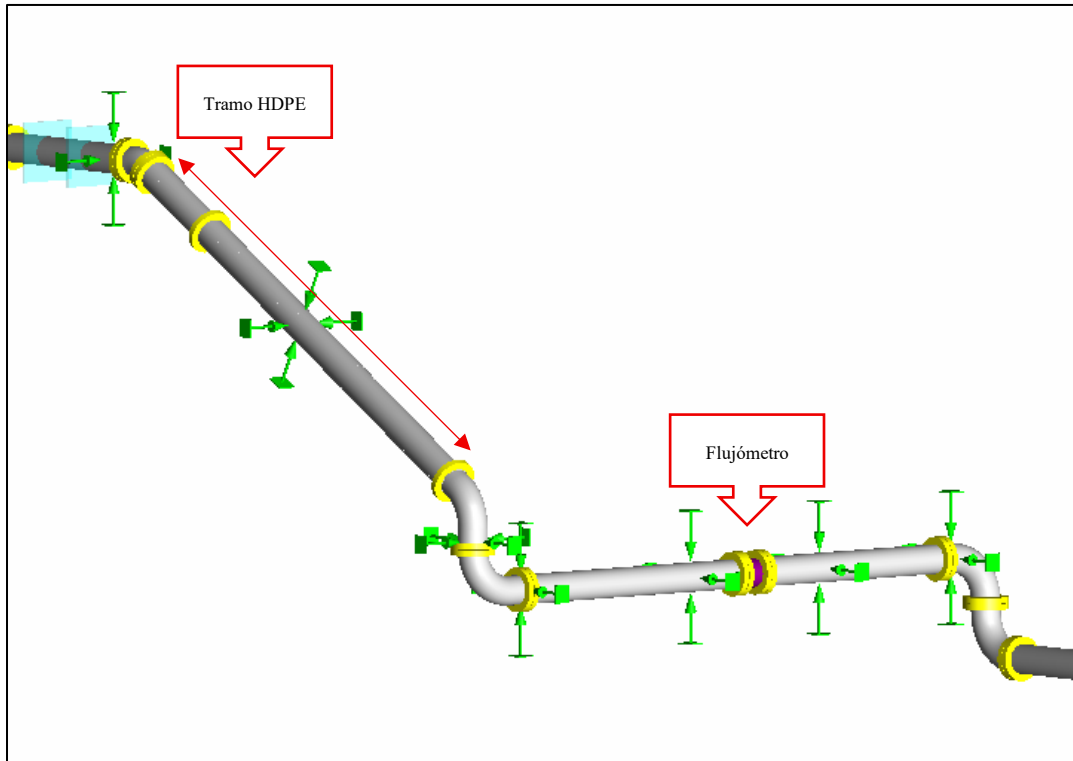


Figura 23: Representación del tramo inferior del modelo.

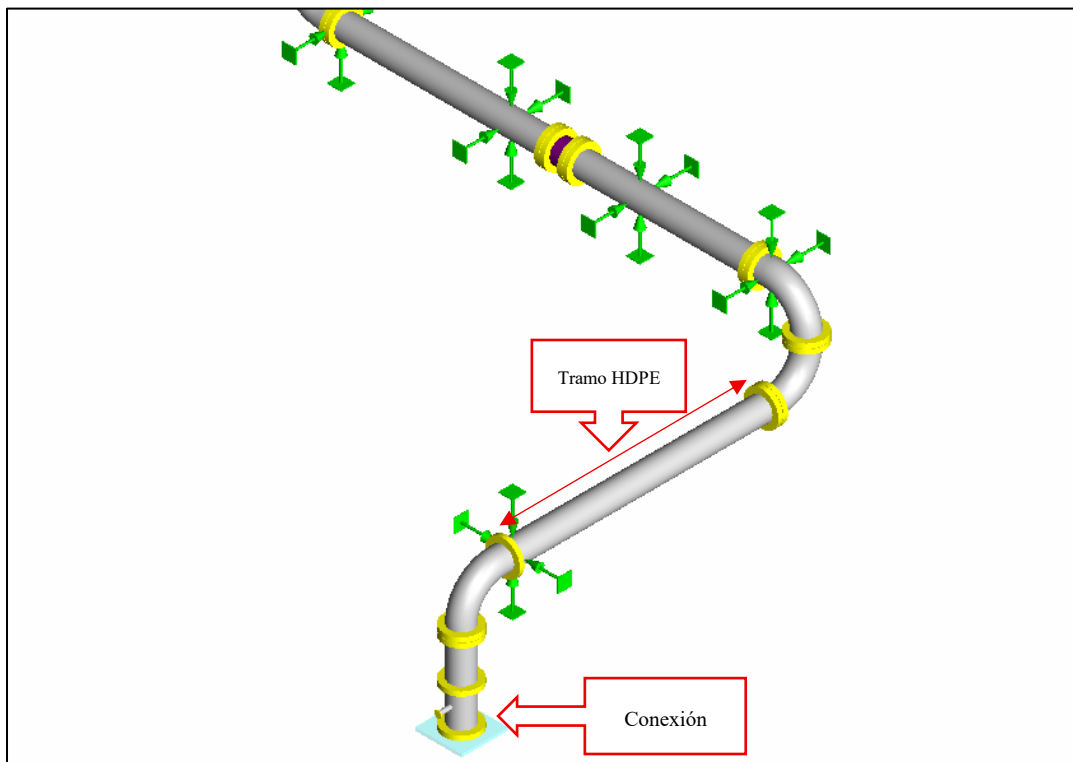


Figura 24: Representación de la conexión del modelo.

4.2 ESFUERZOS PERMISIBLES

El análisis de los resultados obtenidos para las distintas configuraciones de la línea se realiza mediante la comparación de los esfuerzos calculados con los límites permisibles establecidos por la normativa aplicable a cada material. Dado que el sistema analizado incorpora tramos de tubería de acero al carbono y tramos de tubería de HDPE, los criterios de evaluación se definen de forma diferenciada, atendiendo a las particularidades mecánicas y normativas de cada material.

4.2.1 Esfuerzos permisibles en acero

Para la tubería de acero ASTM A-53 Gr B, los esfuerzos permisibles se establecen conforme a los criterios definidos en la norma ASME B31.4. Los límites permisibles adoptados para cada tipo de esfuerzo se resumen en la Tabla 8, y se expresan como fracciones del esfuerzo de fluencia del material, de acuerdo con los factores de diseño indicados por la norma. Estos valores constituyen el criterio de aceptación para los resultados de esfuerzo obtenidos en los modelos analizados.

Tabla 8: Esfuerzos permisibles para el acero según ASME B31.4

Tipo de esfuerzo	Condición	Expresión normativa	Esfuerzo permisible [MPa]
Unidad	[-]	[-]	[MPa]
SUS	Cargas sostenidas	$S_L < 0,8 S_y$	193
EXP	Expansión térmica	$S_E < 0,9 S_y$	217
OCC	Cargas ocasionales	$S_L + S_{OCC} = 0,9 S_y$	217

4.2.2 Criterio de esfuerzos permisibles en HDPE

En el caso de la tubería de HDPE PN100, la evaluación de esfuerzos no se rige directamente por los límites definidos en ASME B31.4, dado el comportamiento viscoelástico del material y su dependencia del tiempo y la temperatura. Por esta razón, los resultados se comparan con un esfuerzo admisible de largo plazo, obtenido a partir de recomendaciones de catálogo y literatura técnica especializada, considerando el módulo aparente correspondiente a un periodo de servicio de 50 años.

Los valores de esfuerzo admisible adoptados para la tubería de HDPE se resumen en la Tabla 9, donde se establecen límites diferenciados para esfuerzos sostenidos, esfuerzos por dilatación térmica y esfuerzos bajo cargas ocasionales. Estos valores se definen considerando un módulo de elasticidad aparente correspondiente a un periodo de servicio de largo plazo, coherente con las recomendaciones del Plastics Pipe Institute para tuberías PN100 sometidas a cargas sostenidas.

Tabla 9: Valores permisibles para el HDPE

Tipo de esfuerzo	Condición	Criterio aplicado	Esfuerzo permisible [MPa]
Unidad	[-]	[-]	[MPa]
SUS	Peso propio	HDS	8
EXP	Dilatación térmica	$\leq 1,3 S_{adm}$	10,4
OCC	Cargas ocasionales	$\leq 1,5 S_{adm}$	12

4.2.3 Resultados por esfuerzo sostenido

La evaluación de esfuerzos sostenidos considera la respuesta de la tubería frente a las cargas permanentes asociadas al peso propio de la línea, el peso del fluido contenido y la presión interna de operación. En detalle, la Tabla 10 muestra los esfuerzos máximos alcanzados en la configuración inicial, manteniéndose por debajo del esfuerzo admisible por normativa con un máximo de un 26% de utilización en el nodo 19, la zona que inicia la inclinación ascendente a la ladera del talud como se muestra en la Figura 25. La simbología por colores, indica las zonas donde inmediatamente se exige una mayor concentración de esfuerzo, esta no contrasta directamente con el esfuerzo permisible cuyo objetivo es identificar visualmente las zonas donde prestar mayor atención en el primer modelo. Principalmente la distribución se concentra en una zona cercana a el nodo 19 con un margen de esfuerzo de 50,25 [MPa].

Tabla 10: Esfuerzos máximos sostenidos en la tubería de acero.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Peso muerto, sin contenido	15,57	193	8%
Peso muerto + contenido	50,25	193	26%

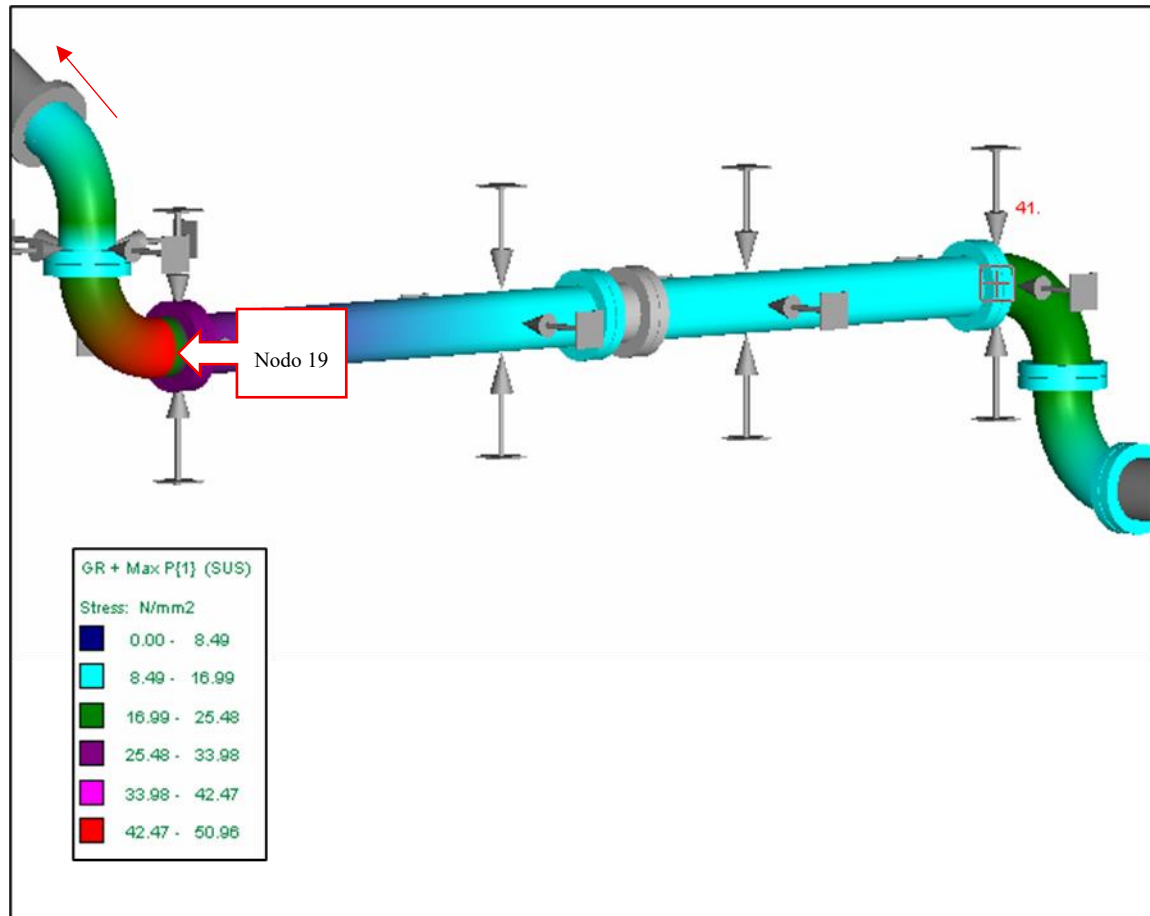


Figura 25: Distribución de esfuerzos en zonas previas al bloque.

Siguiendo, la tubería de HDPE difiere en las condiciones de continuidad del esfuerzo ejercido en la línea, los resultados de este se detallan en una sección aparte de la tubería de acero. En detalle, la Tabla 11 muestra los esfuerzos máximos de la tubería bajo cargas sostenidas. La Figura 26 muestra los distintos puntos en donde la tubería, debido al esfuerzo sostenido presenta punto de alta sollicitación de cargas. Al igual que en la tubería de acero el porcentaje de utilización en los nodos identificados en la figura representan puntos en los cuales la tubería de HDPE alcanza valores de esfuerzo en un rango de 3,12 a 5 [MPa].

Tabla 11: Esfuerzos máximos sostenidos en tubería de HDPE.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Peso muerto, sin contenido	3,11	8	38%
Peso muerto + contenido	4,29	8	53%

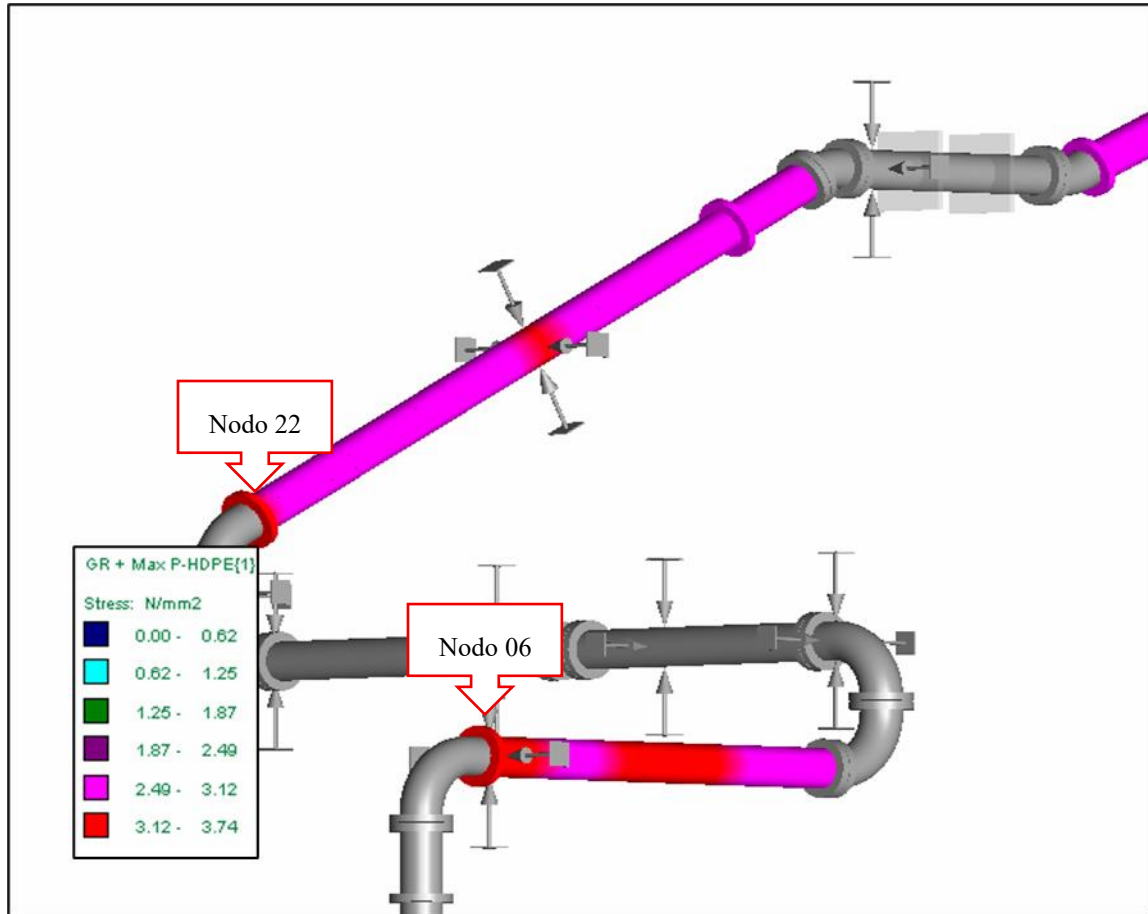


Figura 26: Distribución de esfuerzo en las líneas de HDPE.

4.2.4 Resultados por esfuerzo de expansión térmica

El análisis de cargas por expansión térmica evalúa los esfuerzos debido al cambio de temperatura. Su magnitud depende directamente del grado de restricción impuesto al movimiento natural de la tubería. Los esfuerzos máximos asociados a estas condiciones térmicas se presentan en la Tabla 12, donde entre la diferencia de la temperatura ambiente a la máxima mantiene valores de esfuerzo cercanos a los 84 [MPa], debajo del esfuerzo admisible. Luego el cambio de temperatura entre el ambiente con la temperatura mínima relata alrededor de 50 [MPa], nuevamente debajo de la sección límite. La Figura 27 enfoca la distribución de esfuerzo visible en la zona más crítica ante la restricción del aumento de temperatura. De igual manera que la sección anterior la zona cercana al nodo 19 presenta los esfuerzos máximos en ambas temperaturas consideradas, aun así, mantienen una relación máxima/admisible por debajo de los 38 puntos porcentuales.

Tabla 12: Esfuerzos máximos expansivos en la tubería.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Expansión térmica de diseño	83,64	217	38%
Expansión térmica mínima	50,25	217	23%

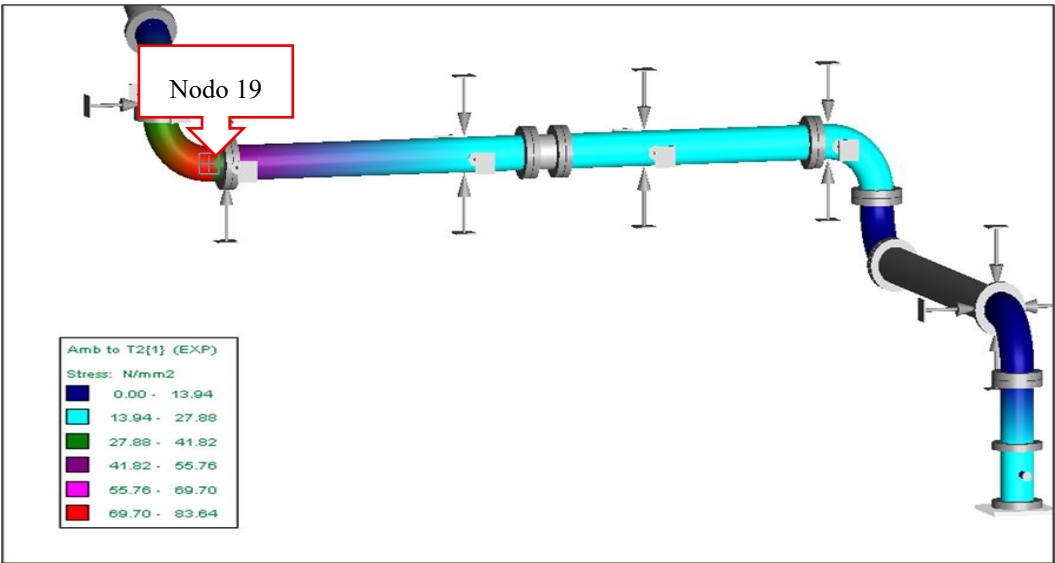


Figura 27: Distribución del esfuerzo máximo por las restricciones ante los cambios de temperatura.

