

no more
66631

T
N492p
2015

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



“Propuesta de Análisis de Flexibilidad y Diseño
Sísmico Para Sistema de Cañerías Apoyadas
Directamente Sobre Terreno”

Por

Christian Andrés Neumann Vera

Trabajo de Título para optar al grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Joaquín Valenzuela Barbosa

Julio, 2015

R. 16898

- Análisis Sísmico
- Análisis de Flexibilidad
- Soporte.

Dedicatoria

En estos momentos me siento aliviado y gratificado por concluir esta etapa importante en mi vida, y es por eso que quiero dedicar esta memoria a mi padre Pablo Neumann Aguilar y a mi madre Angélica Vera Kother, quienes me han apoyado siempre e incondicionalmente, dándome consejos e impulsándome a seguir adelante. A mi hija Rosemary Neumann Robbe, por llegar en un momento oportuno, para que cuando seas capaz de entender mis palabras, te des cuenta lo que significas para mí.

Los quiero demasiado.

Agradecimiento

Agradezco a DIOS por todo lo que me ha entregado en la vida, porque sin él nada tendría sentido. Le agradezco también por la familia a la cual pertenezco, por ser quien me guía en cada paso de mi vida y enseñarme a través de cada problema a ser fuerte. Sin su ayuda nada de lo que he logrado sería posible. Gracias por fortalecer mi espíritu, darme fuerzas en todo momento, especialmente cuando las cosas fueron difíciles. Finalmente le agradezco por permitirme culminar esta etapa importante en mi vida, a pesar de los obstáculos presentados en el camino. Con DIOS todo es posible, porque Él todo lo puede.

Agradezco a toda mi familia, valoro su apoyo a toda prueba, agradezco sus múltiples consejos y admiro su dedicación. Nos hemos acompañado en los momentos difíciles del camino y que grande es la recompensa el día de hoy. Atesoro cada llamada, mensaje, abrazo, beso, juego, comida y conversación compartida. Sepan todos que a pesar de estar tantas veces físicamente lejos de ustedes, en mi mente y corazón los llevaba a todas partes. "Un árbol sin raíces no es nada".

Agradezco a mis amigos, compañeros y conocidos. Especialmente a los que compartí gran parte de mi tiempo en el transcurso de mi carrera, gracias por su amistad y comprensión durante estos años.

Finalmente, quiero agradecer a mi profesor guía, don Joaquín Valenzuela Barbosa, quien no sólo me orientó y aconsejó en todo momento durante el desarrollo de este trabajo de título, sino también fue parte importante en mi maduración como futuro profesional, que sin duda alguna marcará un antes y después. Al profesor Rodrigo Meneses, quien se ofreció gentilmente a apoyarme en el proceso del trabajo de título. En fin, a todos los profesores por haberme enseñado los conocimientos necesarios para amar mi carrera y tomar fuerzas para aprender cada día un poco más.

Índice

Abstract.....	10
Lista de abreviaturas y símbolos.....	11
1 Planteamiento del problema	12
1.1 Objetivos	14
1.2 Alcances	14
1.3 Metodología.....	15
2 Antecedentes	16
2.1 Solicitaciones	16
2.1.1 Presión	16
2.1.2 Temperatura.....	19
2.1.3 Peso propio.....	21
2.1.4 Sismo.....	21
2.2 Introducción al análisis de flexibilidad	24
2.3 Características del ejemplo de aplicación.....	31
2.4 Soportes	34
3 Análisis de flexibilidad	36
3.1 Cálculo de tensiones de trabajo y combinaciones de carga con sus respectivas tensiones admisibles.....	36
3.1.1 Cálculo de tensiones de trabajo.....	36
3.1.2 Combinaciones de carga y tensiones admisibles.....	38
3.2 Cálculo de las solicitaciones.....	41
3.2.1 Elongación unitaria longitudinal asociado a la presión (efecto <i>Bourdon</i>)	41
3.2.2 Elongación unitaria longitudinal asociado a la temperatura	41
3.3 Modelación	42
3.4 Modelo 1 – Cañería libre sin soportes	45
3.5 Modelo 2 – Cañería con guías equidistantes.....	49
3.6 Modelo 3 - Cañería con juntas de expansión	53
4 Análisis Sísmico	59
4.1 Análisis estático	61
4.2 Análisis tiempo historia.....	64
4.2.1 Modelo para condición sin soportes cercanos (modelo de 1GL)	65
4.2.2 Modelo para tramos con soportes equidistantes (modelo de VGL)	79

4.3	Resultados del análisis sísmico para la combinación de carga caso ocasional (OCC) de acuerdo al código ASMEB31.11.....	87
4.3.1	Sistema de cañería con guías equidistantes.....	87
4.3.2	Sistema de cañería con juntas de expansión.....	92
5	Cálculo de soportes.....	94
5.1	Cálculo de guías.....	95
5.1.1	Mecanismos de falla.....	95
5.1.2	Dimensionamiento para la guía más solicitada.....	98
5.2	Cálculo de machón de anclaje.....	102
5.2.1	Estabilidad al deslizamiento en machón de anclaje.....	103
5.2.2	Dimensionamiento y cálculo para el machón más solicitado.....	106
6	Conclusiones.....	110
7	Bibliografía.....	114

Índice de tablas

Tabla 2.1- Parámetros sísmicos para el proyecto en consideración.....	22
Tabla 2.2 - Tabla de resumen de tensiones de trabajo.....	30
Tabla 2.3 - Tabla de resumen de reacciones.....	30
Tabla 2.4 – Propiedades mecánicas de la cañería.....	33
Tabla 2.5 – Parámetros térmicos.....	33
Tabla 3.1 – Parámetros relevantes del suelo.....	43
Tabla 3.2 - Desplazamientos de la cañería libre.....	47
Tabla 3.3 - Reacciones de los anclajes, cañería libre.....	47
Tabla 3.4 - Esfuerzos axiales, cañería libre.....	47
Tabla 3.5 - Esfuerzos de momento, cañería libre.....	47
Tabla 3.6 – Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería libre.....	48
Tabla 3.7 – Desplazamientos máximos para cañería libre.....	48
Tabla 3.8 - Desplazamientos de la cañería con guías equidistantes.....	51
Tabla 3.9 - Reacciones de los anclajes de la cañería con guías equidistantes.....	51
Tabla 3.10 - Esfuerzos axiales de la cañería con guías equidistantes.....	51
Tabla 3.11 - Esfuerzos de momento de la cañería con guías equidistantes.....	51
Tabla 3.12 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con guías equidistantes.....	52
Tabla 3.13 – Desplazamientos máximos para cañería con guías equidistantes.....	52
Tabla 3.14 - Desplazamientos de la cañería con juntas de expansión.....	57
Tabla 3.15 - Reacciones de los anclajes de la cañería con juntas de expansión.....	57
Tabla 3.16 - Esfuerzos axiales de la cañería con juntas de expansión.....	57
Tabla 3.17 - Esfuerzos de momento de la cañería con juntas de expansión.....	57
Tabla 3.18 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con juntas de expansión.....	58
Tabla 3.19 – Desplazamientos máximos para cañería con juntas de expansión.....	58
Tabla 4.1 – Parámetros relevantes del suelo.....	68
Tabla 4.2 – Comparación de desplazamientos.....	78
Tabla 4.3 – Comparación de desplazamientos y deslizamientos.....	78
Tabla 4.4 – Desplazamientos de la cañería con guías equidistantes, caso ocasional (OCC).....	88
Tabla 4.5 – Desplazamientos máximos para cañería con guías equidistantes.....	88
Tabla 4.6 - Esfuerzos de momento de la cañería con guías equidistantes, caso ocasional (OCC).....	89
Tabla 4.7 – Reacciones de guías del sistema con guías equidistantes, caso ocasional (OCC).....	90
Tabla 4.8 – Reacciones de guías del sistema con guías equidistantes.....	90
Tabla 4.9 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con lazos de expansión.....	91
Tabla 4.10 – Desplazamientos de la cañería con lazos de expansión.....	93
Tabla 4.11 – Desplazamientos máximos para cañería con juntas de expansión.....	93
Tabla 4.12 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con lazos de expansión.....	93
Tabla 5.1 – Propiedades del suelo.....	94
Tabla 5.2 - Reacciones de todos los soportes del sistema de cañería con guía equidistantes.....	101
Tabla 5.3 – Presupuesto estimativo para soporte tipo guía.....	101
Tabla 5.4 - Reacciones de todos los machones del sistema de cañería con guías equidistantes.....	109
Tabla 5.5 – Presupuesto estimativo para soporte tipo machón de anclaje.....	109
Tabla 6.1 – Comparación de desplazamientos.....	110
Tabla 6.2 – Comparación de razón de tensiones ($\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{adm}$).....	110
Tabla 6.3 – Comparación de análisis estático con un tiempo historia.....	111

Índice de figuras

Figura 1.1 – a) Cañería enterrada. b) Cañería apoyada directamente sobre terreno.	12
Figura 1.2 – Modelo de análisis utilizando Caesar II.	13
Figura 2.1 – a) Sección transversal de la cañería b) Componente radial de la presión en la pared de la cañería c) Diagrama de cuerpo libre de una sección de la cañería.	17
Figura 2.2 - a) Cañería cerrada con presión. b) DCL del extremo cerrado de la cañería.	17
Figura 2.3 – Tramo de cañería sometida a presión.	18
Figura 2.4 – Tensiones en un elemento.	18
Figura 2.5 – Contracción longitudinal debido a la tensión de arco.	19
Figura 2.6 – Elongación de la cañería producto del cambio de temperatura.	20
Figura 2.7 – Diferencias de temperatura.	20
Figura 2.8 – a) Apoyo lateral de la cañería b) Elevación de la cañería.	21
Figura 2.9 - Espectro de diseño NCh2369 para R=5 y R=1.	23
Figura 2.10 – a) Desplazamiento de la cañería bajo el efecto de la geometría en planta b) Reacciones en la cañería.	24
Figura 2.11 - a) Cañería con sistema de apoyo tipo guía. b) Restricciones y desplazamientos permitidos del apoyo.	25
Figura 2.12 - a) Cañería con restricción longitudinal b) Restricciones y desplazamientos permitidos del apoyo.	25
Figura 2.13 – Tramo de cañería con extremo libre bajo presión y temperatura.	26
Figura 2.14 - Cañería con una fuerza restitutiva R bajo elongación unitaria.	26
Figura 2.15 – Tensiones en un elemento.	27
Figura 2.16 – a) Cañería anclada en sus extremos bajo presión y temperatura. b) Sección transversal de la cañería.	27
Figura 2.17 – Cañería libre bajo presión y temperatura.	28
Figura 2.18 – a) Cañería deformada b) Cañería con fuerza R	29
Figura 2.19 - Cañería con una fuerza restitutiva R bajo elongación unitaria longitudinal total.	29
Figura 2.20 – Tensiones y deformaciones de la.	30
Figura 2.21 – Modelo CAE PIPE.	30
Figura 2.22 – Trazado del acueducto.	31
Figura 2.23 – Vista en planta del tramo analizado ubicado en la cercanía del km.15.	31
Figura 2.24- Gradiente hidráulico y perfil longitudinal aproximado.	32
Figura 2.25 – Simbología de soportes.	34
Figura 2.26 - a) Guía con presencia de holgura considerable b) Restricciones y desplazamientos permitidos de la guía.	34
Figura 2.27 - a) Machón de anclaje, b) Machón de anclaje y guía.	35
Figura 3.1 – Suma de tensiones del momento flector y esfuerzo axial.	37
Figura 3.2 – a) Esfuerzos en la cañería b) Círculo de Mohr c) Criterio de fluencia de Tresca.	37
Figura 3.3 – a) Esfuerzos en la cañería b) Tensión de arco c) Tensiones debido al momento más carga axial.	38
Figura 3.4 – Vista en planta de la cañería deformada.	40
Figura 3.5 – Discretización del modelo del análisis.	42
Figura 3.6 – Sección transversal de un tramo de la cañería.	42
Figura 3.7 – a) Elemento enlace b) Ley del roce c) Ley resorte vertical.	43
Figura 3.8 – Acercamiento zona de quiebre.	43
Figura 3.9 – Desplazamientos [cm] de la cañería libre.	46
Figura 3.10 - Reacciones [tonf] de la cañería libre.	46
Figura 3.11 - Diagrama de fuerza axial [tonf] de la cañería libre.	46
Figura 3.12 - Diagrama de momento [tonf m] de la cañería libre.	46
Figura 3.13 – Ubicación de zonas de esfuerzos y desplazamientos relevantes, cañería libre.	47
Figura 3.14 - Desplazamientos [cm] de la cañería con guías equidistantes.	50
Figura 3.15 - Reacciones [tonf] de la cañería con guías equidistantes.	50