En la tubería plástica las cargas por expansión térmica se muestran en la Tabla 13, de igual manera se evalúan los esfuerzos máximos a la temperatura máxima esperada promedio y la temperatura mínima. En ambos casos no sobrepasan los 3 [MPa] de esfuerzo sobre la tubería de HDPE. La Figura 28 presenta la distribución del esfuerzo térmico de la zona cercana al nodo 22 representado en la figura. Esta zona corresponde al ascenso por la ladera justo en la conexión de ambos materiales diferentes Acero- HDPE.

Tabla 13: Esfuerzos máximos expansivos en la tubería de HDPE.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Expansión térmica de diseño	1,4	10.4	13%
Expansión térmica mínima	1,6	10.4	15%

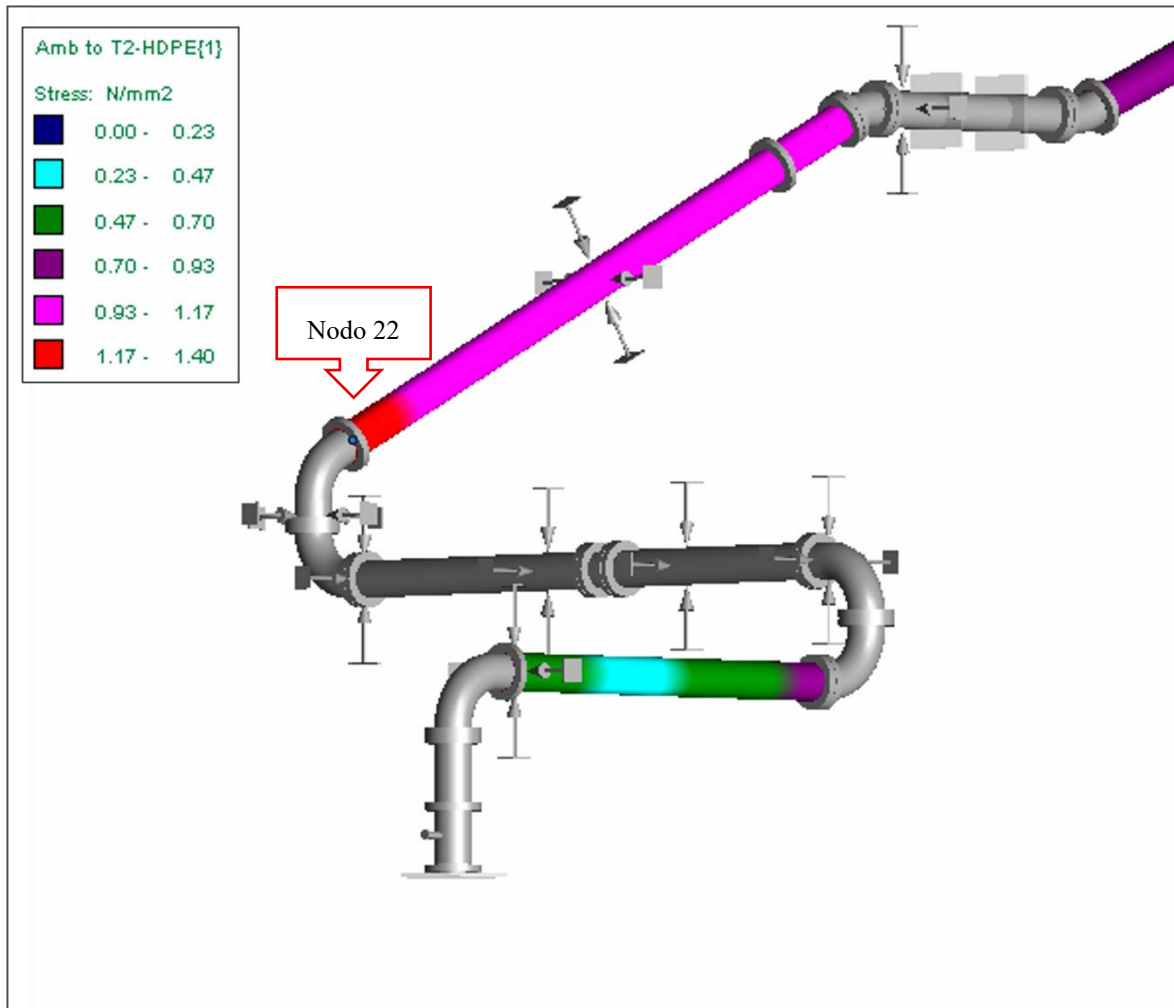


Figura 28: Distribución de esfuerzo por cambio de temperatura en la tubería de HDPE.

4.2.5 Resultados por esfuerzos ocasionales

Estas solicitaciones se evalúan en combinación con las cargas operacionales (para verificar la respuesta estructural del sistema bajo escenarios de baja probabilidad de ocurrencia, pero de alta exigencia en términos de demanda mecánica. Los resultados cuantitativos de esfuerzo máximo para la combinación ocasional se presentan en la Tabla 14, donde en base a los límites admisibles bajo la combinación de la carga sísmica en el eje x, presentan los mayores esfuerzos en ambos tipos de material. La Figura 29 representa el punto de esfuerzo máximo debido a la combinación de esfuerzo ocasional en la tubería de acero, donde el nodo 19 representa el punto de esfuerzo máximo para la combinación de peso sostenido y el sismo en el eje X. Luego, la Figura 30 representa la distribución de esfuerzo en la línea de HDPE, mostrando rango de esfuerzo entre 0,5 a 1,9 [MPa].

Tabla 14: Esfuerzos máximos en condición ocasional.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Ocasional máx acero sismo x (E1)	72	217	33%
Ocasional máx Hdpe sismo x (E1)	1,38	12	12%

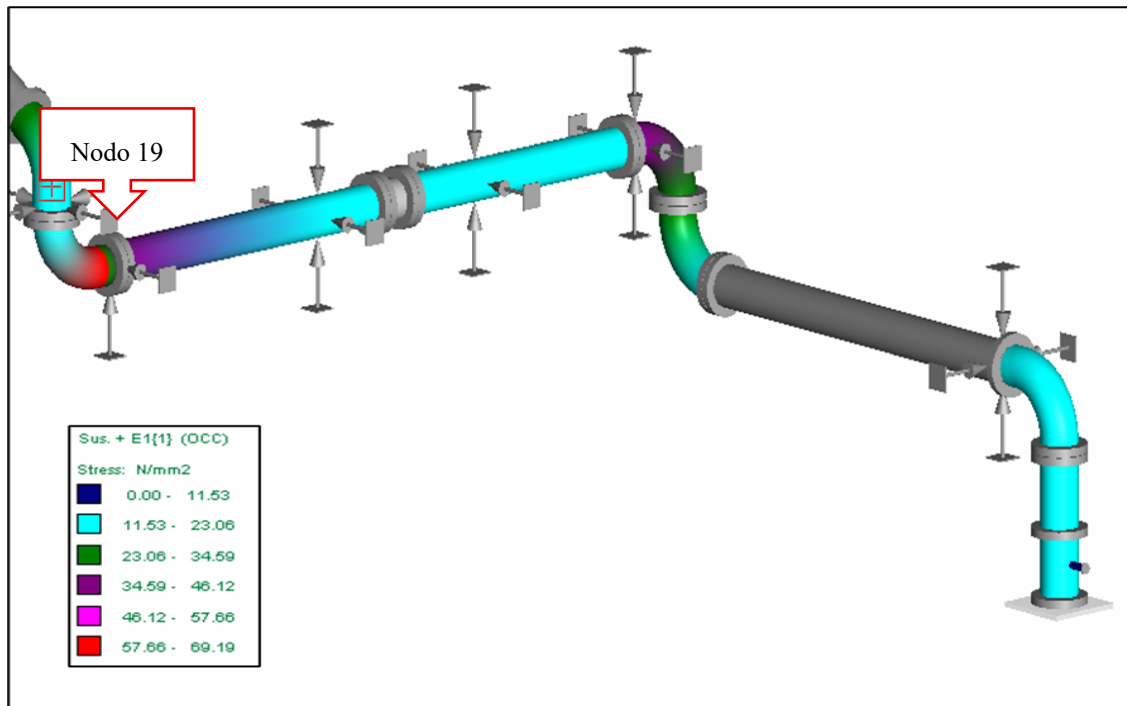


Figura 29: Punto de esfuerzo máximo en condición de esfuerzo ocasional.

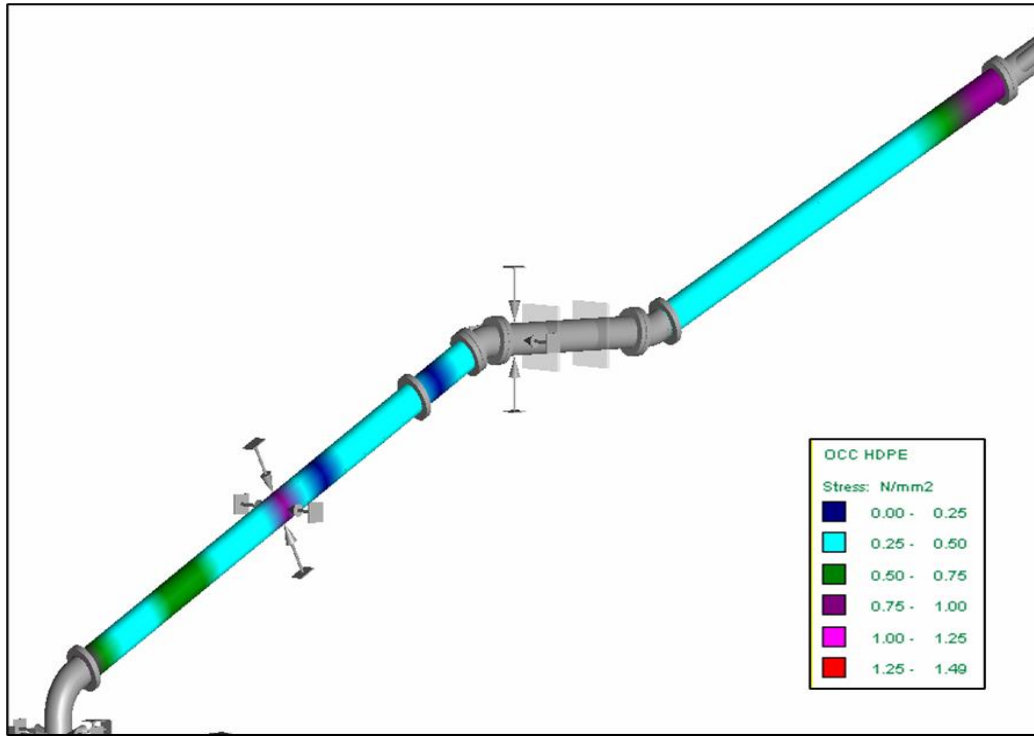


Figura 30: Distribución de esfuerzos en la tubería de HDPE.

4.2.6 Resultados de fuerzas en el bloque de hormigón

La Tabla 15 presenta las fuerzas máximas ejercidas al bloque de hormigón bajo las cargas de operación, diferencia térmica máxima y mínima, y la carga máxima operacional. Las cifras indicadas en la tabla consideran la carga en la cara frontal del bloque donde existen fuerzas que superan los 1.000 [kN]. La Tabla 16 de igual manera, ubica las fuerzas en la cara posterior al bloque representando fuerzas de similar magnitud a la cara frontal. En conjunto con la Figura 31 se muestra los ejes de referencia a nivel local en la tubería para la consideración de las fuerzas y momentos que se ejercen sobre el bloque.

Las cargas de expansión térmica por aumento de temperatura presentan fuerza en el eje Z del orden de más de 1.000[kN]. Las fuerzas en el eje Y mantienen un rango de máximo de -30 a 48 [kN] considerando las cargas de expansión térmica y las ocasionales. En cuanto a los momentos ejercidos en todas las cargas mantienen un rango máximo de -72 a 30 [kNm], rango atribuido a la cara posterior al bloque.

Tabla 15: Fuerzas y momentos máximos transmitidas bloque de hormigón (cara frontal).

Carga	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Unidad	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
Operación	-429	14.516	155.237	5.836	143	606

Térmica máxima	-2.248	-25.595	1.359.588	-8.502	747	-176
Térmica mínima	1.320	15.217	-784.987	5.055	-438	125
Ocasional máxima	- 2.670	-10.602	1.416.396	-2.508	887	471

Tabla 16: Fuerzas y momentos máximos transmitidos al bloque de hormigón (cara posterior).

Carga	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Unidad	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
Operación	-874	-26.027	-149.350	-34.847	1.457	-228
Térmica máxima	-2.748	-22.737	- 1.369.942	-37.735	4.680	-253
Térmica mínima	1.630	13.481	791.233	22.376	- 2.778	156
Ocasional máxima	-3.575	-48.377	-1.420.571	-71.948	6.052	-465

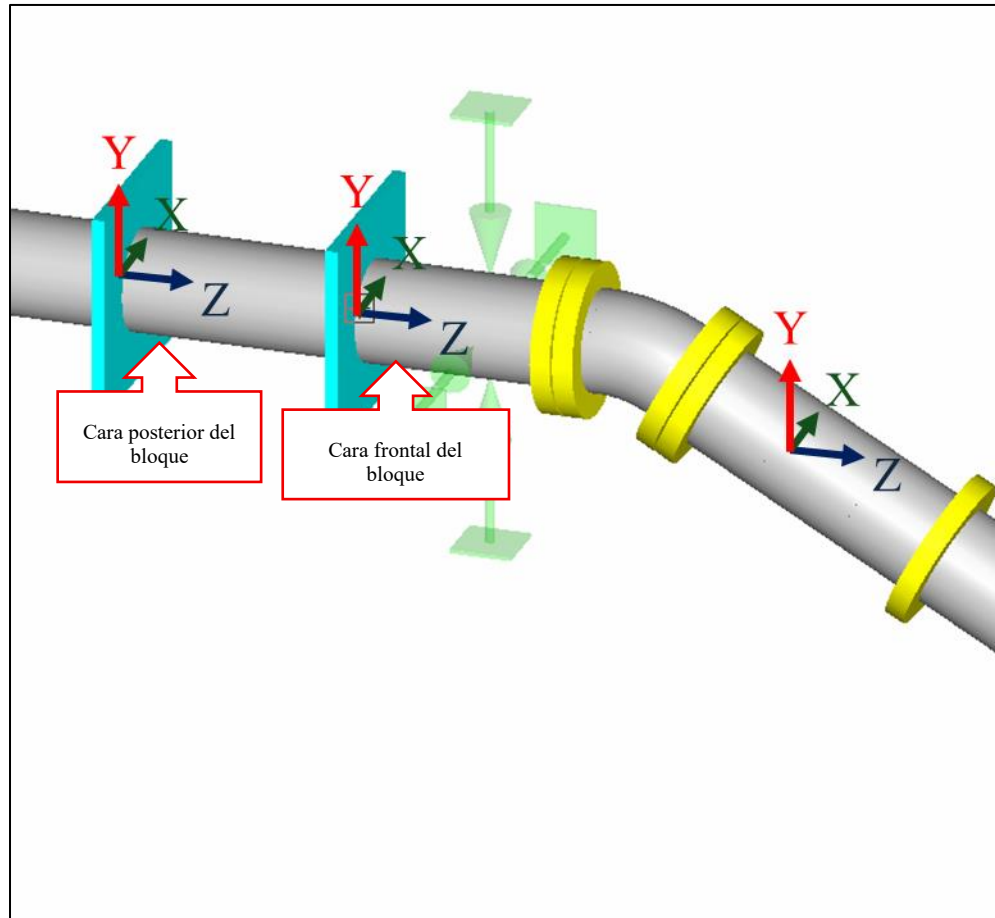


Figura 31: Puntos de referencia en el bloque.

4.2.7 Resultados de fuerzas en soportes

Para la presentación de los soportes que más carga presentan en la construcción de la tubería, se establece su comportamiento ante cargas operacionales y cargas térmicas. Se establece a la fuerza total reactiva, es decir, la componente total de fuerza de cada uno de los ejes, donde las cargas reactivas encima de los valores promedio son consideradas de alta sollicitación. La Tabla 17 muestra las cantidades de las fuerzas reactivas totales en cada soporte, donde se puede establecer puntos donde la carga en los soportes considera incrementos importantes. Enumerados desde el punto de conexión, los soportes que mayor carga presentan están desde el soporte 5 al soporte 8.

Tabla 17: Fuerza reactiva total en soportes.

ID soporte	Operacional	Cambio de temperatura
	[N]	[N]
Soporte 1	32.854	48.311
Soporte 2	48.602	66.170
Soporte 3	15.801	16.688
Soporte 4	12.826	27.753
Soporte 5	52.039	102.322
Soporte 6	22.067	139.091
Soporte 7	16.037	15.572
Soporte 8	34.532	15.572
Soporte 9	3.407	22.609
Soporte 10	93.928	18.833
Soporte 11	22.712	47.409
Soporte 12	16.515	2.243
Soporte 13	4.093	16.329
Soporte 14	27.031	27.034
Promedio	28.746	40.424

Dentro del rango, el soporte más crítico en esta configuración corresponde al N°5 que mantiene valores por sobre el promedio en ambos casos, en concreto, el doble de ambos valores promedio superior a 40 [kN] de carga. La Figura 32 cumple la función de representar el soporte que mayor solitud de cargas y en conjunto con la Tabla 18 se detalla la carga transmitida en detalle del soporte. Este soporte se ubica al pie del cerro tomando en cuenta la mayoría de la carga vertical de la línea que asciende.

Tabla 18: Fuerzas y momentos máximos transmitidos al soporte más solicitado.

Carga	Fx	Fy	Fz
Unidad	[N]	[N]	[N]
Operación	-	-52.034	-708
Térmica máxima	-	-26.523	-63.900
Térmica mínima	-	14.324	37.613
Ocasional máxima	-	-80.678	-62.934

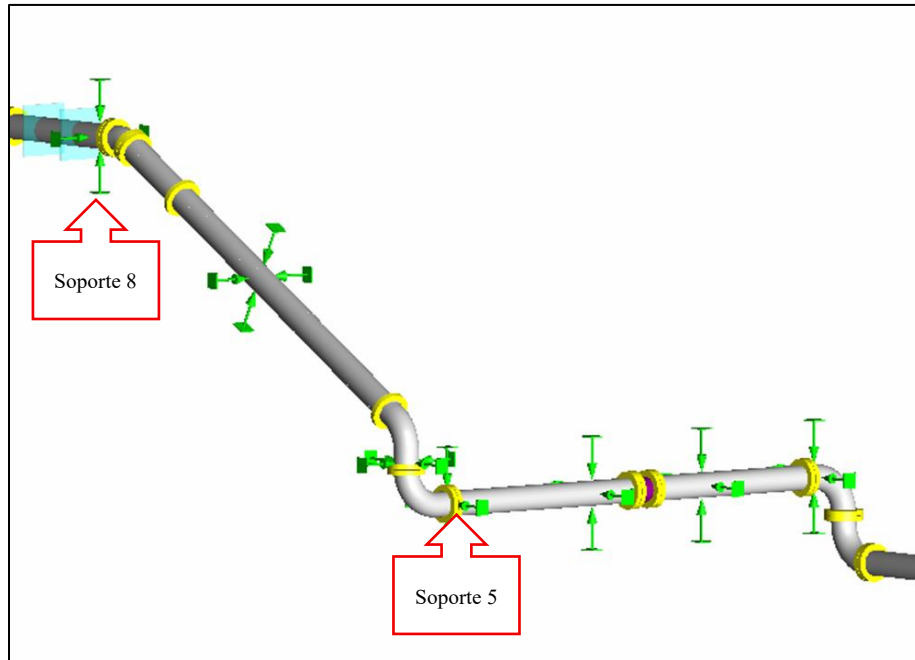


Figura 32: Representación de soporte con mayor carga.

4.2.8 Resultados del desplazamiento máximo

Los desplazamientos se evalúan en condiciones de expansión, contracción y operación. Para la tubería más crítica de HDPE se resumen en la Tabla 20 y su representación en Figura 33, la cual, muestra el movimiento representativo de la tubería en la condición de operación, donde claramente se ve la deflexión producida por el contenido y el peso de la propia tubería con una deflexión máxima del orden de 19 [mm].

Tabla 19: Cantidades de desplazamiento máximo en HDPE.

Carga	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Unidad	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
Operación	1,47	-18,97	-8,03	-0,02	-0,01	0,04
Térmica máxima	8,69	5,79	4,60	-0,10	0,14	0,02
Térmica mínima	-5,67	-3,56	-2,71	0,06	-0,10	0,02

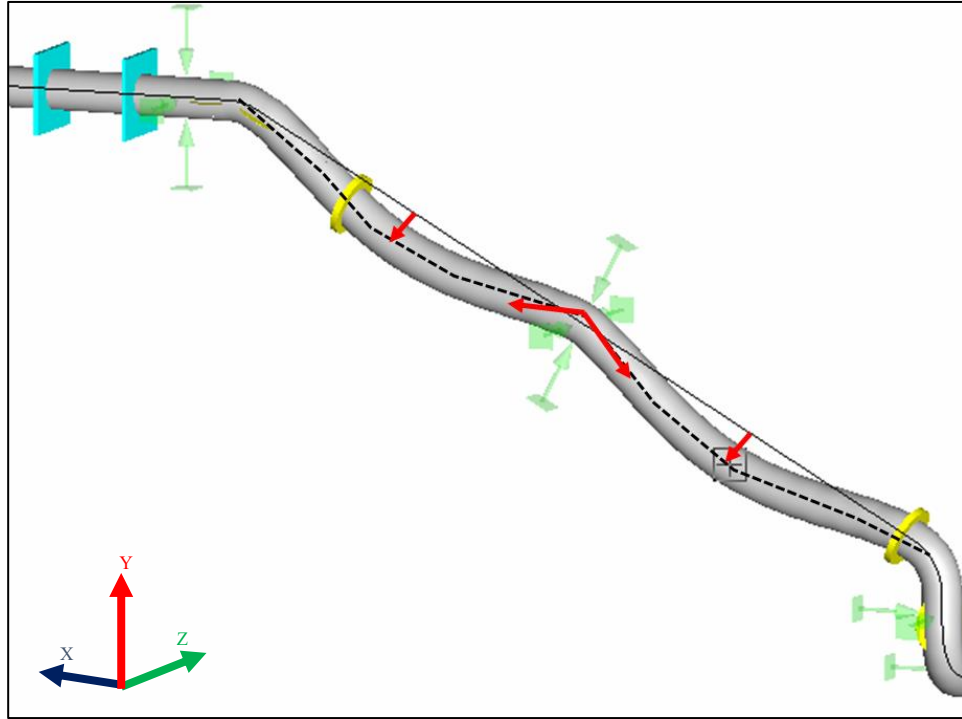


Figura 33: Desplazamiento de la tubería de HDPE.

En la Tabla 20 se representa el desplazamiento máximo en la tubería de acero ante los cambios de temperatura. Este desplazamiento es nuevamente al pie del cerro donde se encuentra la zona con mayores puntos de curva. La Figura 34 representa la zona, donde las líneas segmentadas representan el movimiento cuantitativo de la línea, visualizando el potencial movimiento que tendría ante la diferencia de temperatura.

Tabla 20: Desplazamientos máximos en condición de expansión térmica.

Carga	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Unidad	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
Térmica máxima	1,84	-5,09	-8,68	0,25	0,03	-0,0003
Térmica mínima	-1,71	6,43	10,99	-0,32	-0,04	0,0002

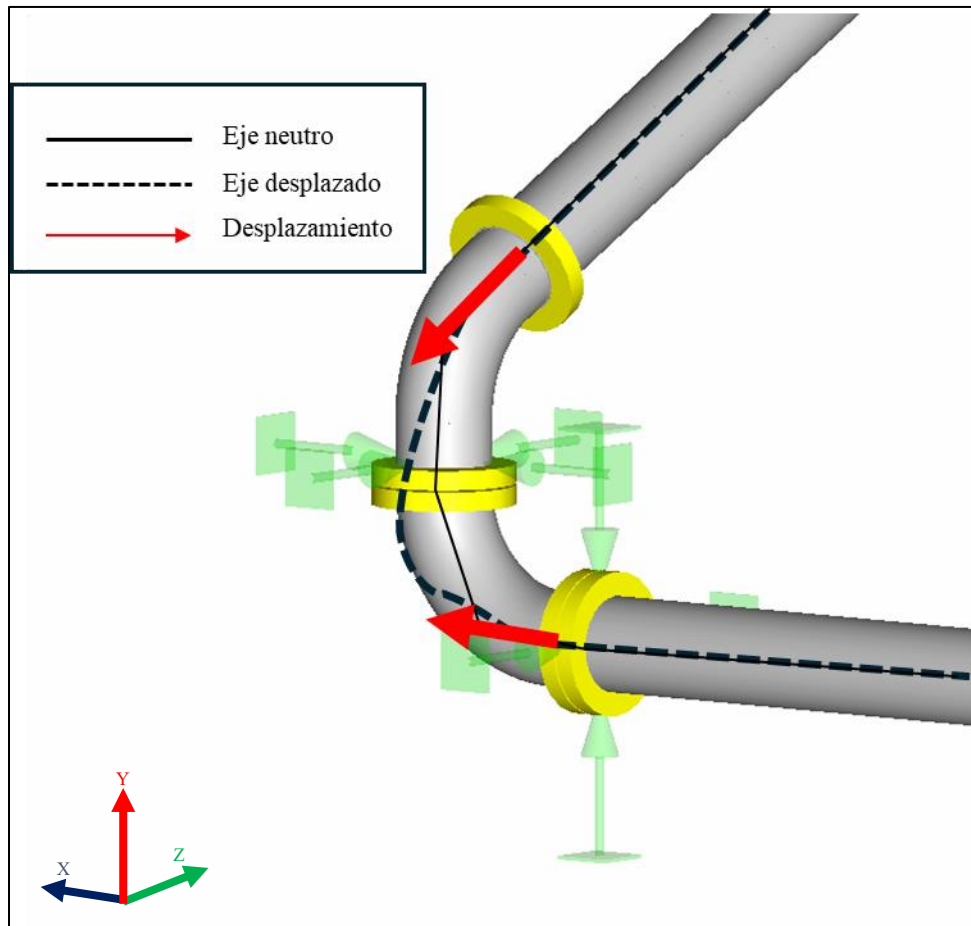


Figura 34: Representación del desplazamiento máximo.

4.3 MODELACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ACTUAL

Tal como se expuso en los antecedentes del proyecto, esta solución consistió en la sustitución del tramo de tubería de HDPE adyacente al bloque de hormigón por una sección de tubería de acero, conectada mediante una junta flexible tipo “manguerote”, manteniéndose sin modificaciones el resto del trazado y del sistema de soportación.

En este contexto, el objetivo del análisis del modelo 2 es verificar y corroborar técnicamente la efectividad de una solución ya ejecutada, evaluando si la modificación implementada permite resolver las condiciones críticas identificadas en el modelo inicial y mantener un criterio de funcionamiento real ya que esta configuración se mantiene hoy en día.

4.3.1 Modelado de la condición actual

La Figura 35 representa el cambio efectuado en la línea, considerando el cambio de la tubería de acero y la inclusión de la junta flexible. El tramo considerado solo muestra la sección inferior de la línea, ya que se contempla como un tramo independiente al estar anclado a el bloque.

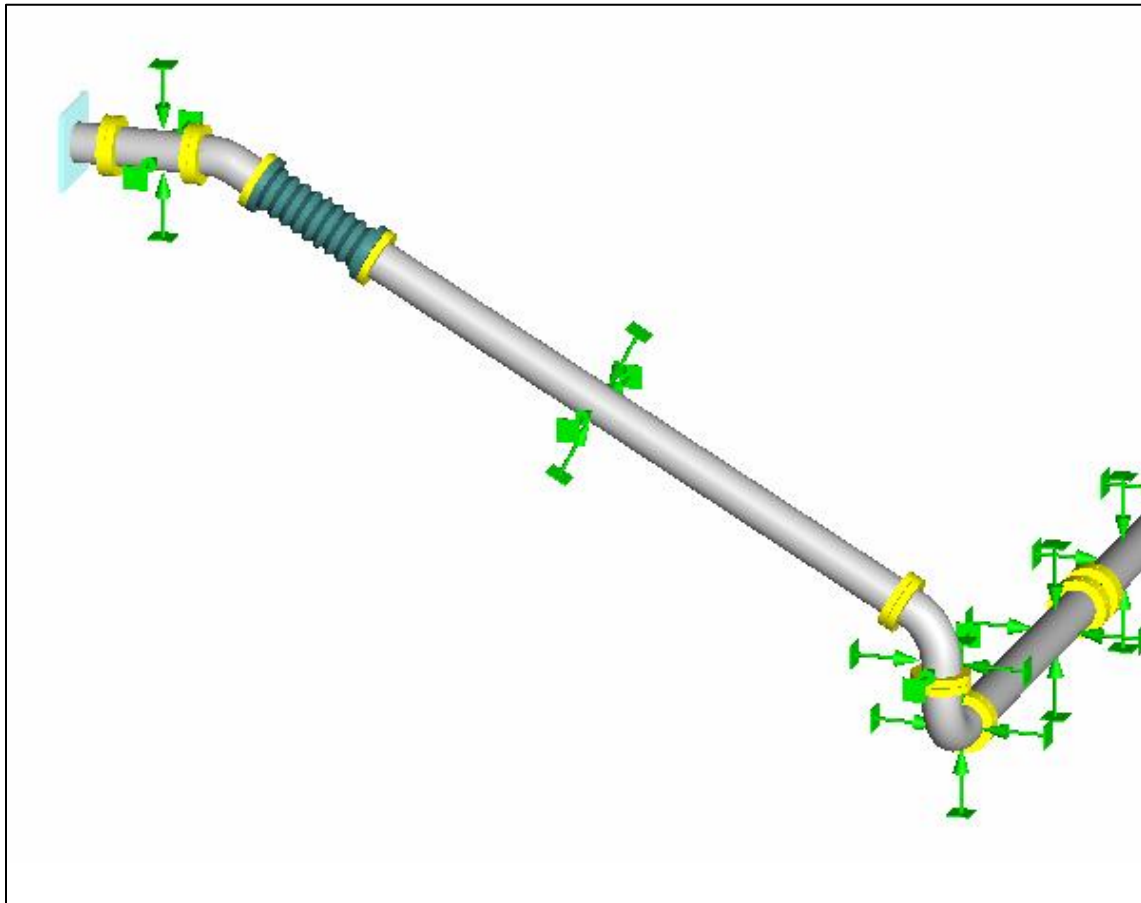


Figura 35: Modelación del cambio de componentes de la línea (configuración actual).

4.3.2 Resultados por cargas sostenidas

Los valores máximos de esfuerzo sostenido obtenidos para la tubería de acero se resumen en la Tabla 21, estos coinciden con la zona identificada en el apartado anterior de resultados del modelo inicial. La Figura 36 muestra la distribución de esfuerzo en la tubería completamente cambiada, donde se evidencia el punto de esfuerzo máximo que ocurre en el nodo 19 con alrededor de 67 [MPa] un 35% de ocupación del esfuerzo admisible total para ese caso de carga.

Tabla 21: Esfuerzos máximos sostenidos en modelo actual.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Peso muerto, sin contenido	26,50	193	14%
Peso muerto + contenido	67,33	193	35%

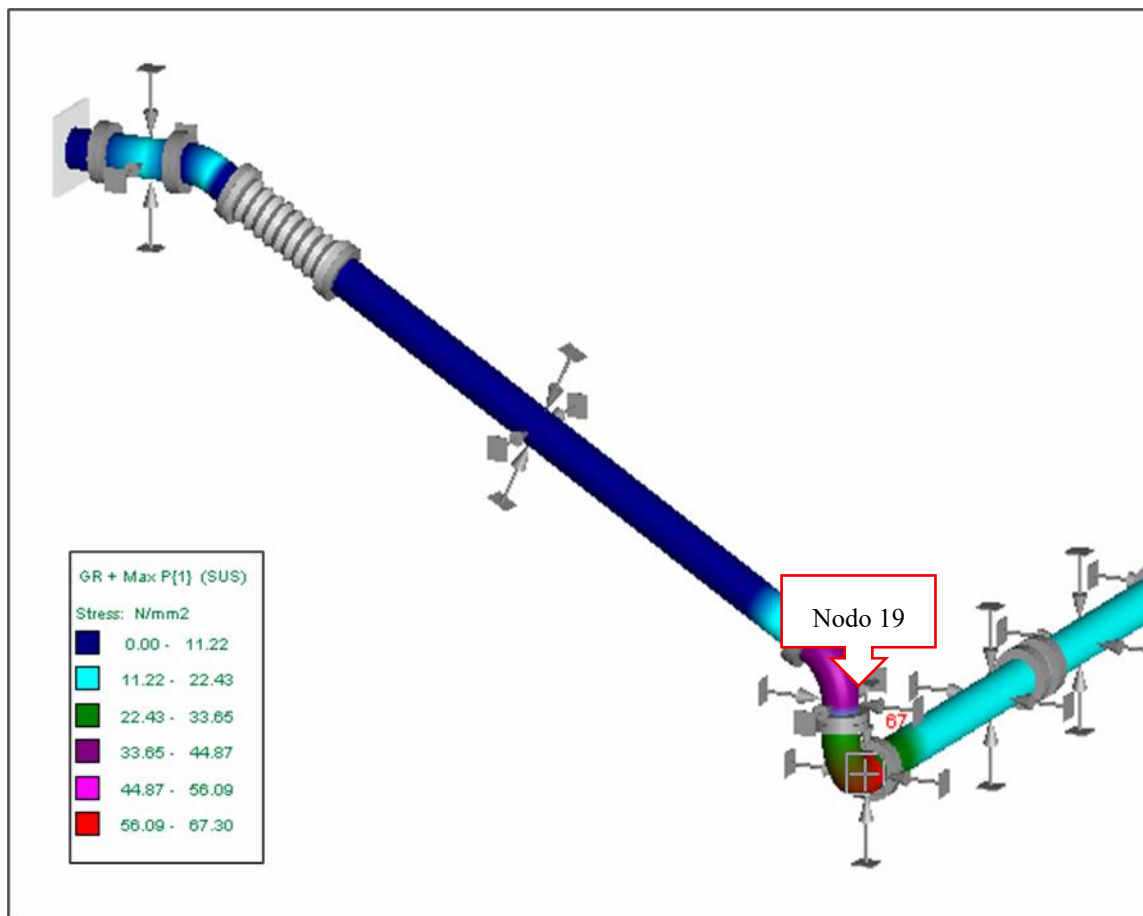


Figura 36: Distribución de esfuerzo por cargas sostenidas.

4.3.3 Resultados por cargas de expansión térmica

El comportamiento del modelo actual frente a cargas de expansión térmica se evalúa considerando las mismas variaciones consideradas anteriormente. Los esfuerzos máximos inducidos por expansión térmica se presentan en la Tabla 22, en ambas temperaturas se muestra un porcentaje menor al 10% del permisible. En la Figura 37 se muestra la distribución del esfuerzo térmico donde, se ubica en el nodo 19 el punto de esfuerzo máximo.

Tabla 22: Esfuerzos térmicos máximos en el modelo actual.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Expansión térmica de diseño	23,46	217	11%
Expansión térmica mínima	16,03	217	8%

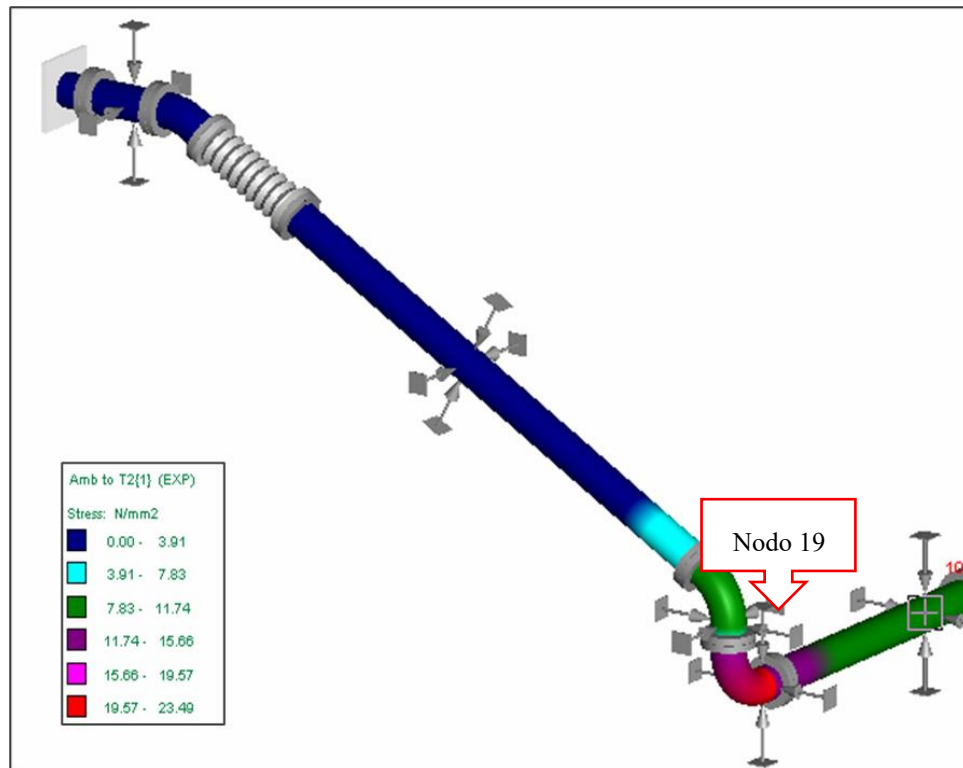


Figura 37: Distribución de esfuerzos por carga térmica máxima.