Figura 3.16 - Diagrama de fuerza axial [tonf] de la cañería con guías equidistantes.....	50
Figura 3.17 - Diagrama de momento [tonf m] de la cañería con guías equidistantes.....	50
Figura 3.18 - Ubicación de las zonas de los esfuerzos y desplazamientos relevantes, cañería con guías equidistantes.....	51
Figura 3.19 - Deformada en zona de quiebre.....	53
Figura 3.20 - Simbología a) Lazo de expansión (<i>Loop</i>) b) Junta flexible.....	53
Figura 3.21 - a) Lazo de expansión (<i>Loop</i>) b) Junta flexible.....	54
Figura 3.22 - a) Desplazamiento de cañería libre b) Ubicación de juntas de expansión.....	54
Figura 3.23 - Desplazamientos [cm] de la cañería con juntas de expansión.....	56
Figura 3.24 - Reacciones [tonf] de la cañería con juntas de expansión.....	56
Figura 3.25 - Diagrama de fuerza axial [tonf] de la cañería con juntas de expansión.....	56
Figura 3.26 - Diagrama de momento [tonf m] de la cañería con juntas de expansión.....	56
Figura 3.27 - Ubicación de zonas de esfuerzos relevantes, cañería con juntas de expansión.....	57
Figura 4.1 - Esquemmatización a) Análisis estático b) Análisis tiempo-historia.....	59
Figura 4.2 - a) Ley de la fuerza aplicada versus fuerza de roce b) Ley simplificada.....	60
Figura 4.3 - Viga simplemente apoyada con una carga uniforme q y de largo L	61
Figura 4.4 - a) Diagrama de momento de una viga empotrada b) Deflexión máxima de una viga empotrada.....	61
Figura 4.5 - DCL de un tramo de cañería.....	62
Figura 4.6 - Deflexión máxima y reacciones de la viga empotrada.....	63
Figura 4.7 - Espectros de respuesta de los registros sísmicos y de la NCh2369.....	64
Figura 4.8 - Espectro elástico NCh 2369 y espectro resultante.....	65
Figura 4.9 - Esquemmatización de una longitud unitaria de cañería.....	65
Figura 4.10 - a) Cinemática del modelo b) Diagrama de cuerpo libre.....	66
Figura 4.11 - Movimiento relativo.....	67
Figura 4.12 - a) Gráfico ley del roce b) Esquema de fuerzas.....	67
Figura 4.13 - a) Esquemmatización modelo b) Esquema curva de respuesta de la fuerza de roce.....	68
Figura 4.14 - Función rampa.....	69
Figura 4.15 - a) Registro de aceleraciones horizontales, b) Registro de aceleraciones verticales y c) Desplazamientos en función del tiempo, caso Lolloe.....	71
Figura 4.16 - a) Registro de aceleraciones horizontales, b) Registro de aceleraciones verticales y c) Desplazamientos en función del tiempo, caso Concepción.....	72
Figura 4.17 - a) Registro de aceleraciones horizontales, b) Registro de aceleraciones verticales y c) Desplazamientos en función del tiempo, caso Constitución.....	73
Figura 4.18 - a) Registro de aceleraciones horizontales, b) Registro de aceleraciones verticales y c) Desplazamientos en función del tiempo, caso Angol.....	74
Figura 4.19 - Curvas de respuesta caso Lolloe, Concepción, Constitución y Angol.....	76
Figura 4.20 - Curvas de respuesta, caso Constitución.....	77
Figura 4.21 - Curvas de respuestas sólo registro horizontal, caso Constitución.....	77
Figura 4.22 - a) Cañería con guías equidistantes b) Deformada del tramo segmentado de la cañería.....	79
Figura 4.23 - Esquemmatización del modelo de varios grados de libertad.....	80
Figura 4.24 - Resumen de los desplazamientos en función del largo de la cañería.....	81
Figura 4.25 - Resumen de la reacción de la guía en función del largo de la cañería.....	82
Figura 4.26 - Vista en planta del primer modo de vibrar para un largo de cañería igual a 100 [m].	83
Figura 4.27 - Vista en planta del segundo modo de vibrar para un largo de cañería igual a 100 [m].	83
Figura 4.28 - Deformación instantánea de la cañería para un largo entre guías igual a 250 [m].	84
Figura 4.29 - Comparación de períodos de los espectro de respuesta con los largo de la cañería.....	85
Figura 4.30 - Diagrama de momento para largo de cañería igual a 250 [m].	86
Figura 4.31 - Ubicación de las zonas de los esfuerzos y desplazamientos relevantes, cañería con guías equidistantes.....	87
Figura 4.32 - Ubicación de las zonas de desplazamientos relevantes para la cañería con juntas de expansión.....	92

Figura 5.1 - a) Vista lateral de la guía b) DCL sentido transversal de la guía.....	95
Figura 5.2 – DCL fuerzas horizontales.....	96
Figura 5.3 – DCL fuerzas verticales.....	96
Figura 5.4 – Diagrama cuerpo libre sentido transversal.....	97
Figura 5.5 – Dimensionamiento a) Vista lateral de la guía b) Vista frontal del soporte tipo guía.....	98
Figura 5.6 – Ubicación de todos los soportes para la configuración de guías equidistantes.....	100
Figura 5.7 – Mecánica del machón de anclaje.....	102
Figura 5.8 – Cuña pasiva y activa del suelo en el machón de anclaje.....	102
Figura 5.9 – a) DCL del <i>flange</i> de anclaje tipo " <i>slip-on</i> " b) <i>flange</i> de anclaje tipo " <i>slip-on</i> ".....	103
Figura 5.10 – a) Presiones del suelo b) DCL en el machón de anclaje.....	103
Figura 5.11 – Características geométricas entre el bloque y el suelo.....	104
Figura 5.12 – Esquematización de empujes en el elemento.....	104
Figura 5.13 – Esquema soporte tipo machón de anclaje.....	106
Figura 5.14 – DCL en el machón de anclaje.....	108
Figura 6.1 – Esquematización de desplazamiento y deslizamiento a) caso Constitución b) Caso Concepción.....	112

Abstract

En Chile la gran minería ha llevado a grandes consumos de agua. Este recurso es muy escaso en la principal zona donde se desarrolla, el norte de Chile, por este motivo se han empezado a realizar proyectos de grandes acueductos mineros para utilizar agua de mar sin desalinizar para los procesos metalúrgicos. En estos sistemas los caudales pueden ser del orden de 1500 [lts] con tramos cuyas presiones pueden superar los 1000 [mca].

Se analiza un tramo de cañería apoyada directamente sobre terreno la cual resulta en un menor costo y rapidez de montaje en comparación de una cañería bajo terreno. Sin embargo, aumenta la incertidumbre del comportamiento mecánico que tendrá la cañería ahora que no se encuentra confinada por el suelo junto a su comportamiento frente a sismos de gran magnitud.

Este trabajo muestra una metodología y una modelación simple para abordar el problema del análisis de flexibilidad de una cañería sobre terreno, el cual consiste en la posibilidad de separar el problema sísmico del análisis de flexibilidad de la cañería. Lo anterior, considerando que el material de la cañería trabaja en el rango elástico.

Al momento de analizar la cañería sobre terreno, es necesario visualizar las restricciones entregadas por el código y la norma sísmica. Dependiendo de cómo se aborde el problema, puede ser necesario la utilización de anclajes y guías, los cuales pueden llegar a traducirse en grandes cantidades de hormigón a lo largo del trayecto y mayores espesores de las paredes de la cañería debido a los esfuerzos que inducen las restricciones al movimiento. Lo que finalmente tiende a subir los costos y en alguna medida a ir restando beneficios que tendría esta nueva estrategia en acueductos mineros dispuestos sobre terreno respecto de un proyecto con cañería enterrada.

Se presentan también soluciones alternativas orientadas a cambiar los anclajes y las guías por dispositivos flexibles estratégicamente ubicados con el fin de concentrar la deformación en esos puntos, lo que eventualmente puede disminuir los costos por concepto de la implementación de soportes.

Lista de abreviaturas y símbolos

A_g	Área bruta de la sección
A_0	Aceleración efectiva máxima del suelo
$C_{m\acute{a}x}$	Coefficiente sísmico máximo
$C_{m\acute{i}n}$	Coefficiente sísmico mínimo
C_v	Coefficiente sísmico vertical
E	Módulo de elasticidad
F_y	Tensión de fluencia
GN	Guía número n
I	Factor de importancia, uso y riesgo de falla de la cañería
k	Rigidez
MN	Machón de anclaje número n
PGA	Peak de aceleración de suelo
PSa	Pseudo-aceleración
Q	Primer momento de área parcial
R	Factor de modificación de respuesta
w	Módulo resistente
V	Esfuerzo de corte
α	Coefficiente térmico de dilatación lineal
$\delta_{m\acute{a}x}$	Deformación máxima
ϵ	Deformación unitaria
σ	Tensión
σ_h	Tensión de arco (<i>hoop stress</i>)
τ	Tensión de corte
μ_e	Coefficiente de roce estático
μ_d	Coefficiente de roce dinámico
ν	Módulo de Poisson

1 Planteamiento del problema

La demanda de agua por parte de la industria minera ha crecido considerablemente, requiriendo mayores volúmenes para sus procesos tales como los de flotación e hidrometalurgia. El primer proceso utiliza grandes cantidades de agua en las plantas concentradoras de sulfuro, mientras que el segundo utiliza el agua a lo largo de sus tres etapas: lixiviación, extracción por solventes y electro obtención. Además, si se considera el explosivo aumento en la producción de minerales, ya sea en faenas nuevas como en antiguas, se observa que la demanda del recurso hídrico ha crecido de manera exponencial [31].

Chile cuenta con el 28% de las reservas de cobre en el mundo [36] y presenta un proceso productivo del 33% a nivel mundial [36]. Las principales operaciones mineras en Chile se desarrollan en la zona desértica al norte del país, donde el recurso hídrico es escaso, provocando la necesidad de entregar una solución frente a la problemática. De este modo surge como propuesta llevar agua de mar a la mina (planta), siendo necesario proyectar un sistema de línea de cañería (*pipeline*) para el transporte desde la costa hasta el lugar de las faenas mineras (plantas), que generalmente se encuentran a elevada altura sobre el nivel del mar (cordillera o precordillera) [28].

Los sistemas de línea de cañería generalmente se proyectan bajo terreno, donde los costos son altos debido a los movimientos de tierra asociados a la instalación de cañerías que conforman la conducción. En algunos casos se requiere la utilización de explosivos para la instalación debido al tipo de terreno, en ocasiones caliche; el cual consiste en una capa dura, rica en carbonato de calcio, que se forma en los suelos de las regiones áridas.

Para minimizar costos y tiempo de montaje, en los últimos años en el norte del país se han realizado proyectos de sistema de línea de cañería apoyados directamente sobre el terreno. En este caso no es necesario el movimiento de tierra, sin embargo al no encontrarse confinada la cañería por el suelo como se muestra en la figura 1.1 (a), se tiene la incertidumbre respecto de su comportamiento mecánico. Dado que la cañería se encuentra libre de desplazarse lateralmente frente a las solicitaciones como la presión del fluido, las variaciones de temperaturas propias del desierto y el sismo, como se muestra en la figura 1.1 (b). La única fuerza que se opone al movimiento para zonas alejadas a los soportes es el roce con el suelo. Cabe mencionar que la presión genera un alargamiento conocido como efecto *Bourdon* generando una flexión lateral de la cañería para acomodar la elongación longitudinal, además el sismo también puede generar desplazamientos laterales de la cañería.

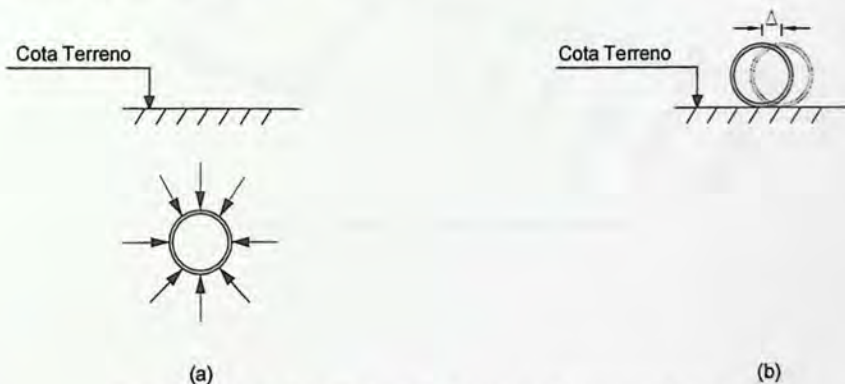


Figura 1.1 – a) Cañería enterrada. b) Cañería apoyada directamente sobre terreno.

Para controlar el desplazamiento se debe realizar un análisis de flexibilidad de la cañería el cual garantice que el sistema cumpla con los criterios de desplazamiento adoptados y las tensiones estipuladas en el código ASME.B31.11-2002, "Slurry Transportation Piping Systems". Se pueden implementar soportes como guías y machones de anclaje para controlar los desplazamientos, producto de la presión y el sismo. La cañería se puede asimilar desde el punto de vista mecánico-estructural a una barra sometida a esfuerzos axiales, flexión biaxial, corte y torsión.

Actualmente, los costos en este método constructivo se dan principalmente en la construcción de grandes soportes de hormigón armado tales como guías y machones de anclaje a lo largo de la línea de cañería que pueden alcanzar los 64 m^3 . Con las dificultades de logística que tiene realizar estas faenas constructivas en medio del desierto.

El problema de cómo predecir el comportamiento de la cañería, se encuentra en el límite entre las competencias de un ingeniero civil y un ingeniero mecánico. Esto queda claro en el comentario C.11.5.1 de la NCh2369, donde indica que la disposición de apoyos y juntas se deben realizar en conjunto por los especialistas en cañería y profesionales con especialización reconocida en estructuras y diseño sismorresistente. En consecuencia, no se ha conseguido implementar totalmente una metodología que aborde el problema de manera sistemática. Esto se evidencia al observar la gran diferencia de criterios que se han adoptado en proyectos mineros ubicados en el norte del país. Existe información de sólo dos proyectos que cuentan con un sistema de cañería apoyado directamente sobre terreno actualmente en Chile (año 2013).

Finalmente, desde el punto de vista de la modelación, la naturaleza no lineal del problema hace que los resultados puedan tener gran variabilidad respecto a pequeños cambios en las condiciones del tipo de apoyo, temperatura, presión y geometría del trazado. En general, los programas especializados para el análisis de flexibilidad de cañerías consideran diversos efectos tales como: holguras en las restricciones de apoyos (*gaps*), fricción entre la cañería y el apoyo, asentamientos relativos entre los soportes, efectos de estados bidimensionales de tensión, entre otros. También se pueden incluir las válvulas y la presión directamente en el modelo, como se puede apreciar en la figura 1.2.