4.3.4 Resultados por cargas ocasionales

Los resultados de esfuerzo máximo bajo cargas ocasionales se presentan en la Tabla 23. En ella se observa que los esfuerzos combinados alcanzan valores del orden de un 52 % del esfuerzo permisible para la tubería de acero, manteniéndose dentro de los límites

establecidos por la normativa. En la Figura 38 los esfuerzos sísmicos se distribuyen por toda la línea sin embargo se concentra cercana al nodo 19 y al soporte más crítico de la configuración.

Tabla 23: Distribución del esfuerzo máximo por cargas ocasionales.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
GRTP1+E1	113	217	52%

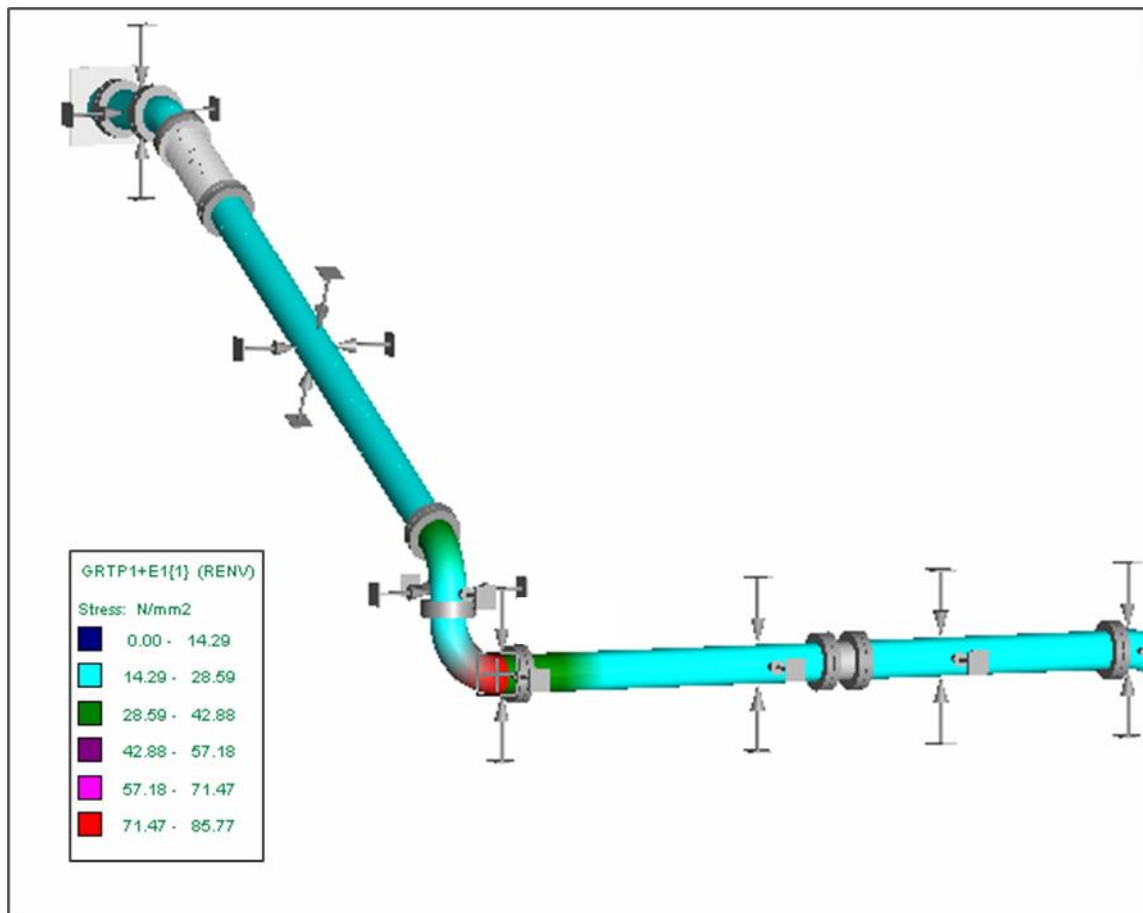


Figura 38: Distribución del esfuerzo máximo por cargas ocasionales.

4.3.5 Resultados de fuerzas en el bloque de hormigón

Adicionalmente, la Tabla 24 presenta la distribución de fuerzas transmitidas a los soportes para el modelo 2 bajo cargas sostenidas. Los resultados muestran una disminución de las reacciones máximas en el bloque de hormigón en comparación con el modelo base.

Tabla 24: Fuerzas máximas ejercidas en el bloque en el modelo actual.

Carga	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Unidad	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
Operación	-2.354	-17.660	-122.883	2.539	- 256	103
Térmica máxima	2.952	412	- 31.503	- 45	321	-1.217
Térmica mínima	-4.114	- 1.116	36.609	122	-448	1.693
Ocasional máxima	-2.417	- 35.089	-233.331	4.433	- 263	- 505

4.3.6 Resultados de fuerzas en soportes

La Tabla 25 representa la distribución de cargas que presenta al soporte más solicitado identificado en el punto anterior.

Tabla 25: Soporte más solicitado en el modelo actual.

Carga	Fx	Fy	Fz
Unidad	[N]	[N]	[N]
Operación	-	-107.164	- 50.715
Térmica máxima	-	- 95.880	- 22.000
Térmica mínima	-	52.358	26.641
Ocasional máxima	-	-172.792	-84.417

4.3.7 Resultados del desplazamiento máximo

La Tabla 26 resume los desplazamientos máximos térmicos. La representación de los desplazamientos se evidencia en la Figura 39. Los efectos de la junta flexible advierten el movimiento axial en contracción de esta, manteniendo la distribución de esfuerzos térmicos controlada y los movimientos absorbidos en su totalidad por la junta flexible. Los resultados indican desplazamientos totales del orden de 10 [mm] de forma axial, absorbidos por la junta flexible.

Tabla 26: Desplazamientos máximos de la junta flexible.

Carga	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Unidad	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
Térmica máxima	2,0	-4,6	-7,7	0,2	0,0	0,0
Térmica mínima	-1,9	5,8	9,6	-0,3	-0,1	0,0

La Tabla 27 muestra el punto crítico donde el desplazamiento evoca en la zona curva. Acá los valores del desplazamiento son del orden de los 2 [mm], considerando el cambio de temperatura en el material de acero y la ubicación de los soportes.

Tabla 27: Desplazamientos máximos en zona crítica.

Carga	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Unidad	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
Térmica máxima	-0,06	-0,88	-0,34	0,05	0,10	0,00
Térmica mínima	1,08	-0,94	-0,28	-0,04	-0,05	0,15

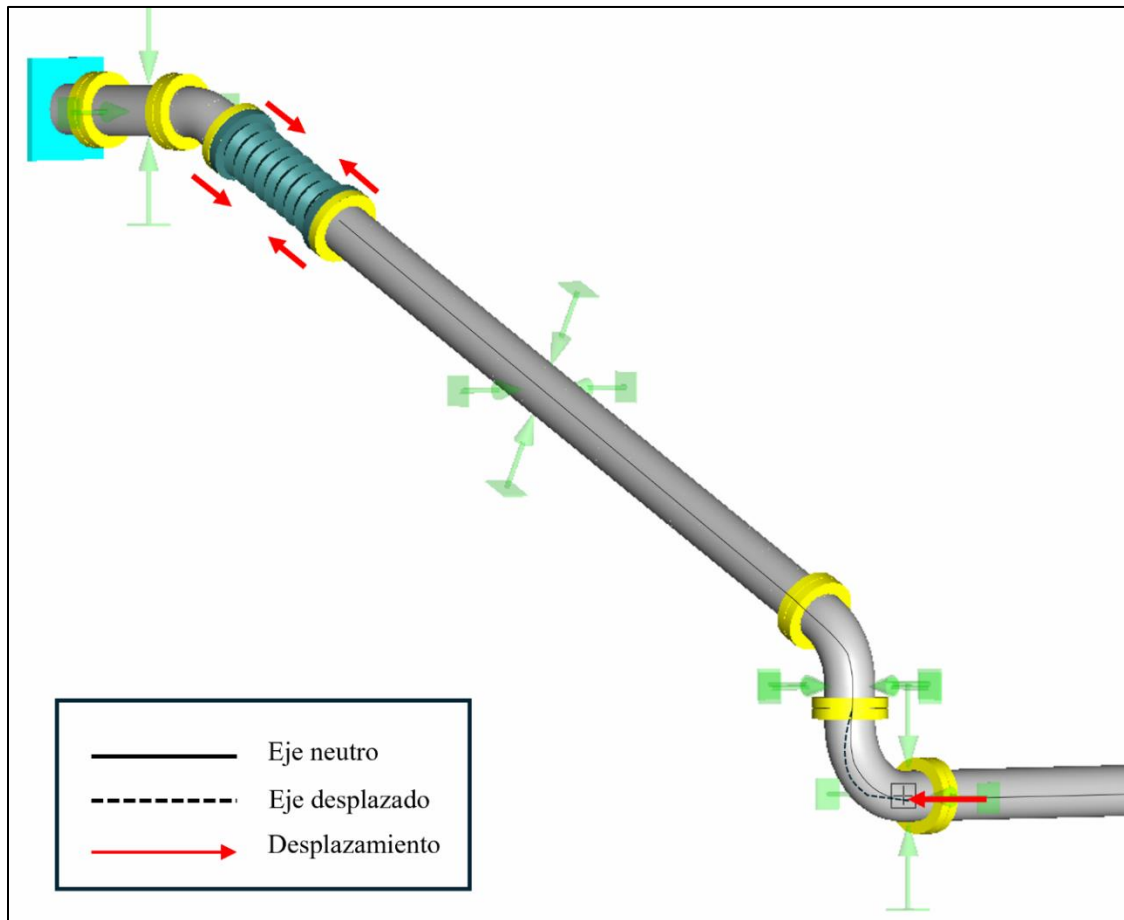


Figura 39: Representación de los desplazamientos máximos en el modelo actual.

4.4 CONFIGURACIÓN DEL MODELO SOLUCIÓN DE SOPORTE

4.4.1 Criterios de configuración de la propuesta del modelo

La modelación se basa en los siguientes criterios técnicos, derivados del análisis de los modelos anteriores:

- Eliminar la restricción rígida impuesta por el bloque de hormigón, identificada como una principal fuente de concentración de desplazamientos y reacciones.
- Incrementar la longitud efectiva disponible para la absorción de la expansión térmica mediante una redistribución de los soportes.
- Priorizar configuraciones de soportación estándar, de fácil instalación y con menor demanda de obra civil.

4.4.2 Esquema del modelo solución

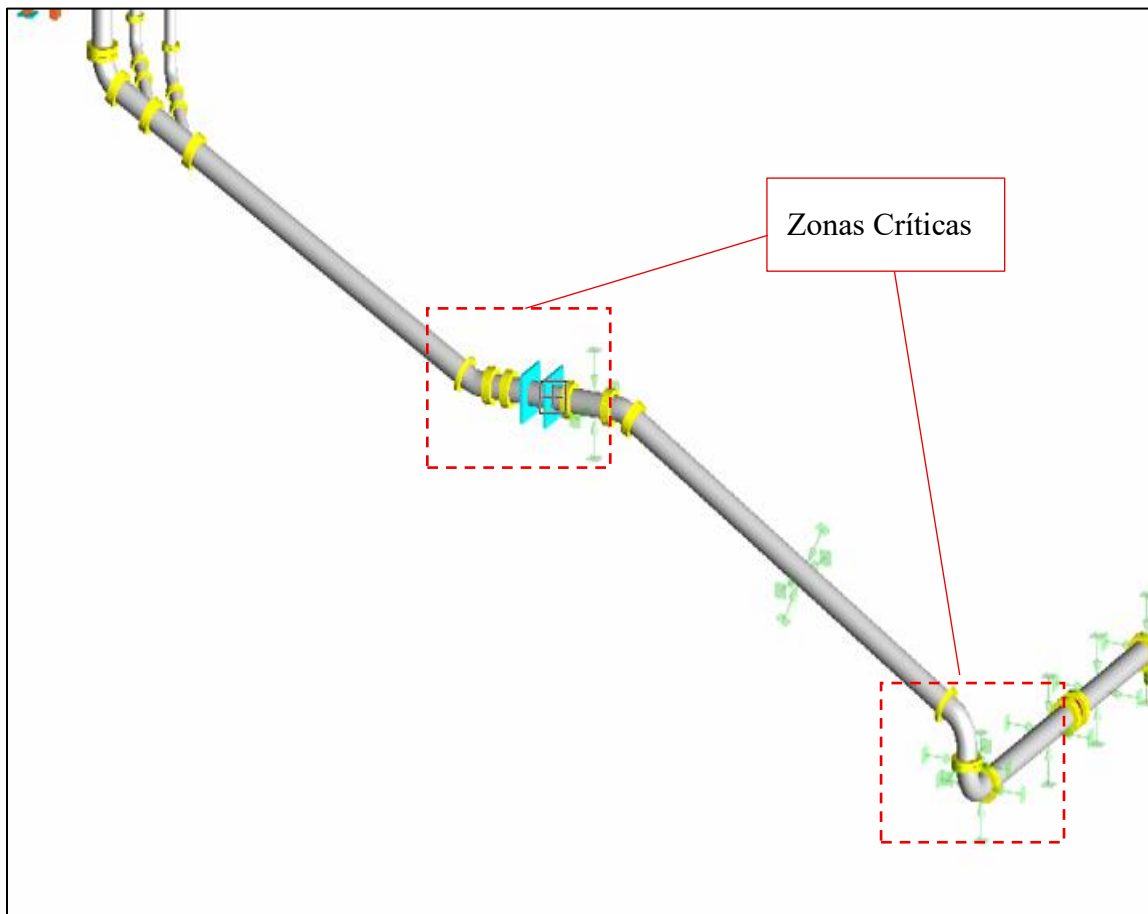


Figura 40: Identificación de zonas críticas.

La evaluación consiste en la construcción del modelo sin las restricciones impuestas por el bloque de hormigón, manteniendo una relevancia mayor en las zonas previamente indicadas e identificadas según los resultados en los puntos anteriores. La Figura 40 identifica

y acota a las zonas donde se debe priorizar el análisis para la mejora del diseño y la Figura 41 muestra el cambio evidenciando la nueva estructura de la línea. Además, se evalúa el cambio de materialidad de HDPE al acero y la modificación de posición de soportes.

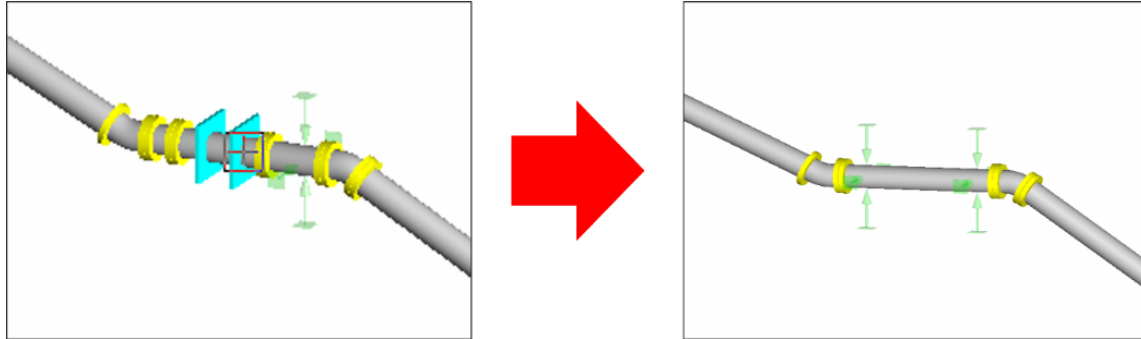


Figura 41: Representación de la eliminación de las restricciones impuestas.

4.4.3 Resultados del modelo solución bajo cargas sostenidas

Bajo cargas sostenidas los valores máximos de esfuerzo alcanzados se detallan en la Tabla 28 del modelo solución de rediseño. En conjunto con la Figura 42 muestran el punto de esfuerzo marcado en el nodo 19. Alcanza alrededor de 45,45 [MPa], un 23% del valor permisible, manteniéndose en el rango admisible. Luego, la Figura 43 muestra el valor del esfuerzo sostenido en la crítica identificada anteriormente considerando un valor de 44 [MPa] de esfuerzo, evidenciando una reducción con respecto al modelo base y al modelo actual.

Tabla 28: Esfuerzo sostenido máximo del modelo solución.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Peso propio	45,45	193	23%

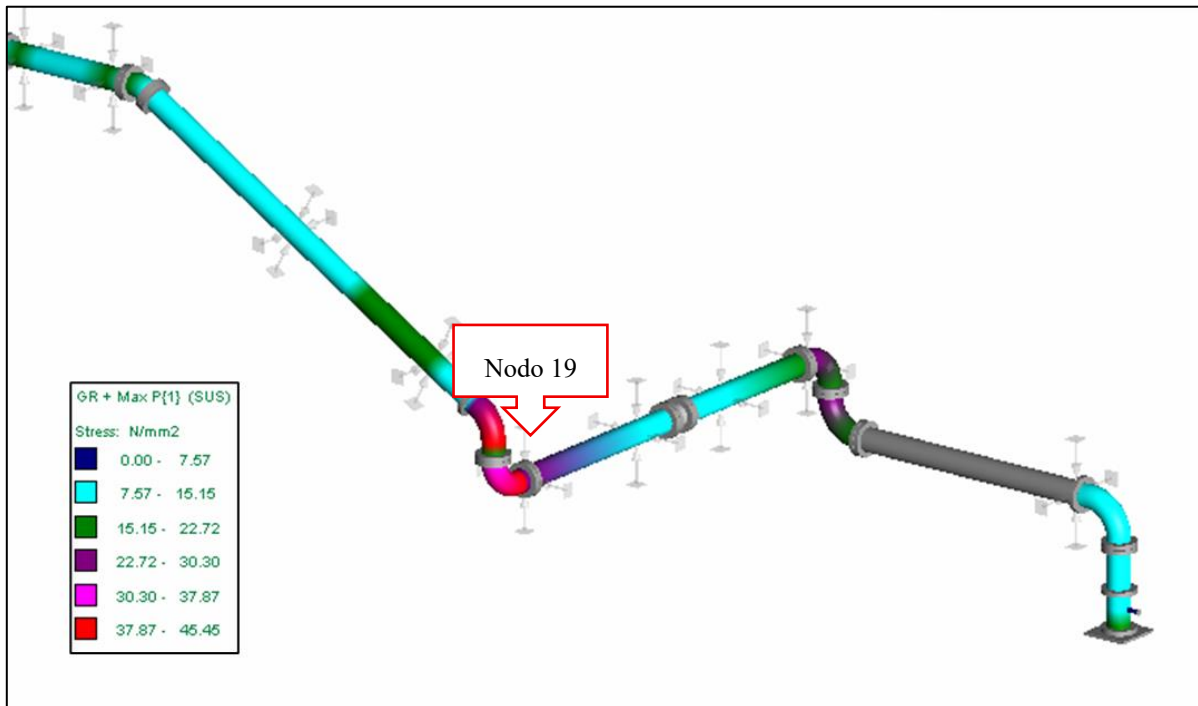


Figura 42: Distribución del esfuerzo sostenido en zonas críticas.