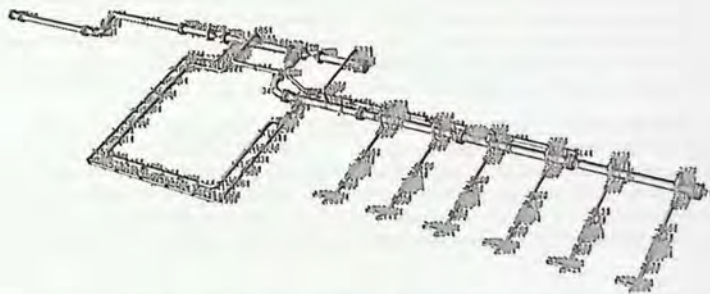


Figura 1.2 – Modelo de análisis utilizando Caesar II.

1.1 Objetivos

El objetivo central de este trabajo de título es abordar el problema de un sistema de línea de cañería apoyada directamente sobre el terreno sometida a altas presiones, cambios de temperatura y sismo. Proponiendo una metodología y modelos más simples que los usados actualmente, pero que rescaten los parámetros físicos relevantes para el diseño. Para ésto se considera:

- Proponer un análisis de flexibilidad simplificado, que considere las características fundamentales para una cañería apoyada directamente sobre terreno.
- Proponer una metodología para abordar la acción sísmica sobre el sistema, considerándola como desplazamientos y no como fuerzas externas.
- Con los modelos anteriores buscar una estrategia que pueda hacer de este método constructivo ser aún más competitivo respecto de un proyecto con cañería enterrada.

1.2 Alcances

En este trabajo se considera un proyecto minero ubicado en la región de Antofagasta, donde el sistema de línea de cañería va desde la costa hasta la mina, a una altura de 2300 [m.s.n.m], con un trayecto aproximado de 140 [km]. La mayor parte de la línea de cañería se encuentra apoyada directamente sobre terreno y está compuesta principalmente por acero al carbono, con un diámetro de 36", transportando un caudal de 1500 [lts/s] de agua salada.

Para el análisis se considera el tramo más desfavorable del proyecto, con presiones de 1300 [mca] y de mayor complejidad geométrica. La longitud de este tramo es igual a 2,5 [km], el cual se encuentra apoyado directamente sobre el suelo sin que exista ningún agente externo entre las características del terreno y la cañería. Cabe señalar que al inicio y final del tramo la cañería se encuentra anclada con machones, permitiendo realizar el análisis del tramo de forma independiente. Para efectos de cálculo se desprecia el desnivel en planta dado que la diferencia de altura es mucho menor que la longitud total del tramo considerado y por lo tanto se desprecia el efecto de torsión. El análisis de flexibilidad se realiza conforme a lo establecido en el código ASME.B31.11-2002, "*Slurry Transportation Piping Systems*". Donde el término "*slurry*" se refiere a un fluido acuoso no inflamable.

El tramo considerado queda emplazado en la zona sísmica 3 y sobre un suelo tipo II, de acuerdo a la Norma NCh 2369.Of2003 "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales". Se realiza un análisis dinámico tiempo historia con la finalidad de obtener los desplazamientos de la cañería según lo indicado en la sección 5.8.2 de dicha norma. Se consideran los siguientes registros de aceleraciones correspondientes al terremoto del Maule ocurrido el 27 de Febrero de 2010 en Chile: Angol, Constitución y Lolleo, ya que estos presentan las mayores aceleraciones verticales y horizontales.

Para la modelación sísmica, se considera la interacción suelo-estructura con resortes no lineales de corte para representar el roce. No se considera el efecto de rodadura de la cañería.

Para el análisis de flexibilidad de la cañería sobre terreno, se desarrollan modelos realizando una simulación computacional con el programa de cálculo estructural SAP2000. No obstante, se utilizan programas especializados de análisis de cañerías, tales como CAE PIPE o CAESAR II con el objetivo de verificar algunos resultados.

1.3 Metodología

- a) Recopilar información del proyecto que se toma como ejemplo para la aplicación de los objetivos de este trabajo de título, tales como el trazado en planta, caudales, presión de diseño, temperatura, entre otros.
- b) Recopilar información bibliográfica del comportamiento mecánico de cañerías sometidas a alta presión.
- c) Proponer un modelo de análisis de flexibilidad simplificado y acotado a las características propias de este problema.
- d) Diseñar la ubicación y la cantidad de los soportes para el control de los desplazamientos, manteniendo las tensiones de la cañería a niveles admisibles.
- e) Proponer un modelo para evaluar los desplazamientos sísmicos de la cañería.
- f) Buscar una solución al problema minimizando la cantidad de soportes, disminuyendo los esfuerzos en la cañería y controlando los desplazamientos a los límites adoptados.

2 Antecedentes

Para el análisis del sistema de línea de cañería que se realiza en este trabajo de título, se muestran las bases de cálculo que sustentan el comportamiento mecánico estructural. El objetivo central de este capítulo es mostrar los conceptos necesarios para la modelación que se realiza en los siguientes capítulos.

Los cálculos y las leyes que se enuncian para los modelos se encuentran basadas en los estudios, normativas y teorías de los libros de: *Mechanics of Materials* - R.C Hibbeler, *Design of Piping Systems* - MW Kellogg Company, *Piping Handbook* - Mohindar L.Nayyar, Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos - ASME B31.11-2002, Norma Chilena NCh 2369.Of2003, entre otros.

2.1 Solicitaciones

Al encontrarse la cañería apoyada directamente sobre terreno, posee libertad de desplazamiento. Por lo tanto, las cargas más relevantes consideradas para este caso, de acuerdo al código ASME B31.11 [2], a las que se encuentra sometido el sistema son:

- Presión (p)
- Temperatura (ΔT)
- Peso propio
- Sismo

2.1.1 Presión

Cuando la pared del recipiente es delgada, es decir la relación entre el radio (r) y el espesor de la tubería (t) es superior a 10 ($r/t \geq 10$) como se muestra en la figura 2.1 (a), la distribución de la tensión a través del espesor t de la cañería no varían de manera significativa y por lo tanto se supone uniforme o constante [3]. La presión dentro de la cañería corresponde a la presión manométrica p del fluido que contiene. Esta es la presión por encima de la presión atmosférica, la cual se supone existe tanto en el interior como al exterior de la pared de la cañería. Debido a la presión se dan dos tipos de tensiones en la pared de la cañería, denominadas tensión longitudinal y tensión circunferencial o de arco.

Tensión de arco

Conocida normalmente como "hoop stress" σ_R , que traducido al español significa tensión de arco. Se produce por la componente radial de la presión como se muestra en figura 2.1 (b).

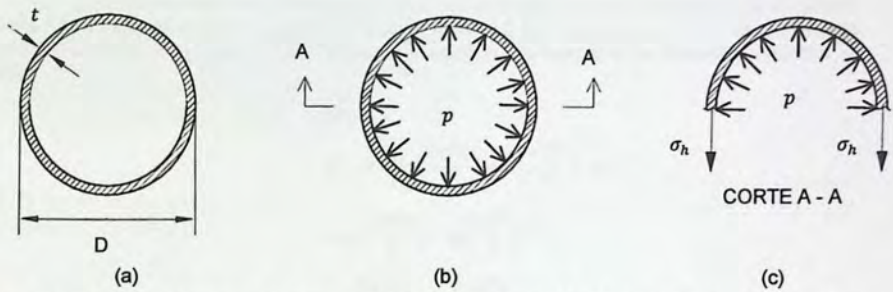


Figura 2.1 – a) Sección transversal de la cañería b) Componente radial de la presión en la pared de la cañería c) Diagrama de cuerpo libre de una sección de la cañería.

Para determinar la tensión de arco se puede realizar un corte en la mitad de la cañería y haciendo el diagrama de cuerpo libre (DCL) de la mitad de ella como se muestra en la figura 2.1(c), se realiza el equilibrio de fuerzas en la dirección transversal:

$$\begin{aligned} \Sigma F_t &= 0 \\ \Sigma F_t &= 2(\sigma_h(tdx)) - p(Ddx) = 0 \\ 2(\sigma_h(tdx)) - p(Ddx) &= 0 \\ \sigma_h &= \frac{pD}{2t} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Tensión longitudinal

Las tensiones longitudinales σ_L , ocurren producto de la componente longitudinal de la presión p cuando la cañería se encuentra cerrada, como se muestra en la figura 2.2 (b) [3]. Este efecto puede darse cuando se cierra una válvula, se encuentra una bomba detenida, en una cañería con curva discreta o en un cambio de dirección de la cañería, cerrando un extremo de la cañería deliberadamente para realizar una prueba hidráulica, etc.

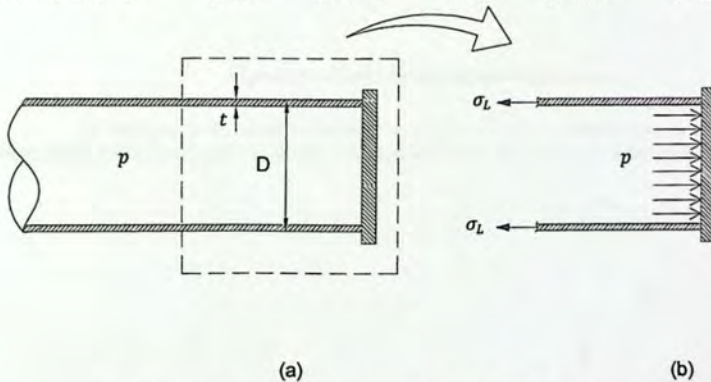


Figura 2.2 - a) Cañería cerrada con presión. b) DCL del extremo cerrado de la cañería.

Para determinar la tensión longitudinal se puede realizar un corte del extremo de la cañería, como se muestra en el cuadro segmentado en la figura 2.2 (a) y se realiza un DCL de este tramo, como se muestra en la figura 2.2 (b). Haciendo el equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal, se tiene:

$$\begin{aligned} \Sigma F_L &= 0 \\ \Sigma F_L &= -\sigma_L \left(\frac{2\pi D t}{2} \right) + p \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = 0 \\ -\sigma_L \left(\frac{2\pi D t}{2} \right) + p \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) &= 0 \\ \sigma_L \left(\frac{2\pi D t}{2} \right) &= p \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \\ \sigma_L &= \frac{p D}{4 t} = \frac{1}{2} \sigma_h \end{aligned} \quad (2.2)$$

Esto indica que la tensión longitudinal corresponde a la mitad de la tensión de arco.

Elongación unitaria de la cañería debido a la presión (efecto Bourdon)

Cuando la cañería se encuentra cerrada y libre de estirarse, se produce una elongación debido a la componente longitudinal de la presión como se muestra esquemáticamente en la figura 2.3, esto se conoce como el efecto de *Bourdon*.

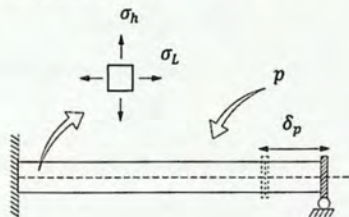


Figura 2.3 – Tramo de cañería sometida a presión.

La elongación en sentido longitudinal según la *Ley de Hooke* para el caso bidimensional viene dada por la ecuación 2.3, donde los parámetros se muestran en la figura 2.4:

$$\epsilon_L = \frac{\sigma_L}{E} - \nu \frac{\sigma_h}{E} \quad (2.3)$$

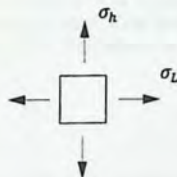


Figura 2.4 – Tensiones en un elemento

Dónde:

- E : Módulo de elasticidad del acero [kgf/cm^2].
- ν : Razón de *Poisson* ($\nu = 0,3$ para el caso del acero).
- σ_L : Tensión longitudinal [kgf/cm^2].
- σ_h : Tensión de arco [kgf/cm^2].

La tensión de arco a través de la razón de *Poisson* produce un acortamiento longitudinal de la cañería como se muestra en la figura 2.5, que se suma al efecto de elongación debido a la tensión longitudinal.

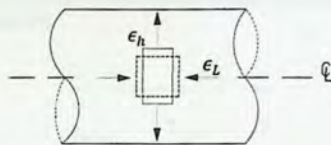


Figura 2.5 – Contracción longitudinal debido a la tensión de arco.

De la ecuación 2.3, la elongación unitaria de la cañería debido a la presión en el sentido longitudinal ϵ_p está dada por:

$$\epsilon_p = \frac{pD}{4tE} - \nu \frac{pD}{2tE}$$

Considerando que σ_h , la tensión de arco es igual a:

$$\sigma_h = \frac{pD}{2t}$$

Es posible escribir ϵ_p en términos de σ_h de la siguiente forma:

$$\epsilon_p = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_h}{2} - \nu \sigma_h \right) \quad (2.4)$$

2.1.2 Temperatura

Elongación debido a la temperatura

Debido a la diferencia de temperatura entre la colocación y la operación del sistema de línea de cañería, se producen dilataciones y contracciones térmicas. Este fenómeno produce una elongación unitaria en la cañería de acuerdo a la ecuación 2.5 y este efecto se muestra en la figura 2.6.

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T \quad (2.5)$$

Dónde:

- α : Coeficiente de dilatación lineal [$^{\circ}C^{-1}$] ($\alpha = 1,17 \cdot 10^{-5}$ para el caso del acero)
- ΔT : Variación de temperatura [$^{\circ}C$].
- ϵ_T : Elongación unitaria de la cañería por diferencia de temperatura en el sentido longitudinal.

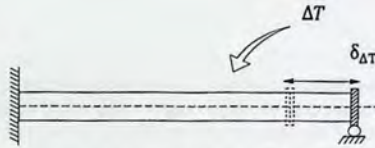


Figura 2.6 – Elongación de la cañería producto del cambio de temperatura.

Por otro lado, la diferencia de temperatura entre la colocación de la cañería y el medio ambiente provocan una diferencia de temperatura ΔT_1 y ΔT_2 como se muestra esquemáticamente en la figura 2.7. En consecuencia existen variaciones de tensiones, donde la diferencia de las tensiones corresponde al rango de tensiones.

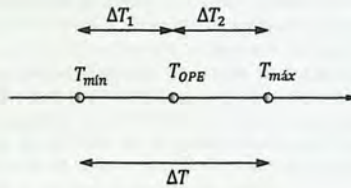


Figura 2.7 – Diferencias de temperatura.

Cabe indicar, que por criterio conservador se considera un ΔT igual al rango de temperatura correspondiente a la diferencia entre la máxima con la mínima. Dado que el sistema de cañerías que se utiliza como ejemplo de aplicación para este trabajo de título se encuentra ubicado en el interior de la región de Antofagasta, las diferencias térmicas son aproximadamente 21°C . Estos datos de variación térmica se pueden obtener de diversos sitios, tales como la Dirección Meteorológica de Chile. Entre la mañana y en la tarde para sectores alejados de la costa ésta diferencia puede ser aún mayor.

El caso más desfavorable en éste análisis es cuando el ΔT es positivo, ya que se produce una elongación longitudinal de la cañería como se muestra esquemáticamente en la figura 2.6. La cual se suma a la elongación longitudinal por presión, generando mayores esfuerzos, reacciones y desplazamientos en la cañería.

Considerando que la cañería tiene que estar en el rango lineal elástico, ambos fenómenos pueden superponerse. Es posible escribir una expresión que agrupe las elongaciones unitarias longitudinales producto de la presión y de la temperatura obteniendo una elongación unitaria total. Sumando las ecuaciones (2.4) y (2.5) se tiene:

$$\begin{aligned} \epsilon_{total} &= \epsilon_p + \epsilon_T \\ \epsilon_{total} &= \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_h}{2} - \sigma_h \nu \right) + \alpha \Delta T \quad (2.6) \end{aligned}$$

Cuando la cañería se encuentra restringida por soportes, roce del suelo, esta elongación puede generar esfuerzos y deformaciones importantes en la cañería, además de grandes reacciones en los soportes.

2.1.3 Peso propio

Para el peso del sistema de la línea de cañería, se considera el caso más desfavorable, el cual corresponde a cuando la cañería se encuentra en funcionamiento. En consecuencia, el peso total del elemento incluye el peso de la cañería más el peso del fluido, es decir, carga muerta más carga viva. Debido a que la cañería se encuentra apoyada directamente sobre el suelo, las cargas gravitacionales de peso propio no provocan esfuerzos en ella, pero si afecta para el caso sísmico, debido a las fuerzas inerciales.

2.1.4 Sismo

Para la sollicitación sísmica se utiliza la Norma Chilena NCh 2369.Of2003 "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales". Esta norma indica en su sección 11.5.2, que es necesario considerar la acción sísmica en cañerías cuando su diámetro es superior o igual a 200 [mm]. En su sección 11.5.1, indica que se deben disponer de juntas de expansión y apoyos que aseguren la estabilidad sísmica y permitan simultáneamente las deformaciones térmicas. En la figura 2.8, se muestra el ejemplo de varios apoyos que permiten las dilataciones longitudinales (guías), junto a un sólo elemento que restringe la cañería en la dirección longitudinal (machón). Esta figura está contenida en los comentarios de la norma, donde también se muestran los coeficientes sísmicos para el cálculo del sistema de cañería si el análisis es estático.

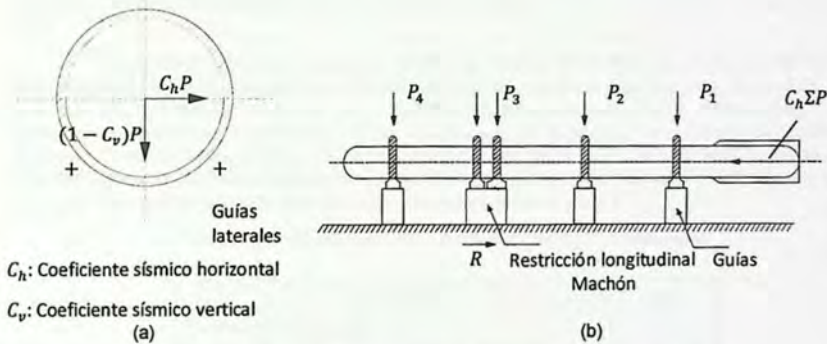


Figura 2.8 – a) Apoyo lateral de la cañería b) Elevación de la cañería.
Adaptado de la norma NCh2369 Of 2003.

Para el análisis sísmico la norma permite dos métodos de análisis: Métodos lineales y Métodos no lineales.

Métodos lineales

Se pueden usar los siguientes procedimientos

- Análisis estático o de fuerzas equivalentes.
- Análisis modal espectral

Métodos no lineales

Corresponden a uno de los métodos de análisis especiales indicados en la sección 5.8 de la NCh2369, que compete al análisis tiempo-historia, donde se debe incorporar la incursión no lineal de los elementos. Los espectros escalados de los registros que se utilicen en el análisis tiempo-historia se deben comparar con el espectro elástico definido por la norma. El espectro resultante de combinar los espectros de cada registro mediante la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores individuales no debe quedar por debajo del espectro de diseño en ningún punto del rango de frecuencias de interés.

Para calcular el espectro de diseño que define la acción sísmica de un determinado lugar es necesario identificar una serie de características, tales como: el tipo de suelo y la zona sísmica.

Para los efectos de la aplicación de la norma, las estructuras y equipos se clasifican en categorías según su importancia. Para este caso, corresponde a la categoría C1 ya que es una obra crítica dado que la falla en la cañería puede causar detenciones prolongadas y pérdidas serias de producción como se indica en la sección 4.3.1 de dicha norma. Por esta razón se le asigna un coeficiente de importancia igual a 1,2. El proyecto en consideración se ubica en la zona costera del norte del país correspondiente a la zona sísmica 3, según la figura 5.1 (a) de la norma NCh2369, lo cual indica un valor de la aceleración efectiva máxima de $0,4g$. El suelo típico del sector donde se ubica el proyecto corresponde a arenas densas lo que corresponde a un tipo de suelo II de acuerdo a la tabla 5.3 de la NCh2369.

Para obtener el espectro de diseño (reducido), la razón de amortiguamiento ξ y el factor de modificación de la respuesta R se obtiene de las tablas 5.5 y 5.6 indicadas en la NCh2369 para sistemas de cañerías, correspondiente a 0,02 y 5 respectivamente. Utilizando estos datos y de acuerdo a la tabla 5.7 de dicha norma resulta en un valor máximo del coeficiente sísmico igual a 0,26.

Un punto importante a destacar es que la Norma NCh2369 indica que el efecto de las aceleraciones sísmicas verticales se debe considerar en cualquier elemento donde la variación de la acción sísmica vertical afecte en forma significativa su dimensionamiento y estabilidad. En este caso, ésta condición debe aplicarse ya que el roce que es la fuerza que se opone al movimiento, depende de la reacción vertical. En la sección 5.5.1 (b) de la NCh2369, se indica que la acción sísmica vertical puede considerarse en forma estática, con un valor del coeficiente sísmico igual a $2/3A_o/g$. Los valores previamente descritos se resumen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1- Parámetros sísmicos para el proyecto en consideración.

Descripción	Valor
Coficiente de importancia (I)	1,2
Zona sísmica	3
Definición tipo de suelo	II
Razón de amortiguamiento (ξ)	0,02
Valor máx. factor de modificación de la respuesta (R)	5
Valor máx. del coef. sísmico ($C_{máx}$)	0,26
Coficiente de diseño ($C_{máx} I$)	0,31
Cof. sísmico para la acción sísmica vertical (C_v)	0,27

El espectro de diseño se calcula con la ecuación 2.8:

$$S_a = \frac{2.75 A_0 I}{R} \left(\frac{T}{T_c}\right)^n \left(\frac{0.05}{\xi}\right)^{0.4} \quad (2.8)$$

En la figura 2.9 se muestran el espectro de diseño y el espectro elástico, que definen la acción sísmica para las condiciones descritas anteriormente.

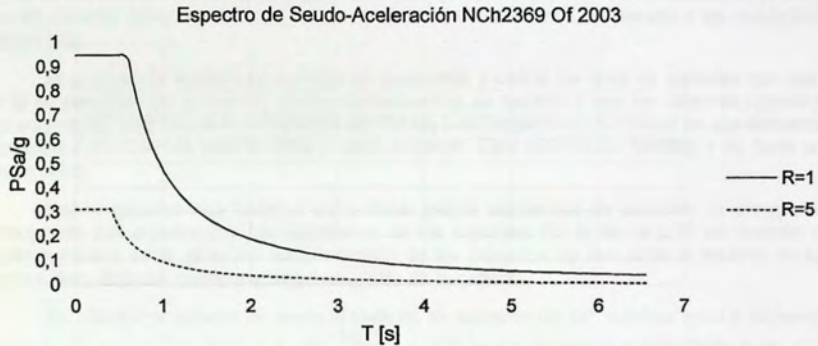


Figura 2.9 - Espectro de diseño NCh2369 para R=5 y R=1

Cabe destacar, que si bien en este problema no existe el concepto de período, ya que no tiene una fuerza restauradora. Este espectro elástico se usa para verificar las exigencias a los registros que se utilizan en el capítulo de análisis sísmico.

2.2 Introducción al análisis de flexibilidad

La flexibilidad es la capacidad que tiene el sistema de cañería para acomodar las deformaciones por causa de efectos térmicos, de presión o ambos. Si un sistema de cañería tiene una flexibilidad adecuada, permite absorber las deformaciones sin generar grandes esfuerzos ni reacciones, pudiendo volver a su posición inicial después de varias repeticiones o ciclos, sin ver alterada su estructura ni sus propiedades mecánicas. En este caso, el grado de flexibilidad lo otorga el tipo de material del cual está fabricada la cañería, la forma de ésta, su trazado y las condiciones de apoyo [12].

El análisis de flexibilidad consiste en posicionar y definir los tipos de soportes que van a guiar la deformación de la cañería. Como consecuencia, se garantiza que los sistemas operen de forma segura, sin sobrepasar las tensiones admisibles o deformaciones excesivas en sus elementos de acuerdo a los criterios establecidos a cada proyecto. Este análisis es iterativo y no tiene una solución única.

Por lo general una cañería curva tiene mayor capacidad de absorber la elongación, disminuyendo sus esfuerzos y las reacciones en los soportes. En la figura 2.10 se muestra un ejemplo numérico de la variación en la reacción de los extremos de una cañería anclada en sus extremos, bajo distintas configuraciones en planta de la cañería.

Se utiliza una cañería de acero al carbono de diámetro de 36", espesor igual a 20 [mm] y un módulo de elasticidad igual a $2 \cdot 10^6 \frac{kgf}{cm^2}$. La sollicitación asignada corresponde a un $\Delta T = 30 [^{\circ}C]$, esto implica una elongación unitaria $\epsilon = 3,6 \cdot 10^{-4}$ para los tres casos. Se puede observar que para el caso 1 la reacción R_1 es mayor que las demás ya que ésta geometría no tiene flexibilidad. Para el caso 2, la cañería presenta una curva suave entregándole flexibilidad y como consecuencia disminuye el valor de la reacción R_2 , pero la cañería se desplaza en dirección de la curva. Por último en el caso 3, la cañería se le deja con una forma rectangular deliberadamente, conocida comúnmente como lazo de expansión o "loop" para dar flexibilidad al sistema y de esta manera disminuir los esfuerzos en la cañería.

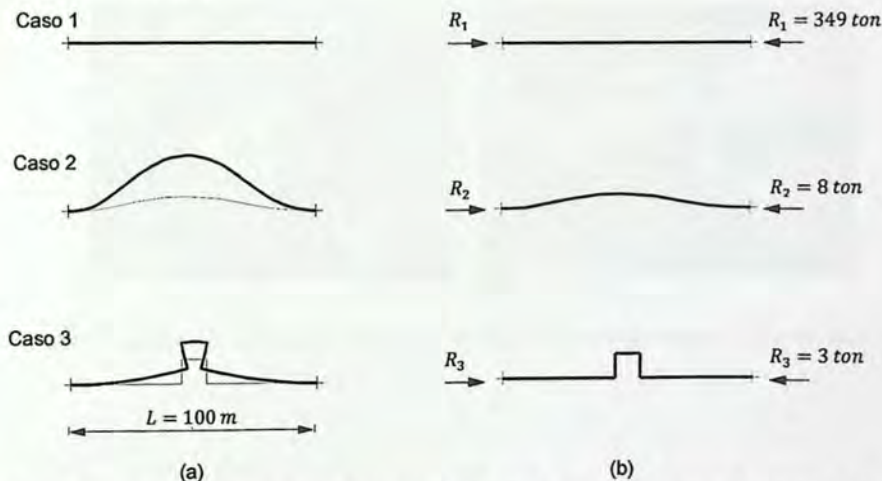


Figura 2.10 – a) Desplazamiento de la cañería bajo el efecto de la geometría en planta b) Reacciones en la cañería.

Tipos de Soportes

Los soportes básicamente se dividen en dos grupos: el primero en anclajes que restringen cualquier desplazamiento o giro. El segundo tipo son las guías, estos elementos restringen el movimiento de la cañería dejando uno o más grados de libertad para su desplazamiento. Estas restricciones idealizadas en un modelo, se fabrican tratando de representar lo mejor posible la condición utilizada en el análisis. Para este tipo de apoyos se les entrega deliberadamente una holgura. Este espacio permite que desplace la cañería en el sentido transversal que por lo general son unos cuantos milímetros. Como ejemplo, se muestran algunos tipos de apoyos para un sistema de bombeo existente. En la figura 2.11 se muestra un apoyo vertical con restricción de levantarse y sólo tiene libertad de desplazarse en el sentido longitudinal de la cañería.