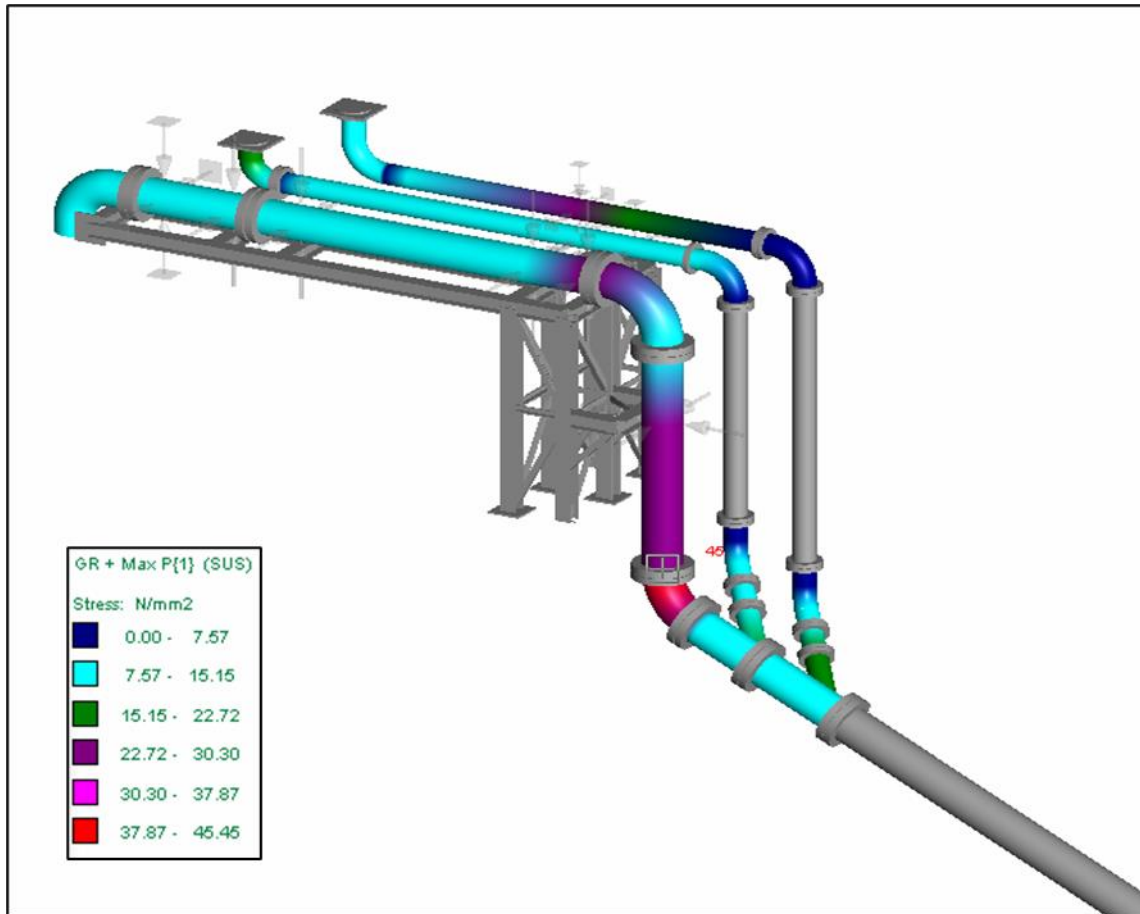


Figura 43: Distribución de esfuerzo sostenido en la línea.

4.4.4 Resultados bajo cargas térmicas

Los valores de esfuerzo máximo por expansión térmica se presentan en la Tabla 29. La distribución de esfuerzos se representa gráficamente en la Figura 44 donde se identifican las zonas de mayor impacto en valores de esfuerzo alcanzando un total de 42 [MPa] evaluados en la temperatura mínima alcanzada.

Tabla 29: Esfuerzos máximos alcanzados por carga térmica.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Amb – T2	21,58	217	10%
Amb – T3	42,31	217	19%

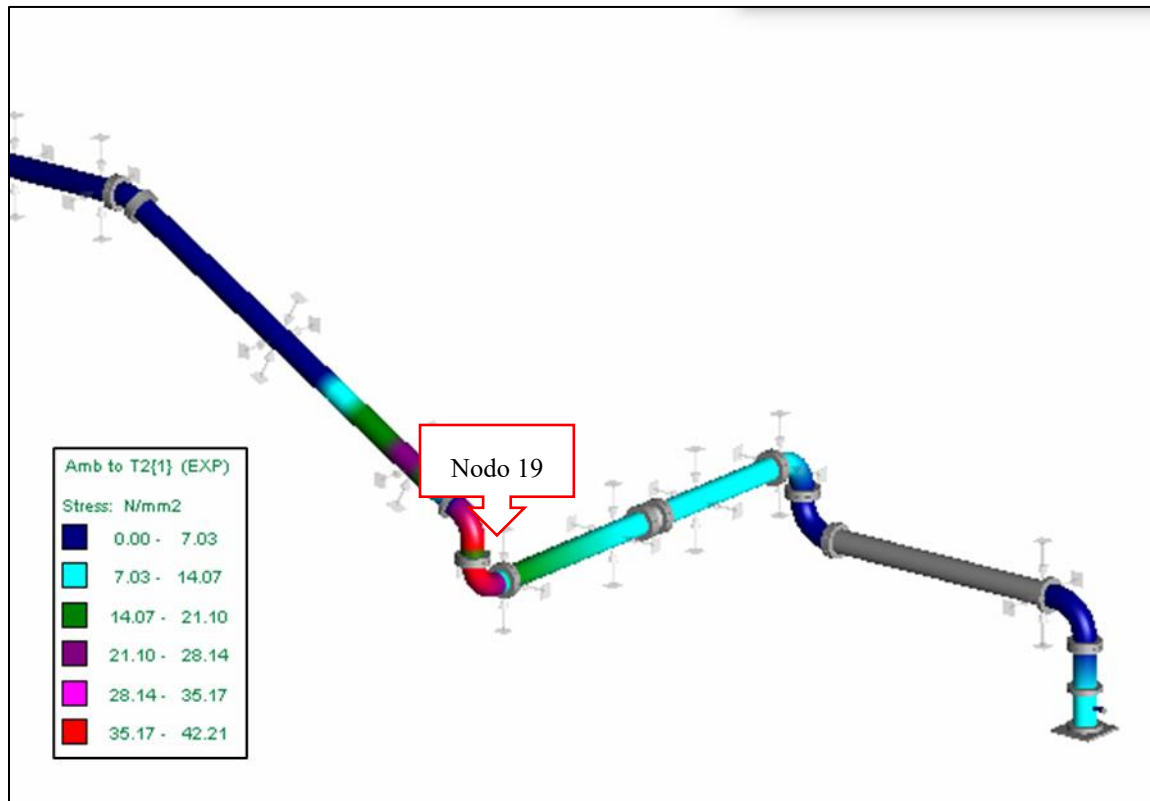


Figura 44: Distribución de esfuerzo bajo condiciones térmicas en zona crítica.

4.4.5 Resultados por cargas ocasionales

Se muestran los esfuerzos máximos alcanzados bajo las distintas combinaciones de cargas ocasionales, los valores cuantitativos de esfuerzo máximo bajo cargas ocasionales se resumen en la Tabla 30 en ambos casos de esfuerzo máximo la tubería mantiene un porcentaje bajo en relación con el permisible para esa carga. La Figura 45 muestra una tensión sostenida por toda la sección de tubería identificando la misma zona crítica indicada anteriormente.

Tabla 30: Esfuerzos máximos según la combinación ocasional en el modelo solución.

Tipo de esfuerzo	$\sigma_{\text{máx}}$	σ_{adm}	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{adm}}$
Unidad	[MPa]	[MPa]	[%]
Sus + E1	53,57	217	24%
Sus -E3	47,67	217	22%

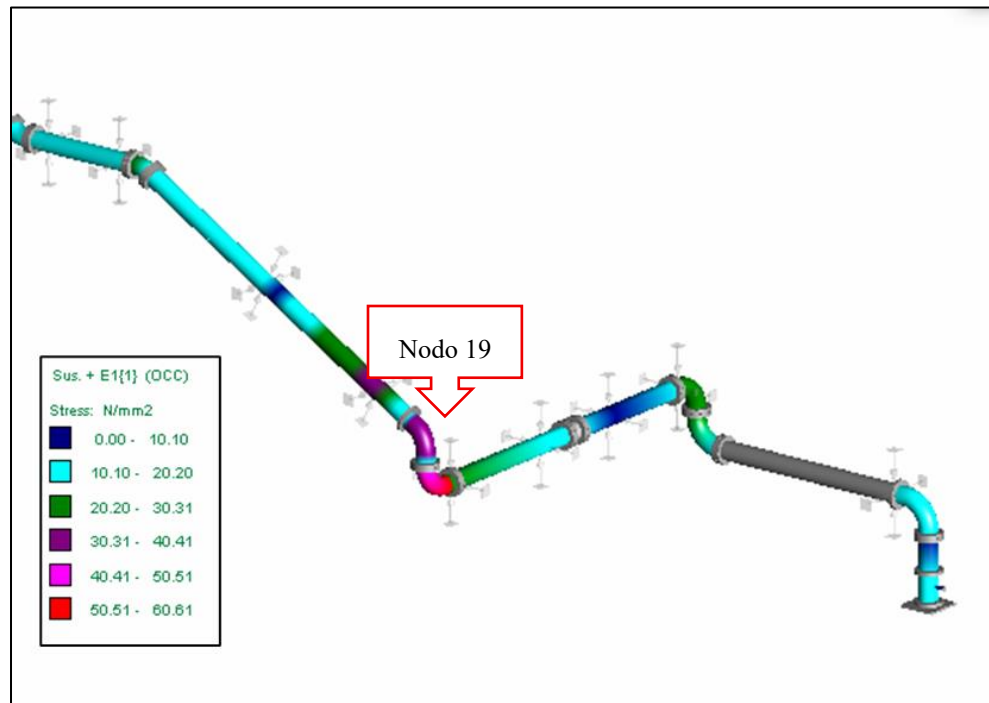


Figura 45: Esfuerzos ocasionales en el modelo propuesto.

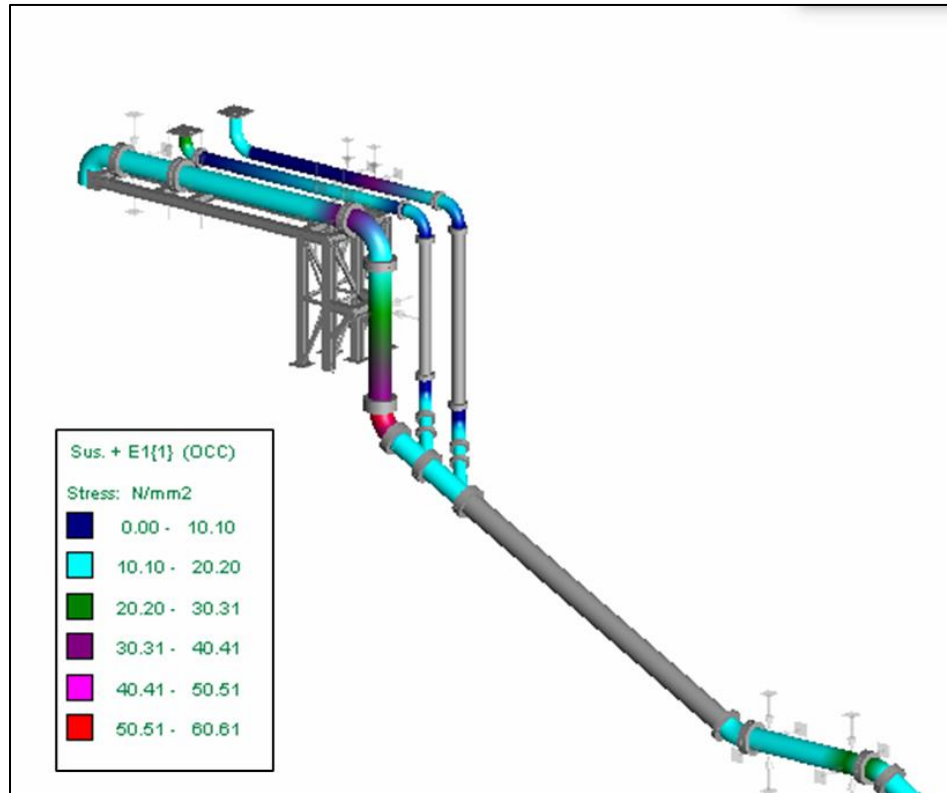


Figura 46: Esfuerzos ocasionales en la zona superior del modelo propuesto.

4.4.6 Resultados de fuerzas máximas en la reconfiguración de soportes

La Figura 47 muestra la configuración más simple de los soportes que reemplazan las componentes restrictivas del bloque de hormigón. El soporte A debe considerar toda la carga anterior al bloque y el soporte B la carga posterior. La distancia entre ambos es de aproximadamente 3 [m].

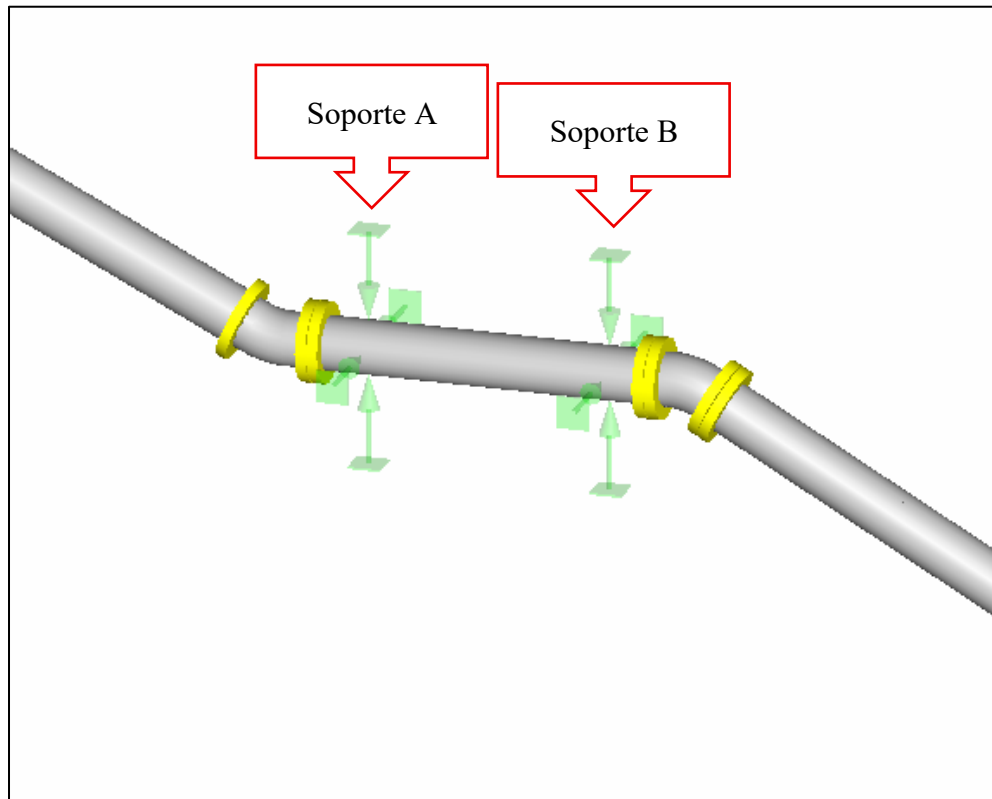


Figura 47: Soportes reemplazantes del bloque de hormigón.

Luego, en la Tabla 31 y Tabla 32 se muestra los valores de fuerza transmitida máxima obtenida en las distintas condiciones de carga, esto se observa en la cantidad de fuerza admisible en los soportes. En ambos soportes se carece de reacción de momento, esperando una mayor rotación en la base de los soportes, lo que implica una simplificación del diseño a solamente fuerzas aplicadas.

Tabla 31: Resultados de las fuerzas máximas en el soporte A.

Carga	Fx	Fy	Fz
Unidad	[N]	[N]	[N]
Operación	- 1.620	- 80.019	-
Térmica máxima	- 4.265	- 49.561	-
Térmica mínima	4.804	29.588	-
Ocasional máxima	1.748	- 32.164	-

Tabla 32: Resultados de las fuerzas máximas en el soporte B.

Carga	Fx	Fy	Fz
Unidad	[N]	[N]	[N]
Operación	- 2.900	- 10.177	-
Térmica máxima	1.486	54.508	-
Térmica mínima	- 3.010	- 32.262	-
Ocasional máxima	- 2.243	42.285	-

A modo comparativo entre los tres modelos la Tabla 33 indica las fuerzas redistribuidas en los soportes críticos indicados con anterioridad, específicamente se trata del mismo soporte 6, el cual no se modifica su ubicación manteniendo la restricción a las cargas más relevantes de operación, cambio en la temperatura y la ocasional máxima.

Tabla 33: Fuerzas y momento en soporte más solicitado.

Carga	Fx	Fy	Fz
Unidad	[N]	[N]	[N]
Operación	-	- 62.004	- 35.197
Térmica máxima	-	- 36.258	- 83.927
Térmica mínima	-	17.508	50.108
Ocasional máxima	-	- 98.435	-117.150

4.4.7 Resultados del desplazamiento máximo

La Tabla 34 muestra los desplazamientos máximos alcanzados en la zona crítica. De los cuales se desprende el máximo de 2,89 [mm] en el eje axial para ese punto, el cual se atribuye a la menor rigidez restrictiva de la zona.

Tabla 34: Desplazamientos máximos alcanzados en la configuración de soportes.

Carga	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Unidad	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
Térmica máxima	-2,05	0,04	0,13	0,22	-0,22	-0,20
Térmica mínima	2,89	-0,05	-0,18	-0,13	0,13	0,15

Para lograr una enfatización se muestra los desplazamientos en puntos cercanos a los soportes A y B. La Tabla 35 y Tabla 36 muestran el movimiento de la tubería ante cargas térmicas en puntos cercanos (aproximadamente 1[m]) de los soportes, estos desplazamientos consideran un movimiento predominante en el eje Z, es decir en el eje axial, con valores entre 2 a 7 [mm].