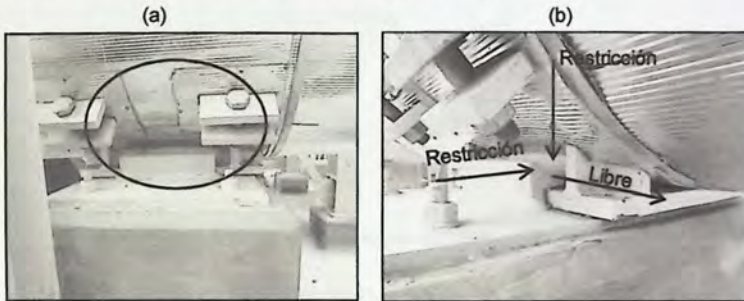


Figura 2.11 - a) Cañería con sistema de apoyo tipo guía. b) Restricciones y desplazamientos permitidos del apoyo.

En la figura 2.12 se muestra un apoyo, llamado comúnmente "stop line" que restringe el movimiento longitudinal en un punto de la cañería. Este apoyo deja libre movimiento transversal y vertical de la cañería.



Figura 2.12 - a) Cañería con restricción longitudinal b) Restricciones y desplazamientos permitidos del apoyo

Metodología de análisis

Las tensiones y deformaciones producto de las solicitaciones de presión y temperatura que se producen en un sistema de cañerías con geometría compleja con diversos tipos de soportes, se puede realizar por medio de la siguiente metodología:

- 1) Se calcula la elongación unitaria por efecto de la presión y de la temperatura para una cañería con un extremo libre y las tensiones asociadas a estos efectos que ya han sido determinado anteriormente. Esto se muestra esquemáticamente en la figura 2.13.

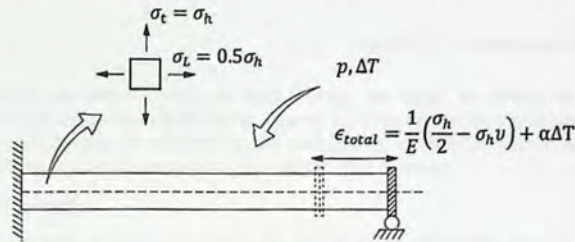


Figura 2.13 – Tramo de cañería con extremo libre bajo presión y temperatura.

- 2) La deformación por unidad de longitud ϵ_{total} es incorporada como solicitación en un modelo de análisis estructural del tipo "lumped plasticity models". De éste análisis se obtienen las deformaciones, reacciones y esfuerzos como se muestra esquemáticamente en la figura 2.14. El resorte que se muestra en ésta figura representa las fuerzas que se oponen al desplazamiento de la cañería. Esta fuerza R no sólo depende del tipo de apoyo y de las propiedades elásticas de la cañería, sino que también de la flexibilidad de la cañería debido a su geometría en planta.

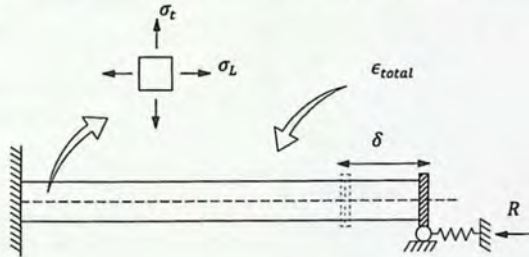


Figura 2.14 - Cañería con una fuerza restitutiva R bajo elongación unitaria.

- 3) Finalmente las tensiones en las paredes de la cañería obtenidas del análisis, se suman con las obtenidas inicialmente en el paso n°1. De este modo se puede calcular la tensión equivalente de Von Mises y asegurar un margen ante la fluencia del acero. La tensión equivalente de Von Mises viene dada por la ecuación 2.7 para el caso bidimensional y representa la condición de fluencia del acero. Los parámetros se muestran en la figura 2.15.

$$f_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq f_y \quad (2.7)$$

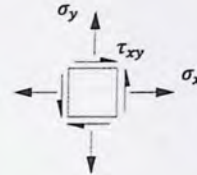


Figura 2.15 – Tensiones en un elemento

Esta metodología se debe a que en éste trabajo de título se utiliza un programa computacional de uso común en análisis estructural, que no tiene la opción de incorporar de forma explícita el efecto de la presión que se produce en las paredes de la cañería cuando se realiza el análisis. Como lo hacen los programas especializados de cañería o "piping".

Verificación de la metodología

Los resultados obtenidos con la metodología propuesta se comparan con los resultados entregados por un programa especializado de sistemas de cañerías llamado *CAE PIPE*. Se utiliza como ejemplo una cañería recta anclada en sus extremos como se muestra esquemáticamente en la figura 2.16 (a). La cañería es de acero al carbono, con diámetro de 36", espesor de 20 [mm]. Las solicitaciones corresponden a una presión de 1000 [m.c.a] y una variación de temperatura de 20 [°C].

Primero se realizan los cálculos utilizando la metodología antes mencionada y después se compara con los resultados que entrega el programa especializado.

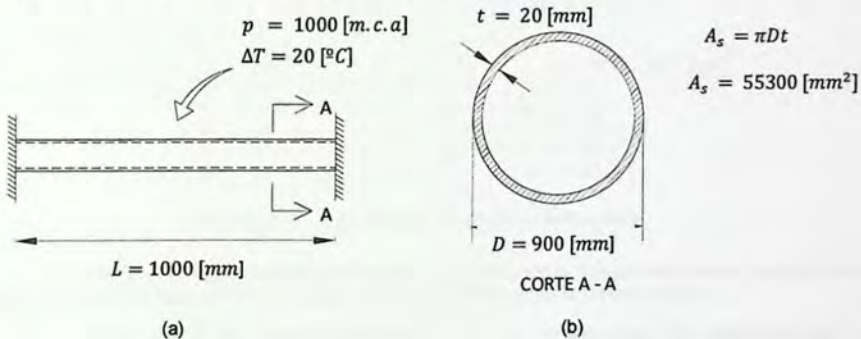


Figura 2.16 – a) Cañería anclada en sus extremos bajo presión y temperatura. b) Sección transversal de la cañería.

Para calcular las tensiones y deformaciones producto de las solicitaciones de presión y temperatura que se producen en la cañería primero se calcula la elongación unitaria total para la cañería libre, de acuerdo a la ecuación 2.6:

$$\epsilon_{total} = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_h}{2} - \sigma_h \nu \right) + \alpha \Delta T$$

Donde σ_h viene dado por:

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t}$$

$$\sigma_h = \frac{100 \cdot 90}{2 \cdot 2}$$

$$\sigma_h = 2250 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$$

Reemplazando

$$\epsilon_{total} = \frac{1}{2,1 \cdot 10^6} \left(\frac{2250}{2} - 2250 \cdot 0,3 \right) + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 20$$

$$\epsilon_{total} = 4,54 \cdot 10^{-4}$$

La deformación se calcula como:

$$\delta = \epsilon_{total} L = 4,54 \cdot 10^{-4} \cdot L$$

Pero L es igual a 100 [cm], por lo tanto se tiene:

$$\delta = \epsilon_{total} = 4,54 \cdot 10^{-2} [cm]$$

En la figura 2.17 se resumen los resultados.

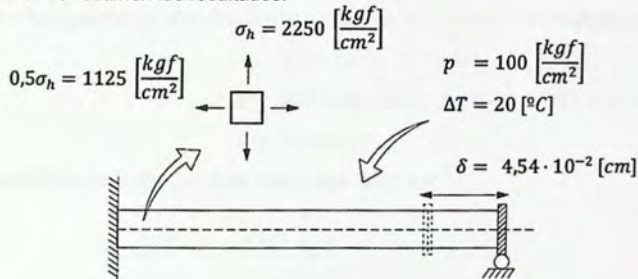


Figura 2.17 – Cañería libre bajo presión y temperatura.

La deformación por unidad de longitud es incorporada al modelo de análisis, pero en este caso, se puede calcular de forma manual ya que la cañería sólo es un tramo recto.

La reacción R se puede calcular utilizando la compatibilidad de deformaciones y superposición. Una cañería con un extremo libre con una deformación δ sumada a una cañería con un extremo libre con una fuerza en el extremo tal que pueda contrarrestar esa deformación δ . Esto se muestra esquemáticamente en la figura 2.18.

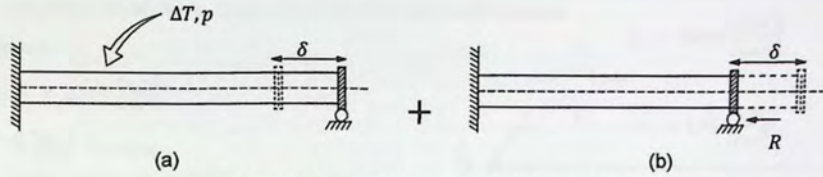


Figura 2.18 – a) Cañería deformada b) Cañería con fuerza R .

La deformación δ de la figura 2.18 (a), viene dado por:

$$\delta = \epsilon_{total} L = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_h}{2} - \sigma_h \nu \right) L + \alpha \Delta T L$$

Para el caso de la deformación de la figura 2.18 (b), se tiene:

$$\delta = \epsilon_{total} L = \frac{R}{AE} L$$

Igualando las deformaciones, se tiene:

$$\frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_h}{2} - \sigma_h \nu \right) L + \alpha \Delta T L = \frac{R}{AE} L$$

Resolviendo esta igualdad de deformaciones, se tiene que la fuerza R viene dada por:

$$R = A_s [(0,5 - \nu) \sigma_h + E \alpha \Delta T] \quad (2.6)$$

$$R = 553 \cdot ((0,5 - 0,3) \cdot 2250 + 2,1 \cdot 10^6 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 20)$$

$$R = 528 \text{ [tonf]}$$

Donde la tensión longitudinal σ_L en este caso viene dado por:

$$\sigma_L = \frac{R}{A_s}$$

$$\sigma_L = 934 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right]$$

En la figura 2.19 se resumen los resultados.

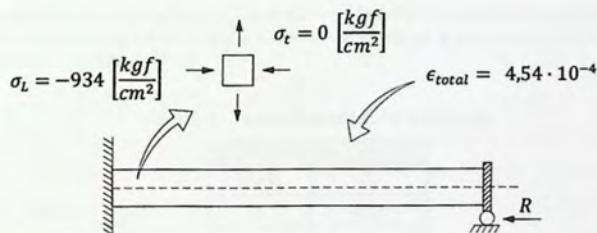


Figura 2.19 - Cañería con una fuerza restitutiva R bajo elongación unitaria longitudinal total.

Finalmente las tensiones en las paredes de la cañería obtenidas del análisis se suman con las adquiridas inicialmente. Como resultado final las tensiones son:

Cálculos:

$$\sigma_t = \sigma_h = 2250 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_L = 0,5\sigma_h + \sigma_{L_{análisis}}$$

$$\sigma_L = 1125 - 934 = 190 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$$

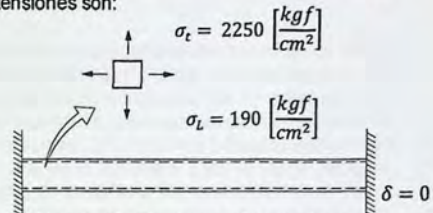


Figura 2.20 – Tensiones y deformaciones de la cañería bajo presión y temperatura.

Se verifica la metodología propuesta comparando las reacciones, tensiones de la cañería empotrada, bajo presión y temperatura con los valores obtenidos del análisis por medio del programa especializado.

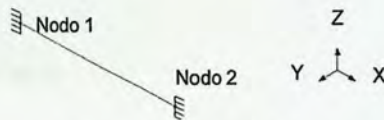


Figura 2.21 – Modelo CAE PIPE.

Las tensiones resultantes se muestran en la tabla 2.2. La tensión transversal corresponde a $2250 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$ y la tensión longitudinal es igual a $181 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$ similar a los $190 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right]$ que se obtiene con la metodología propuesta. Cabe destacar que la cañería queda traccionada por el efecto de acortamiento debido a la tensión transversal σ_h .

Tabla 2.2 - Tabla de resumen de tensiones de trabajo.

Tensiones $[kgf/cm^2]$		
Nodo	Tensión transversal σ_t	Tensión longitudinal σ_L
1	2250	181
2	2250	181

Las reacciones en la cañería se muestran en la tabla 2.3, se puede que observar la reacción es en el sentido longitudinal de la cañería y con un valor igual a $522 [tonf]$ similar a los $528 [tonf]$ que se obtiene en el cálculo anterior.

Tabla 2.3 - Tabla de resumen de reacciones.

Reacciones $[tonf]$	
Nodo	F_x
1	522
2	-522

Con respecto a la metodología adoptada, se puede decir que es consistente con los análisis típicos realizados por los ingenieros mecánicos a través de los programas especializados de cañería.

2.3 Características del ejemplo de aplicación

Para este trabajo se considera un proyecto minero en funcionamiento con el fin de utilizar parámetros que se ajusten a la realidad, sin ser necesariamente las medidas exactas del proyecto. Este proyecto se ubica en la región de Antofagasta emplazado en la zona sísmica 3 y sobre un suelo tipo II. El sistema de cañerías va desde la costa hasta la planta de procesos ubicada en la Mina, en una longitud aproximada de 140 [km] alcanzando una altura de 2300 [m.s.n.m.]. Para el análisis que se realiza en este trabajo de título, se considera sólo una parte del tramo. Este se ubica cerca del km.15, como se muestra en la figura 2.22. El diámetro de la cañería del acueducto es de 36" y transporta un caudal de 1500 [lts/s] de agua de mar. La diferencia de temperatura considerada es igual a 21 [°C], como se menciona en la sección 2.1.2 del presente trabajo de título.

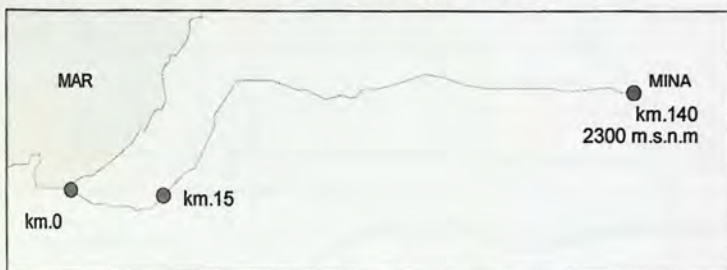


Figura 2.22 – Trazado del acueducto.