Tabla 35: Desplazamiento máximo a 1 [m] del soporte A

Carga	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Unidad	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
Térmica máxima	-0,20	-0,55	-6,14	-0,03	0,00	0,08
Térmica mínima	-0,07	-0,14	5	-0,01	0	0,03

Tabla 36: Desplazamiento máximo a 1 [m] del soporte B.

Carga	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Unidad	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[°]	[°]
Térmica máxima	-0,09	0,15	-4,26	-0,01	-0,01	0,08
Térmica mínima	-0,09	-0,46	3,82	0,03	-0,02	0,03

4.5 COMPARATIVA EN COSTOS DE SOPORTES

La evaluación económica de la configuración alternativa se desarrolló a partir de la planilla de costos del proyecto original, donde se diferencian los costos en base a la disciplina de construcción. La Tabla 37 muestra los costos generales de cada disciplina que contribuye a la construcción del proyecto base.

Tabla 37: Coste de referencia en construcción del modelo base.

Item	Disciplina	Costos [USD]
1	Mecánica	600
2	Piping	82.000
3	Civil	22.000
4	Estructura	26.000
5	Construcción	185.000
6	Ingeniería e Inspección	32.000
Total, construcción y montaje		350.000

En base a la tabla se considera un total estimado de 350.000 USD de los cuales se considera a los costes de construcción, obras civiles y *piping* los principales focos de atención ante el cambio en la configuración de soportes sumando entre ellos más del 80% del total de la obra. Esto implica que un cambio significativo en cuestión de optimización de recursos en estas disciplinas impactaría en gran medida los recursos de proyección final.

4.5.1 Desglose del coste del bloque de hormigón

La eliminación del machón de hormigón permite suprimir las partidas de obra civil correspondientes a excavación, emplentillado, armadura, moldaje, hormigonado y elementos asociados. El costo eliminado por este concepto, ajustado según los factores considerados en el resumen de costos del proyecto, se presenta en la Tabla 38.

Tabla 38: Costo eliminado por supresión del machón de hormigón.

Ítem	% Estimado	Costo [USD]
------	------------	-------------



Excavación y movimiento de tierra	20%	14.000
Moldajes y enfierradura	15%	10.000
Hormigón (suministro + bombeo)	25%	16.500
Pernos de anclaje estructurales	5%	3.500
Mano de obra civil	15%	10.000
Equipos (retroexcavadora, grúa, etc.)	10%	6.700
Ingeniería, topografía e inspección	10%	6.500
Costo total bloque	100%	67.200

4.5.2 Desglose del coste soporte simple

La configuración alternativa considera, adicionalmente, la incorporación de dos soportes simples nuevos para la tubería de 24", cuyo costo se incluye dentro de la partida de estructuras. El costo total de estos elementos, ajustado de acuerdo con los factores del resumen de costos, se presenta en la Tabla 39.

Tabla 39: Costo de soportes simples adicionales en la configuración alternativa.

Ítem	% Estimado	Costo [USD]
Acero estructural (planchas + cuna)	30%	800
Corte y rolado	10%	300
Soldadura y consumibles	15%	400
Mano de obra fabricación	20%	520
Pintura / protección anticorrosiva	5%	150
Transporte a obra	5%	150
Montaje en terreno (grúa + HH)	15%	500
Costo total soporte 24"	100%	2.820

CAPÍTULO 5 : DISCUSIÓN

5.1 ALCANCE

El presente capítulo tiene por finalidad interpretar y evaluar críticamente los resultados obtenidos en el Capítulo 4, integrando de forma explícita los valores cuantitativos más relevantes para fundamentar el juicio técnico asociado a cada configuración analizada. A diferencia del capítulo anterior, donde los valores fueron presentados de manera objetiva y descriptiva, la discusión incorpora comparaciones directas, relaciones de utilización y órdenes de magnitud que permiten validar la coherencia del análisis, justificar las decisiones de diseño y evaluar la eficiencia estructural, constructiva y económica de las soluciones estudiadas.

5.2 EVALUACIÓN DE LA BASE COMPARATIVA

5.2.1 Influencia de la configuración de restricciones y la identificación de zonas críticas

Los resultados del modelo base evidencian que la presencia del bloque de hormigón introduce una condición de restricción que segmenta estructuralmente el sistema, generando una respuesta prácticamente independiente entre el tramo ubicado aguas arriba y el tramo posterior al anclaje. Bajo cargas sostenidas, los esfuerzos máximos en la tubería de acero alcanzan aproximadamente 50 [MPa], lo que equivale a cerca del 26 % del esfuerzo permisible definido por ASME B31.4. Este nivel de utilización es reducido y, desde una perspectiva estrictamente normativa, no representa una condición crítica ni anticipa problemas de integridad a largo plazo para el tramo metálico.

En contraste, la tubería de HDPE registra esfuerzos sostenidos del orden de 4,3 [MPa] observados directamente en la unión con el acero. Si bien este valor absoluto es considerablemente menor que el observado en el acero, corresponde aproximadamente al 53 % del esfuerzo admisible de largo plazo para el material. Esta diferencia en porcentaje de utilización refleja no solo la disparidad de propiedades mecánicas entre ambos materiales, sino también el enfoque normativo diferenciado respecto a materiales viscoelásticos, cuyo comportamiento depende del tiempo y la temperatura.

Desde el punto de vista normativo, la configuración original cumple holgadamente los criterios de diseño asociados a cargas sostenidas. No obstante, el análisis debe complementarse considerando la naturaleza viscoelástica del HDPE, particularmente los fenómenos de deformación diferida (creep) bajo solicitaciones permanentes y la posible acumulación de daño por fatiga frente a variaciones térmicas y transientes operacionales, los cuales pueden modificar la redistribución de esfuerzos y la rigidez efectiva del sistema en el largo plazo.

5.2.2 Comportamiento del HDPE frente a restricciones severas

De acuerdo con el PPI bajo esfuerzo constante la deformación en tuberías de polietileno evoluciona de manera aproximadamente logarítmica con el tiempo, lo que implica

que, aun manteniendo constante la carga aplicada, la deformación continúa incrementándose progresivamente. En sistemas con restricción radial significativa, esta condición puede traducirse en aumento de las deformaciones o redistribución de tensiones en el largo plazo (Plastics Pipe Institute, 2017).

El análisis del modelo inicial permite identificar con claridad la sensibilidad del HDPE frente a cargas térmicas y ocasionales, particularmente en presencia de restricciones rígidas. En condiciones de expansión térmica, tanto por incremento como por disminución de temperatura, los esfuerzos máximos en la tubería se mantienen en torno al 20 % del esfuerzo admisible, lo que confirma que, desde una perspectiva estrictamente normativa, el sistema no presenta una condición crítica bajo este tipo de solicitaciones. Sin embargo, el estudio detallado de la distribución de esfuerzos permite reconocer zonas donde la restricción geométrica condiciona significativamente la respuesta estructural.

En particular, se identifica un punto relevante en el inicio del cambio de altitud de la tubería, cuando esta comienza a ascender por el talud. En dicha sección, los esfuerzos en la tubería de acero alcanzan valores del orden de 80 [MPa], aun considerablemente inferiores al límite permisible manteniendo un factor de seguridad de 2,5.

Los esfuerzos sostenidos y térmicos se mantienen dentro de los límites admisibles, el análisis de combinaciones ocasionales prevé una condición más exigente en el tramo termoplástico, sin embargo, aún bajo la combinación sísmica más desfavorable, el esfuerzo máximo en el HDPE alcanza aproximadamente 2 [MPa], un 12 % del esfuerzo admisible estimado. Con esto se discute que la tubería de HDPE dentro del marco de esfuerzo admisible se encuentra dentro de todos los rangos, al contrario de lo esperado, en consecuencia, se debe ser más estricto ya que, bajo el criterio de deformaciones, la tubería presenta desplazamientos considerables y poco recomendados en el desarrollo de la línea.

La solución implementada corresponde al reemplazo del tramo de HDPE adyacente al bloque por tubería de acero carbono manteniéndose el bloque de hormigón como anclaje rígido, por lo que a ese punto, la incorporación de una junta flexible se justifica debido a la rigidez ahora impuesta por el acero en contra del bloque

5.2.3 Comparación estructural directa con el modelo base

En el modelo actual, el esfuerzo sostenido máximo en acero aumenta a 67,33 MPa (37 % del permisible). Este incremento es esperable debido al aumento de rigidez del tramo y la cantidad de peso por unidad de la nueva línea de acero, sin embargo, continúa ampliamente dentro del margen normativo. Lo más relevante es que se mantiene la estructura de base en los soportes, indicando que a pesar del cambio de material los soportes siguen siendo “utilizables” resistiendo una mayor cantidad de carga esperada.

Se evidencia una reducción del orden del 72 % donde de 84 [MPa] se reducen a 23,46 [MPa] en la temperatura de diseño. Esta disminución confirma que la junta flexible introduce una desacople efectivo entre el tramo rígido y el anclaje, reduciendo la transferencia de deformaciones impuestas. Por último, un incremento en los esfuerzos ocasionales, donde en estricto rigor se puede conferir a múltiples factores, uno de ellos es el cambio de material, al ser más denso, el peso sobre el codo que representa el esfuerzo de 113 [MPa], también se puede atribuir un aumento en el desplazamiento axial debido a la junta flexible, donde ante

la carga sísmica evaluada este desplazamiento es más “libre” y considera un movimiento más significativo en esa zona, pero de muy baja ocurrencia.

5.2.4 Mejora en las reacciones del bloque

La Tabla 40 muestra la comparación entre el modelo base y el modelo actual del comportamiento de las fuerzas en el bloque. En ambos modelos se utiliza la fuerza reactiva resultante y los momentos resultantes. En cada caso se compara el cambio del modelo actual en base al modelo 1.

Tabla 40: Comparación entre las fuerzas ejercidas en el bloque.

Caso	F Modelo 1	F Modelo 2	$\Delta F $	M Modelo 1	M Modelo 2	$\Delta M $
	[N]	[N]	[%]	[Nm]	[Nm]	[%]
Operación	155.915	124.168	-20,40%	5.869	2.554	-56,50%
Térmica máxima	1.359.831	31.644	-97,70%	8.537	1.259	-85,20%
Térmica mínima	785.136	36.856	-95,30%	5.075	1.756	-65,40%
Ocasional máxima	1.416.438	235.967	-83,30%	2.702	4.469	65,40%

Los resultados comparativos evidencian una disminución drástica de la fuerza resultante transmitida al bloque al pasar del modelo base al modelo actual. En condición térmica máxima, el modelo base alcanzaba una fuerza resultante del orden de 1.360 [kN], mientras que en el modelo actual se reduce a 32 [kN], equivalente a una variación de -97,7 %. Esto es significativamente considerable debido a que el nuevo modelo reemplazante del HDPE cumple con el objetivo de minimizar las cargas que soporta el bloque en el equivalente a 44 veces su valor estimado de carga, esto considera una mejora en la distribución de cargas aplicadas al bloque. Magnitudes similares se observan en condición térmica mínima (-95,3 %) y en condición ocasional máxima (-83,3 %), lo que confirma que la intervención no solo atenúa la respuesta térmica, sino también la transferencia de demanda bajo combinaciones operacionales con acciones excepcionales. En paralelo, los momentos resultantes transmitidos al bloque disminuyen de forma consistente en las combinaciones térmicas (hasta -85,2 % en térmica máxima), lo que indica una disminución del desplazamiento directo de la porción de tubería conectada al bloque. Por otro lado, el momento ocasional máximo considera un aumento en el total de 65.4% con respecto al percibido en el modelo base. Esto se logra justificar ante el aumento de rotación perceptible por la junta, al estar lo suficientemente cerca y al considerarse como una discontinuidad de rigidez entre tramos, la distribución del peso del tramo entre el bloque y la junta ejerce un momento en el soporte más cercano al bloque por ende la reacción es mayor ante un aumento de carga en cualquier

eje. Esto también explica el aumento del esfuerzo ocasional en la tubería para el modelo actual.

La incorporación de una junta flexible introduce un tramo con rigidez axial y lateral reducida respecto del sistema, aumentando la capacidad del sistema para deformarse localmente y, por ende, disminuyendo la reacción requerida para satisfacer compatibilidad geométrica. Manuales técnicos de juntas elastoméricas describen este rol como un mecanismo para acomodar movimientos, aliviar tensiones por expansión/contracción y reducir la transmisión de esfuerzos hacia la línea y sus apoyos, lo que es coherente con la reducción observada en el bloque del modelo actual. (Garlock Sealing Technologies, 2023).

5.2.5 Evaluación de los desplazamientos en la zona crítica

La Tabla 41 muestra la comparativa de los desplazamientos máximos en la condición de expansión térmica de la base comparativa. Este desplazamiento es evaluado en la zona crítica, donde en todos los modelos se evidencia una reducción del desplazamiento total considerado por cada uno. La variación del desplazamiento se realiza en base al modelo base.

Tabla 41: Comparación del desplazamiento máximo en zona crítica de los modelos.

Modelo	Dx [mm]	Dy [mm]	Dz [mm]	Dtotal [mm]	Variación
Modelo base	-1,71	6,43	10,99	12,85	—
Modelo actual	1,08	-0,94	-0,28	1,46	89 %

La comparación de los desplazamientos se realiza en el punto en común para tener una base sólida de referencia. Se omite las rotaciones debido a la poca variación que presentan. La variación del desplazamiento es considerablemente menor en el modelo actual. El cambio de material y la junta evidencia la absorción de casi el total del movimiento percibido en el modelo base, donde, debido a la expansión del HDPE (10 veces mayor a la del acero) alcanza los 11 [mm] aproximadamente en la dirección axial y luego el modelo actual donde el desplazamiento 10 veces menor al total del modelo base.

Existe un punto sin comparación explícita que contribuye al comportamiento del HDPE. La evaluación de desplazamientos del modelo base en el punto entre soportes para la tubería termoplástica muestra valores máximos totales del orden de 19 [mm]. Esta magnitud de desplazamiento revela una marcada diferencia de rigidez entre el tramo metálico anclado y el tramo termoplástico. En consecuencia, no solo limita a la expansión del sistema, sino que condiciona la forma en que las deformaciones y reacciones se redistribuyen, concentrando la respuesta en el tramo flexible.

5.3 CONFIGURACIÓN DE LA SOLUCIÓN

La configuración alternativa plantea la eliminación del machón de hormigón como elemento de anclaje rígido absoluto y su reemplazo por una redistribución de soportes a lo

largo del tramo crítico. Esta modificación implica un cambio sustancial en la condición de borde del sistema, ya que se elimina la restricción total que segmentaba estructuralmente la línea en dos dominios independientes. Desde el punto de vista del análisis de flexibilidad, esta decisión transforma un sistema dominado por una restricción severa en uno gobernado por su flexibilidad global.

No obstante, se espera que la sola eliminación del machón no constituye una solución estructuralmente suficiente. La evaluación de los modelos anteriores demuestra que el comportamiento crítico no se origina exclusivamente en la presencia del anclaje rígido, sino también en la incompatibilidad mecánica entre materiales en la zona de transición ubicada en el inicio del ascenso por el talud.

Respecto a la separación entre soportes, la configuración adoptada considera una distancia aproximada de 3 [m] entre los apoyos que reemplazan al machón. Manuales de diseño de soportes, (Manufacturers Standarization Society, 2009; Mohinder L Nayyar, 2000), indican que para tuberías de acero de 24 pulgadas el espaciamiento típico se encuentra en el rango de 6 a 9 [m], por lo que una distancia menor no resulta perjudicial para el diseño.

5.3.1 Cambio y mejora de los puntos críticos

En los modelos anteriores se identificó que la unión HDPE acero concentraba deformaciones relevantes en la condición de carga sostenida de la tubería. Esta condición se explica por la diferencia significativa entre el módulo de elasticidad del acero (200 [GPa]) y el del HDPE (1,2 [GPa] inicial y considerablemente menor en condición de largo plazo), así como por la diferencia en los coeficientes de expansión térmica y la capacidad de deformación de ambos materiales.

En consecuencia, mantener la materialidad original de HDPE en la sección crítica del talud, aun eliminando el machón, no resultaba completamente confiable. El *PPI* señala que bajo cargas sostenidas el HDPE presenta deformación progresiva por relajación, lo que puede amplificar desplazamientos en configuraciones con pendiente si la soportación no controla adecuadamente la distancia entre apoyos (Plastics Pipe Institute, 2017).

La modelación actual demostró cuantitativamente que el reemplazo del tramo de HDPE por acero resolvió la condición crítica observada en el modelo base. Los resultados obtenidos evidencian una reducción del esfuerzo térmico máximo, así como la eliminación de la excedencia de esfuerzo en el tramo termoplástico bajo carga ocasional. Esta mejora no solo se asocia a la incorporación de la junta flexible, sino también a la disminución de la expansión diferencial al sustituir HDPE por acero. Desde este punto de vista, el cambio de material en la zona crítica se establece como una condición necesaria.

5.3.2 Diferencias constructivas y soportación

En la configuración alternativa, se configura el tramo de acero en la zona de ascenso por el talud, pero se elimina el machón de hormigón y se redistribuye la soportación mediante apoyos estándar. Esta configuración no requiere la utilización de junta flexible. La razón es estructural. En el modelo actual la junta actuaba como elemento de desacople local frente a una restricción rígida del bloque; en el modelo solución, al eliminar el anclaje absoluto, el

sistema incrementa su longitud efectiva deformable y la expansión térmica se absorbe mediante flexión distribuida a lo largo del trazado.

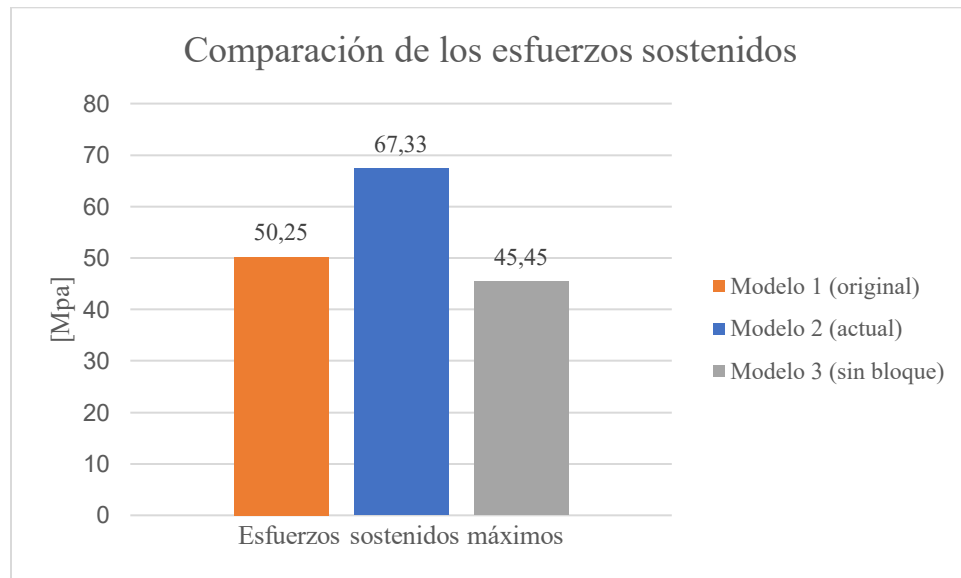


Figura 48: Comparación de los esfuerzos sostenidos máximos en cada modelo.