El tramo considerado en este trabajo de título, corresponde al más desfavorable del proyecto. Esto quiere decir con mayor presión y complejidad geométrica. Este tramo posee una longitud igual a 2,5 kilómetros y con machones de anclajes en ambos extremos. En la figura 2.23 se muestra un acercamiento del tramo considerado respecto del trazado de la figura 2.22.

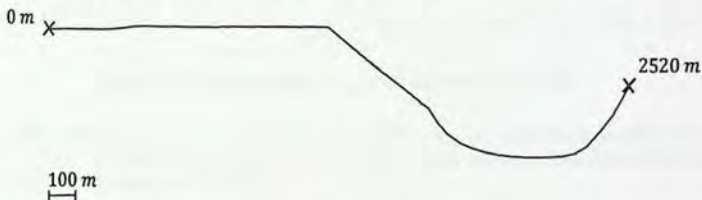


Figura 2.23 – Vista en planta del tramo analizado ubicado en la cercanía del km.15.

El gradiente hidráulico se puede observar en la figura 2.24, donde se muestra la cota de terreno y la altura de presión. No se muestra la altura de velocidad $\frac{v^2}{2g}$ ya que su valor es despreciable con respecto a la altura de presión $\frac{p}{\gamma}$ y la altura geométrica z . Por lo que para efectos de este análisis en particular se desprecia, porque no es relevante como se muestra en el siguiente cálculo:

$$\frac{v^2}{2g} = \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \cdot \frac{1}{2g} \quad (2.8)$$

$$\frac{v^2}{2g} = \left(\frac{1,5}{0,5}\right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot 9,8}$$

$$\frac{v^2}{2g} \approx 0,6 [m]$$

Como el tramo a analizar de este proyecto se encuentra al comienzo, la presión de diseño es del orden de 1300 [mca]. El término Est. 1 y Est. 2 significan estación de bombeo 1 y 2, respectivamente.

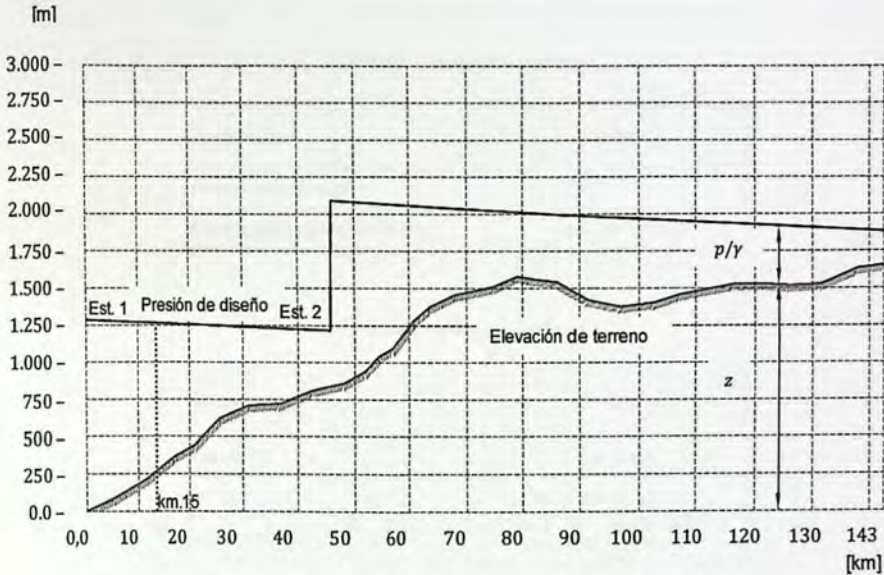


Figura 2.24- Gradiente hidráulico y perfil longitudinal aproximado.

Este gradiente se puede construir con la información de la potencia instalada en cada estación de bombeo y para la cota de terreno se puede utilizar un programa de posicionamiento global ubicando en el mapa dicho trazado.

La mayor parte del sistema de línea de cañería es de acero al carbono estándar API 5L y de grado X65 (API 5L X 65). Las propiedades geométricas de la cañería apoyada directamente sobre terreno podrán verse modificadas de acuerdo al espesor que se requiera para cumplir con las tensiones admisibles y desplazamientos, ya que es un proceso iterativo. Se muestran algunos parámetros y propiedades de la cañería en las siguientes tablas:

Tabla 2.4 – Propiedades mecánicas de la cañería.

Propiedades	Valor
Tensión de Fluencia (F_y)	4570 $\left[\frac{kgf}{cm^2}\right]$
Módulo de Elasticidad (E)	$2 \cdot 10^6$ $\left[\frac{kgf}{cm^2}\right]$
Razón de Poisson (ν)	0,30

Tabla 2.5 – Parámetros térmicos.

Propiedades	Valor
Diferencial térmico (ΔT)	21 $[^{\circ}C]$
Coefficiente dilatación térmica (α)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ $[^{\circ}C^{-1}]$

Tabla 2.6 – Parámetros del fluido.

Propiedades	Valor
Caudal (Q)	1500 $[ts/s]$
Presión (p)	1300 $[mca]$
Densidad agua de mar (ρ)	1,03 $\left[\frac{tonf}{m^3}\right]$

2.4 Soportes

El tipo utilizado depende del criterio adoptado o la necesidad del mandante para el control de desplazamiento. En un sistema de cañería sobre terreno, se pueden distinguir básicamente los siguientes tipos de apoyos:

- Guías.
- Machón de anclaje.

La simbología de los soportes en este trabajo de título, vienen dado por:

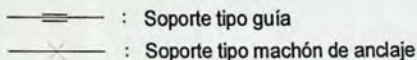


Figura 2.25 – Simbología de soportes

Guías:

Corresponden a un apoyo para restringir el desplazamiento lateral de un punto de la cañería, las cuales presentan una holgura transversal ("gaps") permitiendo el movimiento en dirección longitudinal de la cañería, como se muestra en la figura 2.26. Esta holgura por lo general es pequeña, pero en definitiva depende del criterio del diseñador.

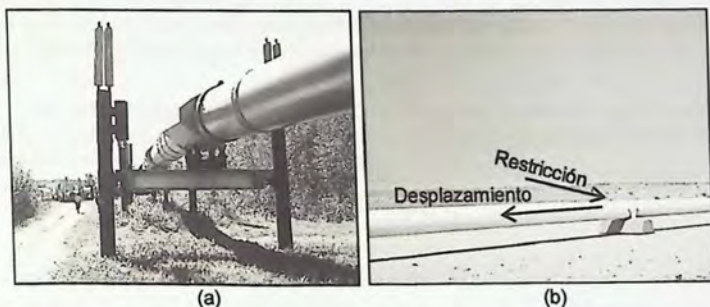
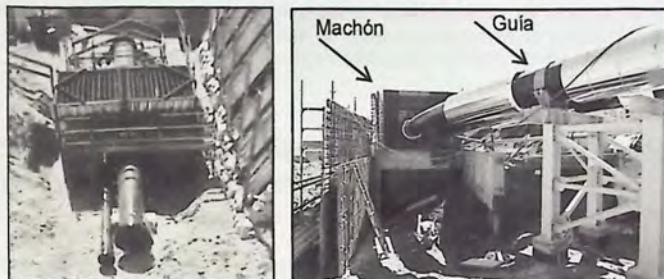


Figura 2.26 - a) Guía con presencia de holgura considerable b) Restricciones y desplazamientos permitidos de la guía.

Machón de Anclaje:

Es un apoyo que restringe todos los grados de libertad, es decir, no permite desplazamiento o giro en ningún sentido. Un ejemplo de este sistema de apoyo se muestra en la figura 2.27 (a).



(a)

(b)

Figura 2.27 - a) Machón de anclaje, b) Machón de anclaje y guía

En este trabajo de título sólo se emplean soportes del tipo guía y machón de anclaje. Para el caso de las guías se pretende que sean prefabricadas y transportadas por medio de un camión. De acuerdo a lo que se indica en la normativa de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile [6], el límite de sobrepeso para un tipo de eje y rodado cuádruple tiene un valor de 52 [tonf], por ende la carga lateral máxima sobre la guía debido a la cañería debe ser aproximadamente menor o igual a 30 [tonf] utilizando un factor de seguridad al deslizamiento igual a 1,2.

Cabe señalar que las reacciones en los machones son en sentido x y en el caso de los soportes tipo guías las reacciones son en sentido y , es decir, sentido longitudinal y transversal de la cañería respectivamente.

3 Análisis de flexibilidad

Para garantizar que la cañería sobre terreno opere de manera segura, sin sobrepasar las tensiones admisibles y deformaciones excesivas en sus elementos de acuerdo a los criterios adoptados, se realiza un análisis de flexibilidad de acuerdo a las bases de cálculo mostradas en la sección 2.2 y bajo las especificaciones del código ASME.B31.11-2002, "Slurry Transportation Piping Systems".

3.1 Cálculo de tensiones de trabajo y combinaciones de carga con sus respectivas tensiones admisibles

3.1.1 Cálculo de tensiones de trabajo

Las tensiones en la cañería varían de acuerdo al tramo que es considerado, una alternativa para calcular las tensiones principales, es utilizar el círculo de Mohr. Este corresponde a una representación gráfica de los estados tensionales que se encuentran sometidos los materiales. El eje de las abscisas entrega los valores de tensión normal y el eje de las ordenadas muestra las tensiones de corte. Esto, con la finalidad de encontrar la combinación de los esfuerzos que presentan las mayores tensiones para ser comparadas con las tensiones admisibles indicadas por el código ASME B31.11. Para obtener las tensiones de trabajo, se necesitan los valores de σ_L , σ_t , τ , tal como se muestra en la figura 3.2 (a).

σ_L : Valor de la tensión normal. Considera la tensión longitudinal producto de la componente longitudinal de la presión más la tensión del análisis debido a la elongación unitaria por efecto de la presión y/o temperatura.

$$\sigma_L = \frac{\sigma_h}{2} + \sigma_{L_{análisis}}$$

σ_t : Valor de la tensión normal. Considera la tensión de arco o circunferencial σ_h

$$\sigma_t = \sigma_h$$

τ : Valor de tensión de corte. Considera el esfuerzo de corte del análisis debido a la elongación unitaria por efecto de la presión y/o temperatura.

$$\tau = \frac{Q \cdot V}{I \cdot t}$$

Dónde:

- Q : Primer momento de área parcial [cm^3]
- V : Esfuerzo de corte [$\frac{kgf}{cm^2}$]
- I : Inercia [cm^4]
- t : Espesor [cm]

Para este caso no se considera el aporte de la tensión de corte, ya que sus valores afectan por debajo del 5 [%] a las tensiones principales. Además, sus valores máximos de esfuerzo ocurren donde los esfuerzos de momento son mínimos siendo esta última la predominante.

Las tensiones del análisis, se consiguen mediante los esfuerzos obtenidos de los diagramas de fuerza axial y momento. Se tiene un momento M, fuerza axial P, módulo de resistencia

o módulo elástico W y área bruta A_g . Por lo tanto, el cociente entre M y W más el cociente entre P con A_g , entregan el valor de la tensión del análisis σ_L (análisis) del tramo considerado.

$$\sigma_{L_{análisis}} = \left(\frac{P}{A_g} + \frac{M}{W} \right)$$

Se debe considerar el lado de la cañería cuyas tensiones de flexión se suman a las de esfuerzo axial, ya que en el otro lado de la cañería se restan como se puede apreciar en la figura 3.1.

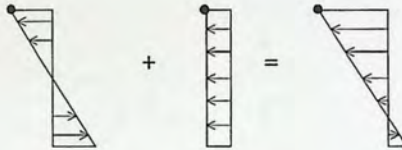


Figura 3.1 – Suma de tensiones del momento flector y esfuerzo axial.

El sistema de coordenadas L , t y R corresponde a los ejes longitudinales, tangenciales y radiales de la cañería, donde estas últimas son ortogonales (transversales) al eje longitudinal, el cual se utiliza en el análisis de flexibilidad. Mientras que para el análisis sísmico (capítulo 4), se recurre al eje de coordenadas comúnmente utilizado x , y y z . Lo anterior, se esquematiza en la figura 3.2 (a).

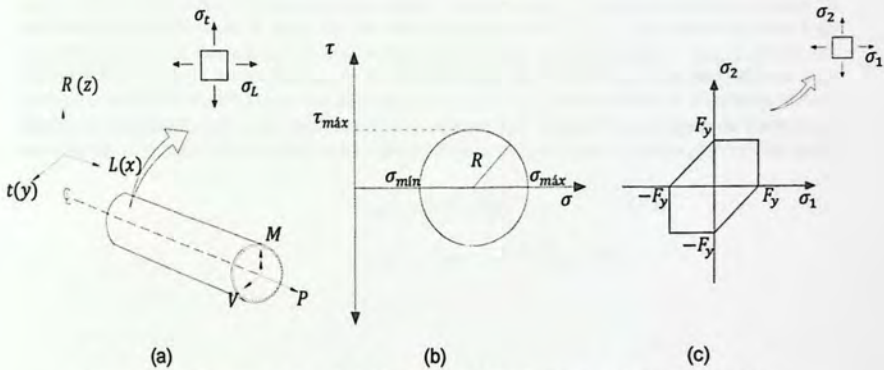


Figura 3.2 – a) Esfuerzos en la cañería b) Círculo de Mohr c) Criterio de fluencia de Tresca.

La discontinuidad visual de los diagramas de momentos es producto de los cambios de orientación de las barras discretizadas. Se busca la mayor tensión de corte, esto ocurre cuando las tensiones de los ejes ortogonales son opuestas ya que se suman las tensiones de corte, como se muestra en la figura 3.3.