Los resultados obtenidos confirman este comportamiento. La Figura 48, muestra de manera comparativa los esfuerzos máximos sostenidos entre los tres modelos. El esfuerzo máximo alcanza los 67.33 [MPa] para el modelo actual, 50.25 [MPa] para el modelo base y 45,45 [MPa] para el modelo solución. En el modelo actual el aumento se debe al cambio de densidad del material involucrado, el acero en comparación con el HDPE es 8 veces mas denso y al estar en discontinuidad con la junta flexible, el efecto generado es mantener un porcentaje mayor de peso que siente en la zona crítica. Por otro lado, la disminución en el modelo solución se debe a que la estructura de la tubería de acero es continua, es decir, toda la conexión que tiene se distribuye por los soportes y no recae directamente en la tubería.

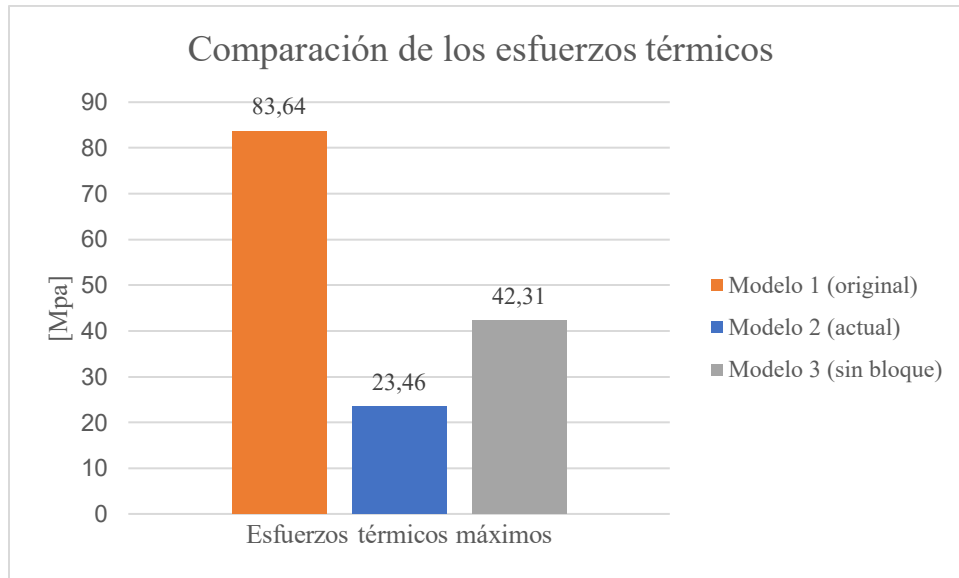


Figura 49: Comparación de los esfuerzos térmicos máximos en cada modelo

La Figura 49, muestra de manera comparativa los esfuerzos máximos de expansión térmica entre los tres modelos. El esfuerzo máximo alcanza los 83.64 [MPa] para el modelo base, 23.46 [MPa] para el modelo actual y 42,31 [MPa] para el modelo solución. En el modelo base el valor es elevado debido a la restricción impuesta del bloque y la expansión del HDPE, que a la misma temperatura su expansión es notoria. Se ve en el modelo actual donde se reduce el esfuerzo por expansión a pesar de mantener el bloque. Luego el modelo solución mantiene un margen reducido por el material de la tubería, al ser reemplazado el tramo de termoplástico, el esfuerzo solo se reduce a las limitaciones por las restricciones, sin embargo, la configuración permite un movimiento más “libre” térmicamente manteniendo niveles de esfuerzo moderados

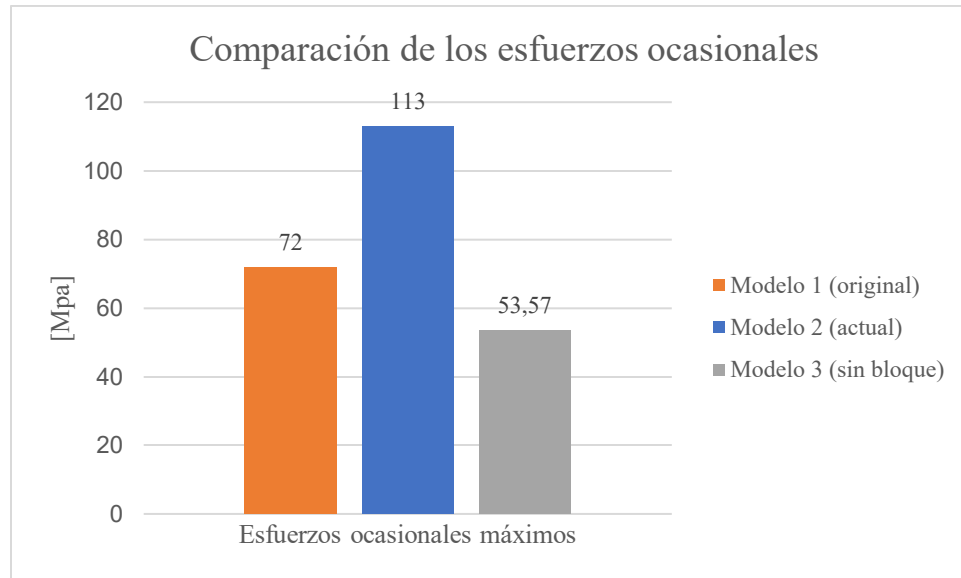


Figura 50: Comparación de los esfuerzos ocasionales máximos en cada modelo

Por último, la Figura 50, compara en combinaciones ocasionales, el valor máximo de los diferentes modelos. Donde el máximo lo alcanza el modelo actual con 113 [MPa] seguido por el modelo base con 72 [MPa] y detrás el modelo solución con 53.57[MPa]. El esfuerzo es mayor en el modelo actual por la carga que se ejerce sobre la tubería, esta configuración aumenta la solicitud estructural de la tubería. Ya se vio que, aunque disminuye las fuerzas y momentos en las cargas anteriores, bajo cargas ocasionales sísmicas compensa el peso total en la tubería y en menor medida en los soportes existentes, a pesar de que cumplen su función adecuadamente. El modelo solución se mantiene al margen debido a que la distribución de carga se dispone en los soportes.

En todos los casos, los valores se mantienen significativamente por debajo de los límites establecidos por ASME B31.4, evidenciando un amplio margen de seguridad en los tres modelos, por lo que normativamente cumplen.

5.3.3 Comparativa en las reacciones del soporte más exigido

La mejora no se limita a la eliminación de las reacciones del bloque. La Tabla 42 expone la comparación del soporte más solicitado entre modelos muestra una disminución relevante de la fuerza resultante en operación, pasando de 118,56 kN (modelo base) a 52,04 kN (modelo actual), equivalente a una reducción 56,1 %, tomando como base el modelo base. En condición ocasional máxima, la disminución también es significativa, de 192,31 kN a 102,32 kN (−46,8 %). En condiciones térmicas, la reducción se mantiene entre −29,7 % (térmica máxima) y −31,5 % (térmica mínima). Estos resultados indican que la intervención no solo descarga al anclaje rígido, sino que también reduce la concentración de demanda en el soporte crítico, lo que favorece un funcionamiento más estable y predecible del sistema de soportación, con menores picos de reacción que puedan gobernar el dimensionamiento de elementos estructurales y de fundaciones locales.

Tabla 42: Comparación entre alternativas de las cargas del soporte.

Caso	F Modelo Base	F Modelo Actual	F Modelo solución	Cambio del modelo Actual	Cambio del modelo solución
	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
Operación	118,56	52,04	71,3	-56,11%	-39,86%
Térmica máxima	98,37	69,19	91,42	-29,66%	-7,07%
Térmica mínima	58,75	40,25	53,08	-31,49%	-9,65%
Ocasional máxima	192,31	102,32	153,02	-46,79%	-20,43%

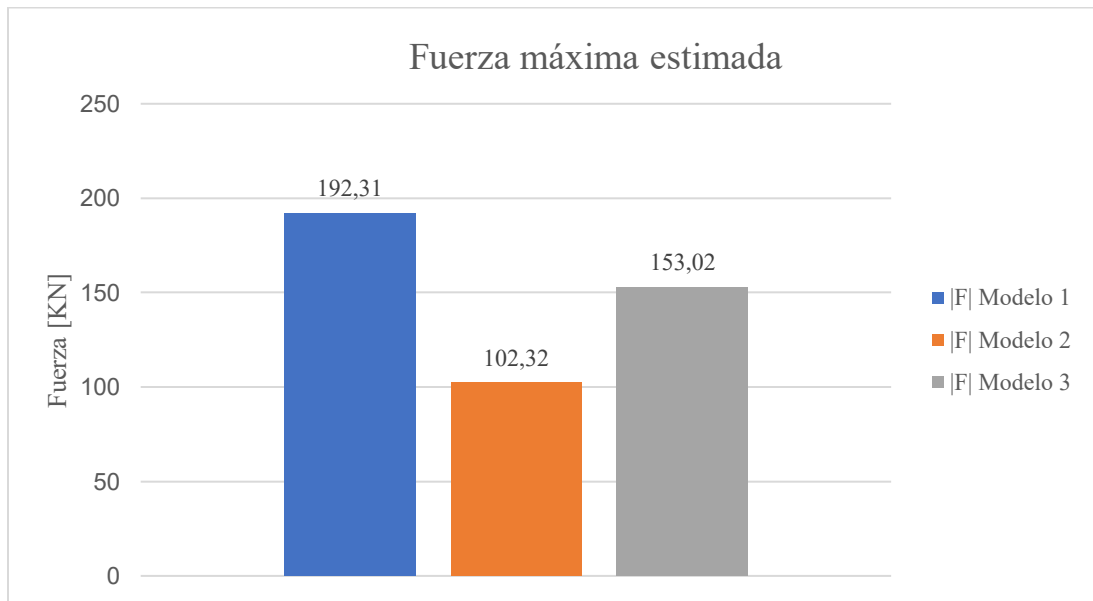


Figura 51: Comparación de la fuerza máxima percibida en el soporte más solicitado.

En la Figura 51 se muestra la comparación de la carga más significativa aplicada al soporte. Se considera a la carga ocasional donde se ve la tendencia a la disminución en los modelos. La carga máxima la presenta el modelo base con 192 [kN] de fuerza resultante, luego el modelo solución con 153 [kN] y por último el modelo actual con 102.3 [kN]. La fuerza disminuye a medida que se concentran los esfuerzos en la tubería, así la carga se puntualiza directamente sobre la tubería y no en el soporte. La carga en el modelo actual se logra explicar de esa forma, luego para el modelo solución mantiene un valor casi promedio entre los modelos de base comparativa, sin embargo, implica una disminución de los esfuerzos que se generan sobre los soportes esta vez.

5.3.4 Evaluación de la configuración de los nuevos soportes

La Tabla 43 muestra la comparación entre la configuración original con bloque de hormigón y la alternativa basada en dos nuevos soportes permite evaluar cuantitativamente la redistribución de cargas y su impacto en el comportamiento estructural global del sistema. En el modelo base, el bloque actúa como un anclaje rígido absoluto, restringiendo completamente los desplazamientos y rotaciones de la tubería. Esta condición se traduce en la concentración de fuerzas axiales de gran magnitud. Bajo carga térmica máxima, la reacción transmitida al bloque alcanza valores del orden de 1.400 [kN] en la cara frontal y el recíproco en la cara posterior. En condición ocasional máxima, las fuerzas superan los 1.410 [kN], en el bloque. Estas magnitudes evidencian que la expansión térmica de la línea es transformada casi íntegramente en reacción axial debido a la incompatibilidad de deformaciones impuesta por la restricción rígida.

Tabla 43: Comparación de las fuerzas actuantes del bloque y los soportes.

Caso	F Bloque modelo base	F Bloque modelo actual	F Soporte A	F Soporte B
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Operación	156	124	80	11
Térmica máxima	1.359	32	49,7	55
Térmica mínima	785	37	30	32
Ocasional máxima	1.416	236	32,2	42

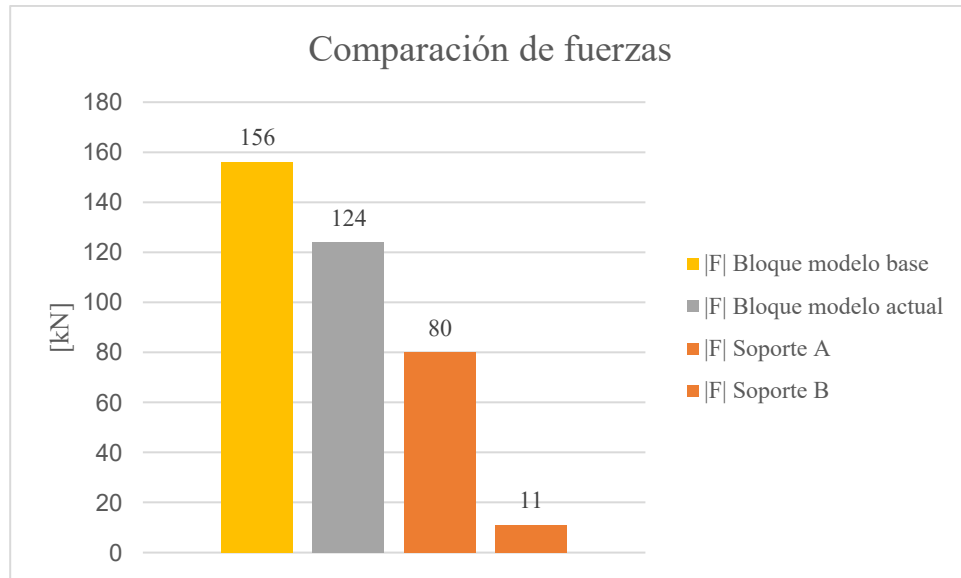


Figura 52 Comparación de fuerzas en la zona del bloque.

En la Figura 52 se muestra la comparación de la carga en operación aplicada a los soportes nuevos, reemplazantes del bloque. La carga máxima la presenta el modelo base con 152 [kN] de fuerza resultante en el bloque, luego el modelo actual con 124 [kN] y por último el modelo solución con la suma entre los dos soportes de 91 [kN]. La razón por la que la fuerza disminuye es porque la restricción debida a los soportes es potencialmente radial, así las cargas se distribuyen más explícitamente en la tubería.

La configuración alternativa, que elimina completamente el bloque y lo reemplaza por dos soportes simples separados aproximadamente 3 [m], presenta un comportamiento estructural distinto. Las fuerzas máximas transmitidas a los nuevos soportes se mantienen en rangos del orden de 50 a 80 [kN] bajo las combinaciones más exigentes. Estas magnitudes son aproximadamente veinte veces menores que las registradas en el bloque del modelo base. La diferencia fundamental radica en que el sistema deja de comportarse como una estructura hiperestática con anclaje dominante y pasa a responder mediante flexibilidad distribuida. La eliminación de la restricción absoluta incrementa la longitud deformable efectiva, permitiendo que la expansión térmica se absorba mediante pequeñas rotaciones y flexiones distribuidas en el trazado.

La razón por la cual la configuración funciona únicamente con dos soportes responde a criterios de equilibrio estático y compatibilidad de deformaciones. El soporte A controla la estabilidad del tramo aguas arriba y el soporte B la del tramo aguas abajo, garantizando equilibrio vertical y lateral. El grado de libertad axial queda liberado, evitando la generación de esfuerzos secundarios elevados. La incorporación de un tercer soporte reintroduciría una condición de sobre restricción, aumentando las fuerzas térmicas y reduciendo la eficiencia estructural del sistema. En consecuencia, la configuración con dos soportes representa la solución estáticamente suficiente y estructuralmente más simple, minimizando concentraciones de carga y eliminando el elemento de mayor demanda estructural y constructiva.

En cuanto a los desplazamientos en zonas cercanas a los soportes se espera un desplazamiento mayor a los evaluados anteriormente pero controlable en términos globales

de flexibilidad, concretamente a 1 m del soporte A (Tabla 35), el movimiento bajo carga térmica presenta un componente axial dominante, alcanzando -6,14 [mm] en térmica máxima y 5,00 [mm] en térmica mínima, con un desplazamiento total del orden de 6,17 [mm] y 5,00 [mm], respectivamente. De manera análoga, a 1 m del soporte B (Tabla 36), el desplazamiento axial Dz alcanza -4,26 [mm] en térmica máxima y 3,82 [mm] en térmica mínima, con desplazamientos totales aproximados de 4,26 [mm] y 3,85 [mm]. Estas magnitudes superan las observadas en la zona crítica del modelo actual (Tabla 27), donde el desplazamiento total térmico mínimo es 1,46 [mm], y también se ubican por sobre el valor del modelo solución en zona crítica (Tabla 34), con 2,90 [mm] en térmica mínima; sin embargo, permanecen acotadas en un rango milimétrico coherente con una deformación controlada. La interpretación mecánica es consistente: el aumento de desplazamiento permitido alrededor de los soportes A y B reduce la incompatibilidad de deformaciones asociada a la expansión térmica, disminuyendo la sobrerrestricción y, en consecuencia, reduciendo las fuerzas de restricción transmitidas a los apoyos, sin comprometer la estabilidad global del tramo evaluado

5.4 SÍNTESIS DE LA DISCUSIÓN TÉCNICA

La discusión técnica desarrollada a lo largo del capítulo permite extraer conclusiones claras respecto al efecto que tiene la configuración de soportación sobre el comportamiento estructural del sistema. La comparación entre el modelo base con bloque rígido, el modelo actual con junta flexible y bloque, y la configuración optimizada con dos nuevos soportes demuestra que la variable determinante no es únicamente la magnitud de los esfuerzos, sino la forma en que el sistema gestiona la expansión térmica y distribuye las cargas.

Desde el punto de vista de las fuerzas, el modelo base evidencia una concentración significativa de reacciones en el bloque, alcanzando valores del orden de 1,36 MN bajo condición térmica, lo que confirma que la restricción absoluta transforma la expansión en esfuerzos secundarios elevados. La incorporación de la junta flexible reduce drásticamente estas reacciones, llevándolas a rangos cercanos a 30 kN, mientras que la configuración con dos soportes elimina completamente el anclaje rígido y redistribuye las cargas en magnitudes del orden de 50 a 80 kN. Esta disminución de orden de magnitud confirma que la reducción de hiperestaticidad y la liberación del grado de libertad axial disminuyen la demanda estructural sobre los apoyos.

En términos de esfuerzos en la tubería, todos los modelos cumplen con los límites permisibles; sin embargo, el modelo base presenta mayor sensibilidad a combinaciones térmicas debido a la incompatibilidad de deformaciones. La solución con dos soportes mantiene los esfuerzos en rangos inferiores al porcentaje crítico del permisible adoptado, evidenciando que el aumento de desplazamientos no se traduce en un incremento perjudicial de tensiones, sino en una respuesta más compatible con el comportamiento mecánico del material.

Respecto a los desplazamientos, el modelo base concentra deformaciones en la zona crítica, alcanzando valores cercanos a 12,85 [mm] en condición térmica mínima. El modelo actual reduce ese valor a aproximadamente 1,46 [mm] mediante absorción localizada, mientras que el modelo solución presenta desplazamientos del orden de 2,90 [mm] en la zona crítica y entre 4 y 6 [mm] en las proximidades de los nuevos soportes. Aunque estos valores

son mayores que en la configuración con bloque y junta, permanecen en rangos milimétricos controlados y coherentes con un sistema que ahora permite deformación distribuida. Esta mayor movilidad explica directamente la reducción de fuerzas de restricción observada.

En síntesis, la evaluación conjunta de esfuerzos, fuerzas y desplazamientos demuestra que la configuración con dos soportes no solo cumple los criterios normativos adoptados, sino que optimiza el comportamiento estructural al transformar reacciones concentradas en deformaciones compatibles. La evidencia cuantitativa confirma que la eficiencia estructural del sistema no se logra mediante rigidización, sino mediante un equilibrio adecuado entre estabilidad y flexibilidad, reduciendo concentraciones de carga, manteniendo esfuerzos dentro de límites permisibles y permitiendo desplazamientos controlados que disminuyen la sobrerrestricción global del tramo analizado.

5.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica, asocia los costes que presenta la solución, compara netamente la construcción y montaje del bloque en el diseño base, y la fabricación y montaje de los soportes simples.

Con un total estimado de 350.000 USD de obra completa y una consideración de obras civiles y relacionadas al montaje de un 80% del total, la eliminación del bloque de hormigón es un punto clave de disminución de costo y presupuesto en el desarrollo del proyecto. El desglose constructivo de coste del bloque de hormigón alcanza un total de 67.200 USD. Por otro lado, la estimación de la fabricación y montaje de un soporte simple rodea los 3.000 USD, de los cuales se puede agregar un factor de resguardo de 3 que encarece el coste. Este factor depende de la dificultad de instalación del soporte, en este caso la instalación permite una holgura en el coste que a pesar de ser considerablemente elevada es mucho menor a lo proyectado por el bloque, alrededor de unas 8 veces el coste. Un punto se puede establecer considerando lo último discutido técnicamente donde, se puede mantener la soportación ya construida y la tubería lograría ubicarse dentro de los parámetros de diseño establecido por la normativa. Según lo establecido en el modelo solución se utilizaron solamente 2 soportes extra de la configuración y se cambió el material de la tubería. Según el desglose de ambos el coste total se vería reducido ante la no construcción del bloque agregando los cambios efectuados en el diseño.

CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES

El presente trabajo analizó el comportamiento estructural de un tramo de tubería compuesto por HDPE y acero, emplazado en un sistema de transporte de fluidos en contexto minero, donde la existencia de un bloque de hormigón rígido generaba concentraciones de esfuerzos y restricciones térmicas significativas. La problemática se centró en evaluar si dicha condición de anclaje absoluto era estructuralmente eficiente o si inducía esfuerzos secundarios innecesarios producto de la incompatibilidad de deformaciones térmicas. Para ello, se desarrolló una modelación tridimensional mediante AutoPIPE, considerando las propiedades mecánicas dependientes del material, las condiciones de carga sostenida, térmica y ocasional, y el marco normativo adoptado para la verificación de esfuerzos permisibles. Se compararon tres configuraciones estructurales: un modelo base con bloque rígido, un modelo actual con junta flexible y bloque, y un modelo solución que elimina el bloque e incorpora dos nuevos soportes metálicos. La evaluación se realizó a partir del análisis cuantitativo de fuerzas de reacción, esfuerzos longitudinales y desplazamientos en zonas críticas previamente identificadas.

Se identificó las zonas críticas del sistema, el análisis permitió determinar que la mayor concentración de esfuerzos y desplazamientos se localiza en el tramo curvo asociado al inicio del ascenso por el talud, particularmente bajo combinaciones térmicas. En el modelo base, esta zona alcanzó desplazamientos totales del orden de 12,85 [mm] en condición térmica mínima, evidenciando la incompatibilidad entre la expansión térmica y la restricción rígida impuesta por el bloque. Asimismo, las reacciones transmitidas al bloque superaron los 1,36 MN, confirmando que la condición de anclaje absoluto concentraba la respuesta estructural en un punto específico del sistema. La identificación cuantitativa de esta zona permitió establecer el foco del análisis comparativo posterior.

Se modeló y evaluó el comportamiento estructural bajo distintas configuraciones de soportación, la comparación entre modelos demostró que la condición de restricción influye directamente en la magnitud de las reacciones y en la redistribución de esfuerzos. En el modelo actual con junta flexible, la reacción térmica máxima se redujo a aproximadamente 31,5 [kN], lo que representa una disminución cercana al 97,7 % respecto al modelo base. Sin embargo, esta reducción se logró mediante absorción localizada de deformaciones. En el modelo solución, que elimina el bloque y redistribuye la soportación en dos apoyos simples, las fuerzas máximas transmitidas a los soportes se mantuvieron en el rango de 50 a 80 [kN], es decir, aproximadamente veinte veces menores que las del modelo base, confirmando que la disminución de restricciones reduce las fuerzas sin generar incrementos críticos en los esfuerzos longitudinales de la tubería, los cuales permanecieron por debajo del porcentaje admisible definido por el marco normativo adoptado.

Se propuso y se validó una configuración estructural optimizada, los resultados evidenciaron que la solución basada en dos soportes metálicos permite transformar la energía asociada a la restricción térmica en desplazamientos controlados. En la zona crítica, el desplazamiento térmico del modelo solución fue del orden de 2,90 [mm], valor superior al del modelo con junta (1,46 [mm]) pero aproximadamente un 77 % menor que el modelo base, lo que confirma que el sistema ahora permite deformación distribuida sin concentraciones excesivas. En las proximidades de los nuevos soportes, los desplazamientos alcanzaron



magnitudes entre 4 y 6 [mm], manteniéndose en un rango milimétrico compatible con estabilidad estructural. Esta mayor movilidad explica directamente la reducción de reacciones observada y demuestra que la solución optimizada cumple simultáneamente con criterios de seguridad estructural, compatibilidad de deformaciones y eficiencia constructiva.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten afirmar que los tres objetivos específicos fueron alcanzados mediante una evaluación cuantitativa consistente, demostrando que la configuración con dos soportes reduce significativamente las fuerzas de restricción, mantiene los esfuerzos dentro de límites permisibles y permite desplazamientos controlados que mejoran el comportamiento global del sistema.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- ASME. (2019). *ASME B31.4: "Pipeline Transportation Systems for liquids and Slurries"* (2019 Edition). American Society of Mechanical Engineers.
- Bentley Systems, I. (2014). *Extraordinary Infrastructure of the Be Inspired Awards THE AUTOPIPE PROJECT SHOWCASE*. www.bentley.com
- Boresi, A., Schmidt, R., & Sidebottom, O. (2003). *Advance Mechanics of Materials*.
- Consejo minero. (2024). *Consejo minero*. <https://consejominero.cl/>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2026). *Climatología normal de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins*. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>
- Ediciones Maipo S.A. (2025). *Nueva Minería & Energía. Mayo 2025*, 68–70.
- Fathi, M. (2023). *HDPE PIPING STRESS ANALYSIS USING THE CAESAR SOFTWARE WITH ASME NM.1 AND NM.3.3*. <http://asmedigitalcollection.asme.org/PVP/proceedings-pdf/PVP2023/87455/V002T03A017/7064811/v002t03a017-pvp2023-102680.pdf>
- Garlock Sealing Technologies. (2023). *Garlock Rubber Expansion Joints – Engineering Manual*. <https://www.garlock.com>
- Gere, J. M., & Barry J. Goodno. (2009). *Mecánica de materiales*. Cengage Learning.
- Ham, J., An, J., Kim, B., Choi, J., & Kim, B. (2017). Support optimization for piping system with machine learning. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE, 7A-2017*. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-62356>
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2003). *NCh2369:2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. Instituto Nacional de Normalización.
- M. W. Kellogg Company. (1956). *Design of Piping Systems*. John Wiley & Sons.
- Manufacturers Standardization Society. (2009). *MSS STANDARD PRACTICE SP-58*.
- Manufacturers Standardization Society. (2018). *Pipe Hangers and Supports -- Selection and Application*. Manufacturers Standardization Society.
- Minera Valle Central. (2026). *Minera Valle Central*. <https://mineravallecentral.cl/>
- Mohinder L Nayyar, P. E. (2000). Piping handbook. In *Piping handbook* (7th ed., pp. A01-A51).
- Peng, C.-L., & Peng, A. (2009). *PIPE STRESS ENGINEERING*.
- Petroflex. (2022). *Catálogo de tuberías HDPE*.
- Plastics Pipe Institute. (2017). *Handbook of polyethylene* (2nd ed).
- Prachi, M., Tambe, N., Dhande, K. K., & Jamadar, N. I. (n.d.). *Flexibility and Stress Analysis of Piping System using CAESAR II- Case Study*. Retrieved www.ijert.org

Sam Kannappan. (1986). *INTRODUCTION TO PIPE STRESS ANALYSIS*.

Stewart, H. E., Bilgin, Ö., Kesner, K. E., & Yerges, M. A. (2022). *Anchor Blocks for HDPE Water Pipes: Final Report*.

Strydom, W. (2024). *Anchoring of pipelines Purpose*.

CAPÍTULO 8 ANEXOS

ANEXO A: MODELACION

8.1.1 Definición de la geometría y elementos.

Cada elemento se compone de dos nodos N1 y N2, estos se comportan como elemento finito en 1D, adquiriendo 6 grados de libertad por cada nodo. En cuanto a las propiedades geométricas corresponden a las dimensiones reales del sistema y son las definidas por cada sección de tubería. La distancia entre nodos corresponde a la distancia definida en los planos de construcción de la línea. En tramos rectos se utiliza el criterio de disponer una cantidad de nodos finita que logre abarcar de mejor manera los movimientos de la línea para tener resultados más precisos. En secciones curvas se tendrá un sistema de referencia local como se muestra en la Figura 48, donde el eje curvado siempre será perpendicular al eje y' . El cálculo de esfuerzo en estas secciones se estima mediante factores de intensificación de estrés.

Para los distintos elementos que aportan al sistema, se utilizan librerías de AutoPIPE®, incorporando sus parámetros de rigidez. Los elementos no incluidos en librerías se establecen las bases de modelo en la sección de modelado de piezas especiales.

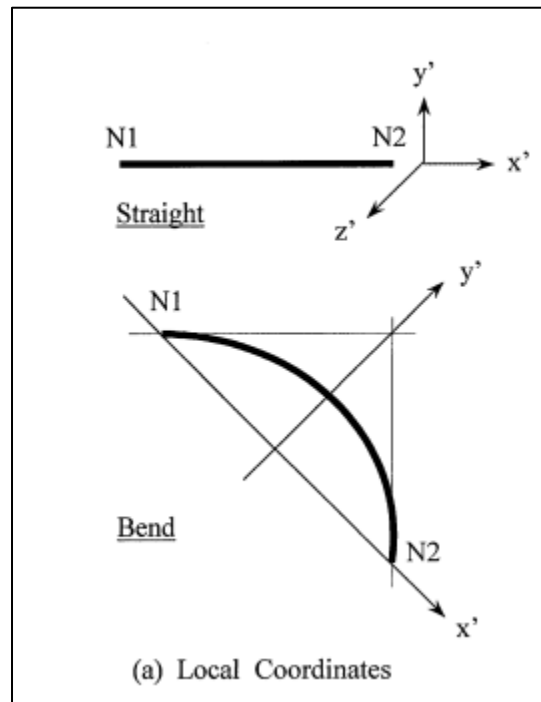


Figura 53: Coordenadas locales de los elementos.

8.1.2 Intensificador de esfuerzo (SIF)

Si bien es mencionado que la tubería se puede modelar fácilmente como viga en tramos rectos, los sistemas más complejos implican cambios de dirección en distintos sentidos implicando el uso de codos. El comportamiento de los codos difiere significativamente ante una tubería recta, cuando se somete a un momento flector, ya que la sección circular transversal al codo tiende a formar un óvalo en presencia de cargas flectoras. Para contrastar el uso de estos elementos en términos de esfuerzo se considera el factor de flexibilidad (k).

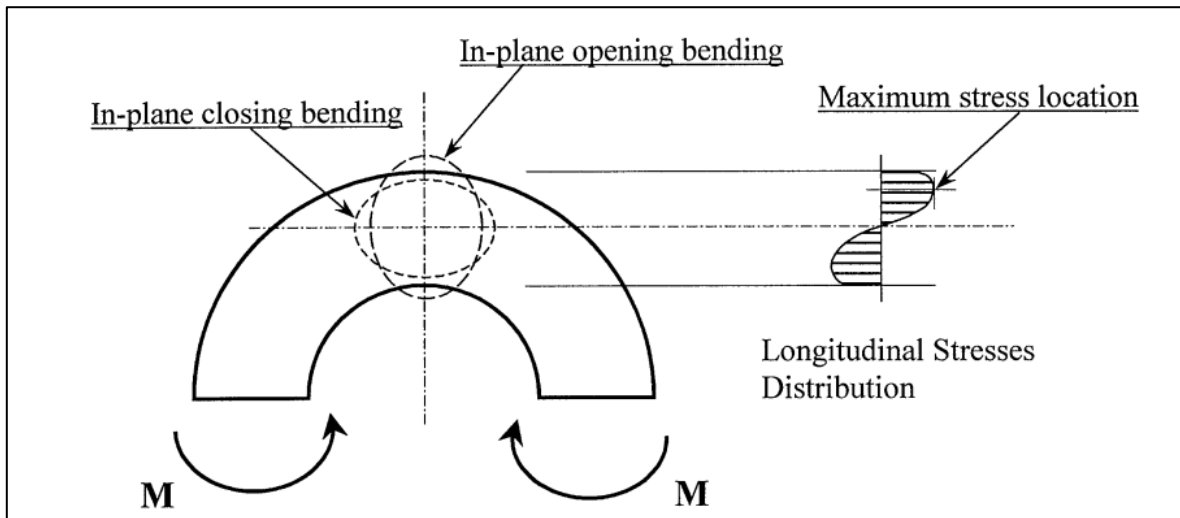


Figura 54: Modelación de codos y elementos curvos.

El incremento del esfuerzo se cuantifica tanto para la dirección longitudinal y circunferencial mediante SIF(i) por sus siglas en inglés. Cuanto mayor es el SIF, más crítico es el esfuerzo en esa parte de la tubería. Para el esfuerzo longitudinal se tiene en el plano y fuera del plano respectivamente. Estos valores se consideran experimentales por lo que se encuentran tabulados en un apartado de la normativa ASME.

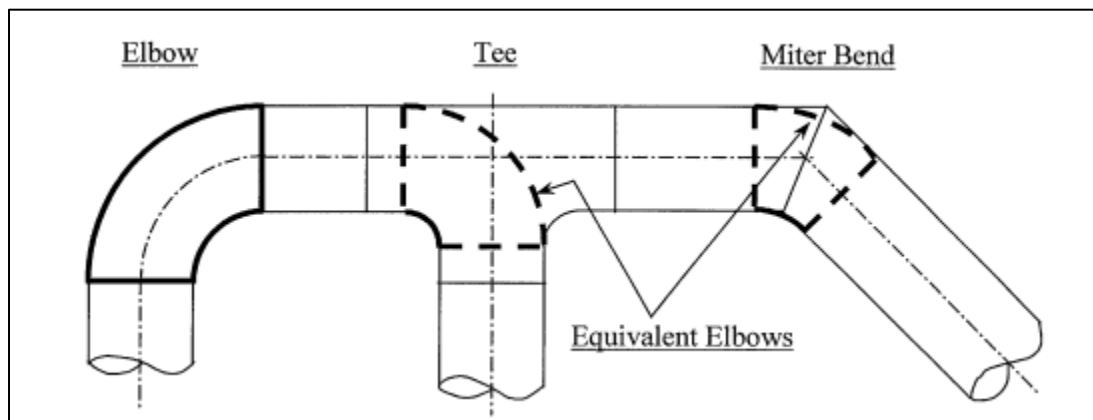


Figura 55: Elementos que utilizan SIF.

8.1.3 Junta de expansión flexible (manguerote)

Esta descripción del producto es en base a lo proporcionado en catálogo, se compone de mezcla en base a caucho reforzado con fibras sintéticas de alta resistencia, está definido por falanges clase 150 por la normativa ASME B16.5.

- Temperatura de operación: -20° a 80°C
- Diámetro: 24"
- Espesor: 36 [mm]
- Presión de trabajo: 80 [Psi]
- Largo: 2 [m]
- Peso: 400 [kg]

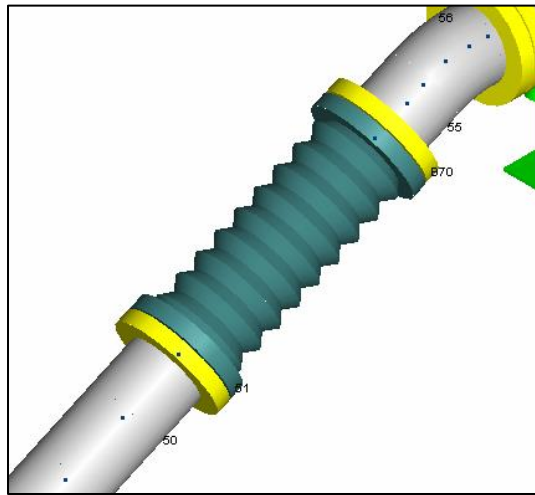


Figura 56: Modelado de junta flexible.

En específico, este tipo de junta requiere un detalle mayor en términos de caracterización. Se realiza una estimación de los parámetros para la junta considerando rigidez axial y lateral. El manual técnico describe juntas de caucho reforzado y establece por cada diámetro nominal, los parámetros mecánicos como elementos de resorte.

La estimación se extrae de la tabla V del manual donde indica los coeficientes de resorte para cada deflexión o movimiento de la junta (Garlock Sealing Technologies, 2023). Cada junta mide 250 [mm] nominales para un diámetro de 24 pulgadas. Para estimar las rigideces se constata una reducción debido al largo de la junta en comparación de los valores nominales, esto reduce significativamente los parámetros de la junta por manual. La reducción se realiza en base a una longitud efectiva, donde, se considera los dos extremos de la junta con la rigidez suficiente para que en la junta tenga un comportamiento de viga empotrada. Este comportamiento hace que la junta se flexione naturalmente en una distancia efectiva en su centro L. Se considera una distancia efectiva de 1000 [mm] por lo que la proporción de los parámetros están en relación de 1:2.

Tabla 44: Rigidez estimada de la junta flexible.

Rigidez de compresión axial	300 [N/mm]
Rigidez de extensión axial	362 [N/mm]
Deflexión lateral	298 [N/mm]
Deflexión angular	371 [Nm/deg]





105