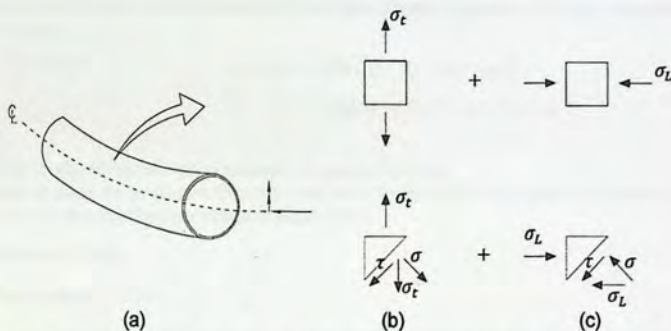


Figura 3.3 – a) Esfuerzos en la cañería b) Tensión de arco c) Tensiones debido al momento más carga axial.

3.1.2 Combinaciones de carga y tensiones admisibles

Del código ASME B31.11-2002, párrafo 1102.3 se desprende que para cualquier combinación de carga se debe considerar el estado bidimensional de tensiones, con un margen de seguridad ante la diferencia de tensiones normales igual a un 90% de F_y . Con esta condición y de acuerdo al criterio de fluencia de Tresca, se busca la tensión de corte máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) donde sus valores deben ser menores o iguales a la tensión de corte admisible (τ_{adm}) correspondiente a un 50% de la tensión de fluencia que para este caso es un $0,90 \cdot F_y$, ver ecuación 3.1. El criterio de Von Mises es más preciso, pero el código ASME se encuentra bajo el criterio de la teoría de Tresca que corresponde a un criterio más conservador. Luego, dado que F_y es igual a 4.570 kgf/cm^2 , se tiene:

$$|\tau_{m\acute{a}x}| \leq 0,90 \cdot \left(\frac{F_y}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$|\tau_{m\acute{a}x}| < \tau_{adm} = 2057 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

1. Caso Sostenido (SUS):

- Presión
- Peso propio

Como se trata de una cañería nueva de especificaciones conocidas, las tensiones admisibles corresponden a las indicadas en el párrafo 1102.3.1 (a), la cual expone que los valores a utilizarse para los cálculos de diseño en la cañería bajo presión (párrafo 1104.1.2), se calculen de la siguiente manera:

$$\sigma_t < S = 0,80 \cdot E \cdot F_y \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

$$\sigma_t < S = 3656 \quad [\text{kgf/cm}^2], \text{ con } E = 1,0$$

Dónde:

0,80 : Factor de diseño basado en el espesor de pared nominal.

E : Factor de unión de soldadora (párrafo 1102.4.3 y tabla 1102.4.3), donde para este caso se utiliza una unión de soldadura por resistencia eléctrica.

2. Caso Térmico (EXP):

- Temperatura

Para este caso, las tensiones admisibles corresponden a lo que se establece en el párrafo 1119.6.4 (c). Al no considerar el efecto de la presión, la tensión se ve afectada sólo por la expansión o contracción térmica, donde el rango de tensión longitudinal $\Delta\sigma_L$ corresponde a la diferencia entre el valor máximo con el mínimo, cuyo valor debe estar dentro del rango indicado en el código, con la finalidad de evitar la falla por fatiga.

$$\Delta\sigma_L < S_A = 0,72 \cdot F_y \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

$$\Delta\sigma_L < S_A = 3290 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

3. Caso Operacional (OPE):

- Presión
- Peso propio
- Temperatura

El párrafo 1102.3.2 (d) señala que los valores de caso operacional producto de la suma de las tensiones debido a la presión, peso y otras cargas externas sostenidas. No podrán exceder el 75 [%] de la tensión admisible S_A , vale decir:

$$\sigma_L < 0,75 \cdot S_A \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

$$\sigma_L < 2468 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

4. Caso Ocasional (OCC):

- Presión
- Peso propio
- Sismo

Las tensiones admisibles para este caso se establecen en el párrafo 1102.3.3, donde la suma de las tensiones longitudinales debido a la presión, peso y las producidas por cargas ocasionales como las de viento o sismo, no podrán exceder el 88 [%] de la tensión de fluencia F_y , vale decir:

$$\sigma_L < 0,88 \cdot F_y \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

$$\sigma_L < 4022 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

En este trabajo de título, se analiza de forma separada el análisis sísmico debido a la forma en que se propone abordar el análisis de flexibilidad. En consecuencia, las reacciones, desplazamientos y esfuerzos de las solicitaciones obtenidas del análisis sísmico se suman a los resultados del análisis de flexibilidad para el caso sostenido (SUS). Los resultados combinados corresponden al caso ocasional (OCC) y se muestran en el capítulo 4.

5. Caso Prueba Hidráulica (HYD):

- Presión de prueba hidráulica
- Peso propio

La prueba hidráulica de acuerdo a lo indicado en el párrafo 1137.4, se realiza para evaluar la integridad estructural y hermeticidad de un sistema de cañerías, donde se aumentan las presiones de diseño en un 10% por un tiempo no menor de 4 horas y se observa su comportamiento.

$$\begin{aligned}\sigma_t &< 0,90 \cdot F_y \quad [kgf/cm^2] \\ \sigma_t &< 4113 \quad [kgf/cm^2]\end{aligned}$$

Criterio para deformaciones máximas

Para el caso de las deformaciones máximas, se hace referencia a lo dispuesto en la norma NCh 2369.0/2003 en su Anexo C, sección 6.3, indicando que se deben limitar las deformaciones sísmicas horizontales en construcciones industriales, siempre y cuando estas puedan generar daños en los elementos unidos a la estructura, como cañerías o ductos. Si bien en este caso la cañería se encuentra en el desierto, se sitúa cercano a una ruta de tránsito vehicular. En consecuencia, se restringe la deformación de la cañería adoptando un criterio normalmente usado en este tipo de proyecto, donde el máximo desplazamiento no sea mayor a la mitad del diámetro de la cañería, como se muestra en la figura 3.4.

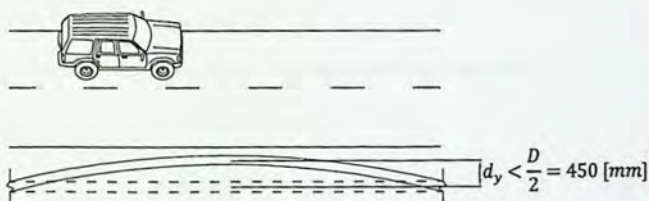


Figura 3.4 – Vista en planta de la cañería deformada.

3.2 Cálculo de las solicitaciones

La solicitación que se muestra en la figura 2.14, sección 2.2 proviene del cálculo de la elongación unitaria longitudinal por efecto de la presión y/o temperatura, lo que dependerá de la combinación de carga a considerar. Este valor se incorpora en el modelo de análisis como la solicitación.

3.2.1 Elongación unitaria longitudinal asociado a la presión (efecto Bourdon)

Para obtener la deformación unitaria debido a la presión, se utiliza la ecuación 2.4 con una presión de diseño aproximada a 1300 [mca], valor que se obtiene de la figura 2.24. Por otra parte, se debe obtener la deformación unitaria aportada para el caso de prueba hidráulica (HYD), la cual consiste en mayorar un 10 % la presión interna del fluido como se indica en la sección 1137.4.1 del código ASME B31.11. Se propone un espesor de 24 [mm] y la expresión para esta deformación viene dada por:

$$\epsilon_p = \frac{1}{E} \cdot \left(\frac{\sigma_h}{2} - \nu \sigma_h \right)$$

$$\epsilon_p = \frac{P \cdot D}{4t \cdot E} \cdot (1 - 2\nu)$$

Elongación unitaria longitudinal debido a la presión de diseño (casos SUS, OPE y OCC):

$$\epsilon_p = \frac{1300 \cdot 0,914}{4 \cdot 0,024 \cdot 2 \cdot 10^7} \cdot (1 - 2 \cdot 0,3)$$

$$\epsilon_p = 2,39 \cdot 10^{-4}$$

Elongación unitaria longitudinal debido a la presión de prueba hidráulica (caso HYD):

$$\epsilon_p = \frac{1430 \cdot 0,914}{4 \cdot 0,024 \cdot 2 \cdot 10^7} \cdot (1 - 2 \cdot 0,3)$$

$$\epsilon_p = 2,63 \cdot 10^{-4}$$

3.2.2 Elongación unitaria longitudinal asociado a la temperatura

Para obtener la deformación unitaria aportada por la temperatura se utiliza la ecuación 2.5, ubicada en la subsección 2.1.2 del presente trabajo de título, la cual viene dada por:

$$\epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T$$

Elongación unitaria longitudinal debido a la temperatura (casos EXP y OPE):

$$\epsilon_T = 1,17 \cdot 10^{-5} \cdot 21$$

$$\epsilon_T = 2,46 \cdot 10^{-4}$$

Se puede observar que para este caso, la deformación unitaria debido a la temperatura ϵ_T ($2,46 \cdot 10^{-4}$) es muy similar a la generada por la presión ϵ_p ($2,39 \cdot 10^{-4}$), por lo que se puede indicar

que los efectos provocados por la dilatación térmica de la cañería son tan importantes como los generados por la presión del fluido.

3.3 Modelación

La modelación del análisis de flexibilidad se realiza en base al eje longitudinal de la cañería mediante una discretización de barras rectas unidas por nodos, esto se conoce como un modelo del tipo "lumped plasticity models". El programa resuelve las ecuaciones de equilibrio en los nodos de manera iterativa hasta obtener la deformada que compatibiliza la convergencia de las leyes constitutivas de los resortes, las barras y efectos de segundo orden, esto se conoce como un análisis estático no lineal. Para este caso, se desprecia el desnivel en planta donde sólo se consideran los grados de libertad del plano horizontal, dado que la diferencia de altura es mucho menor que la longitud total del tramo y por lo tanto se anula el efecto de torsión.

Debido a las dimensiones de la cañería y tras realizar varias pruebas de sensibilidad en los resultados de análisis, se define la discretización del trazado a 10 metros mostrando una deformada suavizada en el trazado. Para disminuir el tiempo de análisis de la simulación computacional, se ingresa la información correspondiente al peso por metro lineal de cañería en cada nodo de forma discreta, como se muestra en la figura 3.5.

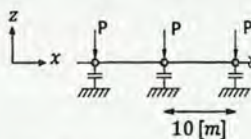


Figura 3.5 – Discretización del modelo del análisis.

El peso correspondiente por metro lineal de cañería considera el peso propio del elemento más el peso del fluido obteniéndose un total de 1,1 [tonf/m], se muestra el cálculo en la figura 3.6.

Cálculo del peso:

$$\begin{aligned}
 \text{Peso}_{\text{fluido}} &= \gamma \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}^3} \right] \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 [\text{m}^2] \\
 \text{Peso}_{\text{fluido}} &= 1,03 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}^3} \right] \cdot \pi \cdot (0,43)^2 [\text{m}^2] \\
 \text{Peso}_{\text{fluido}} &= 0,6 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}} \right]
 \end{aligned}$$

$d = D - 2 \cdot t$

$$\begin{aligned}
 \text{Peso}_{\text{acero}} &= \gamma \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}^3} \right] \cdot \pi \cdot D [\text{m}] \cdot t [\text{m}] \\
 \text{Peso}_{\text{acero}} &= 7,84 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}^3} \right] \cdot \pi \cdot (0,91) \cdot 0,024 [\text{m}^2] \\
 \text{Peso}_{\text{acero}} &= 0,5 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}} \right]
 \end{aligned}$$

Figura 3.6 – Sección transversal de un tramo de la cañería.

Para modelar la interacción entre el suelo y la cañería, se utiliza un elemento de enlace ubicado en los nodos. Este consiste en un resorte no lineal horizontal, el cual sigue una ley de roce que relaciona la fuerza horizontal F_h con la fuerza de roce F_r y un resorte vertical lineal que transmite la carga axial al apoyo, la cual relaciona la fuerza vertical F_v con el desplazamiento z , como se aprecia en la figura 3.7.

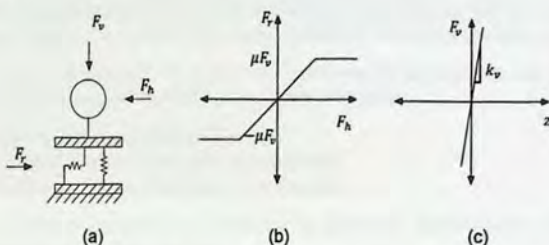


Figura 3.7 – a) Elemento enlace b) Ley del roce c) Ley resorte vertical.

Las características del suelo consideradas se basan en un estudio de mecánica de suelo cercano a la zona del proyecto, se resumen en la tabla 3.1. Para el coeficiente de roce estático entre el suelo y la cañería se considera un valor comúnmente utilizado en esta clase de proyectos, por lo que se tiene:

Tabla 3.1 – Parámetros relevantes del suelo.

Parámetros	Valor
Rigidez vertical	12000 $\left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}} \right]$
Coefficiente de roce estático	0,32

Efectos de segundo orden

Produce esfuerzos internos adicionales que se originan en tramos con elevada carga axial y desplazamientos laterales considerables. El efecto P-Delta genera variaciones en los esfuerzos y un aumento alrededor de un 30 % en los desplazamientos laterales de la cañería. Para este caso en particular el efecto es importante en la zona A, donde existe gran magnitud de carga axial y un pequeño quiebre, como se muestra en la figura 3.8.

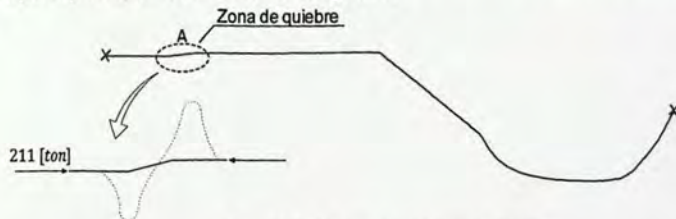


Figura 3.8 – Acercamiento zona de quiebre.

Desarrollo del análisis de flexibilidad

Para obtener el comportamiento de la cañería se realiza un análisis estático no lineal. Con esto se obtienen los esfuerzos en el plano debido a la deformación impuesta. El patrón de las deformaciones se encuentra inicialmente más ligado a la geometría del trazado del acueducto. Los mayores desplazamientos se concentran en los quiebres o cambios de dirección de la cañería. Para controlar los desplazamientos se puede recurrir a la implementación de soportes como guías y anclajes, ver sección 2.4. Sin embargo, estos aumentan el nivel de esfuerzos en la cañería.

A modo de encontrar la solución óptima en cuanto a menos uso de material de soportes y espesores de la cañería, se realizan los siguientes modelos:

- Modelo 1: Cañería libre sin soportes.
- Modelo 2: Cañería con guías equidistantes.
- Modelo 3: Cañería con juntas de expansión.

La forma de presentar los resultados del análisis de flexibilidad de la cañería sobre terreno se desarrollan de la siguiente manera:

1. Deformación lateral máxima de la cañería.
2. Máxima reacción resultante en los soportes.
3. Diagrama de esfuerzos.
4. Tensiones.

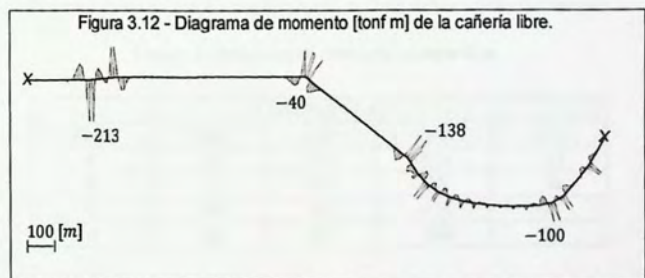
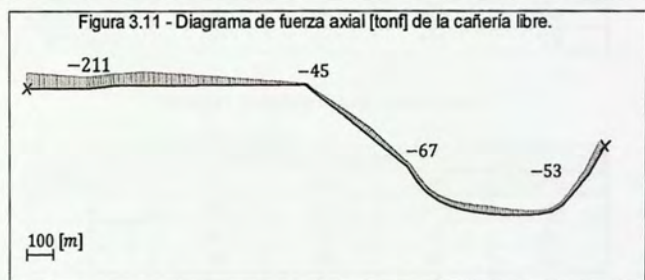
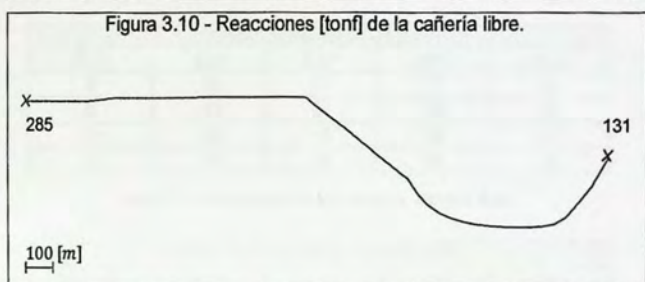
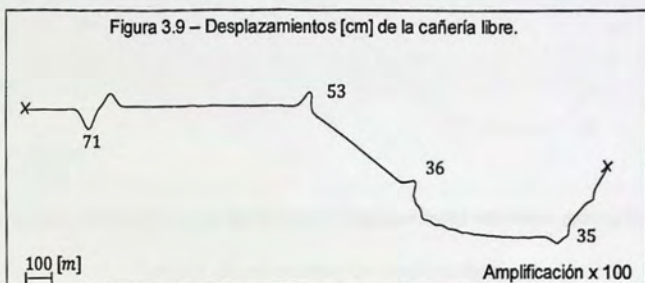
3.4 Modelo 1 – Cañería libre sin soportes

Para este caso, la cañería apoyada directamente sobre el suelo se encuentra libre, es decir, sin ningún tipo de soporte. Cabe remarcar, que la cañería sólo presenta machones de anclajes en los extremos, con el fin de realizar el análisis del tramo en forma independiente. Lo único que se opone al movimiento de ésta, es la fuerza de roce que se produce por la interacción entre el suelo y la cañería.

Los desplazamientos, reacciones, diagrama de esfuerzo axial y diagrama de momento para la combinación de carga más desfavorable corresponden al caso operativo (OPE) y se muestran los parámetros más relevantes en la figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12, respectivamente. Esto con la finalidad de analizar y comparar visualmente el comportamiento en la cañería.

Los máximos valores para las distintas combinaciones de carga utilizadas se muestran en tablas resumen, donde los parámetros más relevantes son señalados por zonas como se aprecia en la figura 3.13. Luego, se obtienen las tensiones máximas de trabajo y se comparan con las tensiones admisibles impuestas por el código ASME B31.11.

Resultados modelo 1 – Cañería libre



Estas figuras corresponden a la cañería libre, bajo la combinación de carga caso operacional (OPE).

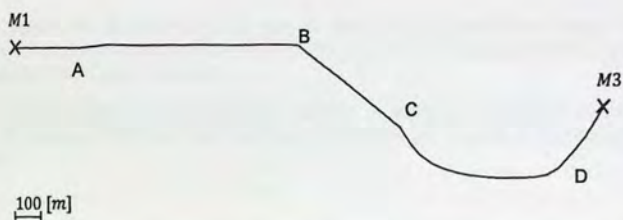


Figura 3.13 – Ubicación de zonas de esfuerzos y desplazamientos relevantes, cañería libre.

Tabla 3.2 - Desplazamientos de la cañería libre.

DESPLAZAMIENTOS [cm]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	16	17	71	20
B	19	20	53	22
C	15	15	36	17
D	14	14	35	16

Tabla 3.3 - Reacciones de los anclajes, cañería libre.

REACCIONES (RESULTANTES) [tonf]				
Reacción	SUS	EXP	OPE	HYD
M1 (machón)	248	248	285	259
M3 (machón)	127	127	131	128

Tabla 3.4 - Esfuerzos axiales, cañería libre.

ESFUERZO AXIAL [tonf]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	-180	-182	-211	-188
B	-39	-39	-45	-40
C	-56	-56	-67	-58
D	-50	-50	-53	-51

Tabla 3.5 - Esfuerzos de momento, cañería libre.

FLEXIÓN [tonf m]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	-107	-110	-213	-121
B	-9	-10	-33	-14
C	-88	-89	-138	-94
D	-82	-83	-100	-84

Se desprende de los resultados que el caso de combinación de carga con mayores solicitaciones corresponde al caso operacional (OPE) y en el caso cuando se realiza la combinación del caso sostenido (SUS) son menores.

Se puede apreciar que los valores máximos de todas las solicitaciones se encuentran ubicados en el comienzo del tramo de la cañería, señalados por la zona A. La reacción mayor se indica con M1.

Tensiones de trabajo

Para este caso, la combinación de los esfuerzos que generan las mayores tensiones se encuentran ubicados en la zona A al comienzo del trazado de la cañería. Los valores máximos de tensiones para distintas combinaciones de carga se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 – Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería libre.

TENSIONES [kgf/cm ²]									
Combinación de carga	σ_L	σ_t	$\tau_{m\acute{a}x}$	σ_{Ladm}	σ_{tadm}	τ_{adm}	Obs.	$\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{adm}$	Condición
SUS	234	2466	1116		3656	2057		0,54	Cumple
EXP	-1022	0	511	3290		2057	$\sigma_L = \Delta\sigma_L$	0,25	Cumple
OPE	-537	2466	1502	2468		2057		0,73	Cumple
HYD	250	2713	1232		4113	2057		0,60	Cumple

Tabla 3.7 – Desplazamientos máximos para cañería libre.

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS [cm]			
Caso	$d_{m\acute{a}x}$	$d_{criterio}$	Condición
SUS	19	45	Cumple
EXP	20	45	Cumple
OPE	71	45	No Cumple
HYD	22	45	Cumple

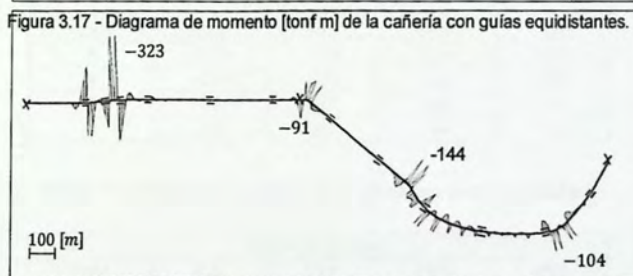
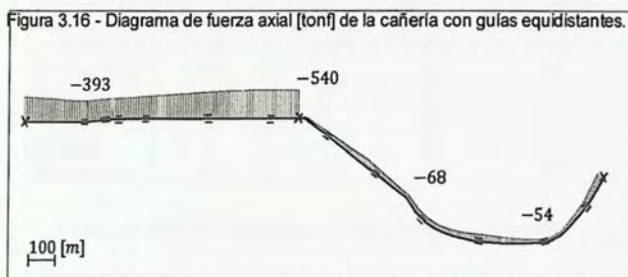
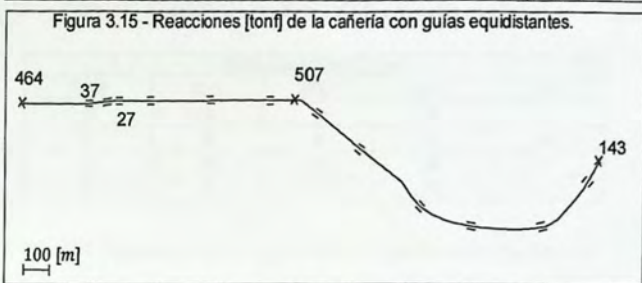
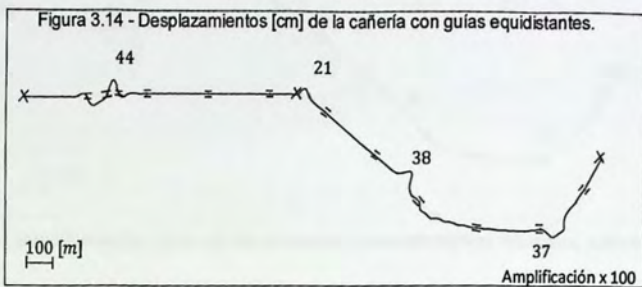
Se desprende que las tensiones de trabajo de la cañería para los distintos casos de combinaciones de carga cumplen con los valores de las tensiones admisibles impuesta por el código ASME B31.11. Sin embargo, no cumple con los desplazamientos máximos propuestos, por lo cual se descarta como posible solución y en consecuencia no es necesario realizar su caso de carga ocasional (OCC), el cual se realiza en el capítulo 4.

3.5 Modelo 2 – Cañería con guías equidistantes

Para este caso se muestra la forma común de elaborar estos tipos de proyectos, donde además de considerar la fuerza de fricción entre el suelo y la cañería, se incorpora la utilización de soportes con el fin de controlar o guiar las deformaciones. Los soportes corresponden a guías equidistantes y machones de anclajes, este último se ubica en zonas donde la reacción es muy alta o la deformación de la cañería es muy elevada, por ejemplo en un quiebre abrupto.

Las guías se encuentran equidistantes a 250 metros, sin embargo se debe implementar tres soportes adicionales ubicados en puntos estratégicos, donde los soportes puedan controlar la deformación sin necesariamente someter a la cañería a esfuerzos muy elevados, con el fin de cumplir con las tensiones admisibles y las deformaciones máximas. Por lo general, la ubicación estratégica de los soportes se puede conseguir tras realizar varias iteraciones, en consecuencia se determina la colocación de machones de anclajes al presentarse tramos de mayor longitud recta y disponer de soportes tipo guías para controlar las deformaciones en zonas de curvas suaves. Para este caso, se utilizan adicionalmente dos guías y un machón de anclaje señalados en la figura 3.18. La forma de presentar los resultados es igual que en el modelo 1.

Resultados modelo 2 – Cañería con guías equidistantes



Estas figuras corresponden a la cañería con guías equidistantes, bajo la combinación de carga caso operacional (OPE).

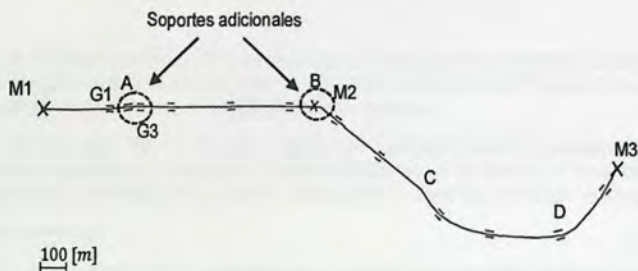


Figura 3.18 – Ubicación de las zonas de los esfuerzos y desplazamientos relevantes, cañería con guías equidistantes.

Tabla 3.8 - Desplazamientos de la cañería con guías equidistantes.

DESPLAZAMIENTOS [cm]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	9	10	44	11
B	9	9	21	10
C	16	16	38	17
D	15	15	37	17

Tabla 3.9 - Reacciones de los anclajes de la cañería con guías equidistantes.

REACCIONES (RESULTANTES) [tonf]				
Reacción	SUS	EXP	OPE	HYD
M1 (machón)	265	270	464	292
G1 (guía)	19	19	37	21
M2 (machón)	244	249	507	270
G3 (guía)	11	11	27	12
M3 (machón)	139	139	143	141

Tabla 3.10 - Esfuerzos axiales de la cañería con guías equidistantes.

ESFUERZO AXIAL [tonf]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	-215	-219	-389	-233
B	-268	-273	-540	-294
C	-56	-57	-68	-58
D	-50	-50	-54	-51

Tabla 3.11 - Esfuerzos de momento de la cañería con guías equidistantes.

FLEXIÓN [tonf m]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	-100	-104	-323	-116
B	-45	-46	-91	-51
C	-89	-91	-144	-96
D	-83	-84	-104	-86

Se desprende de las tablas anteriores que al igual que el caso anterior, la combinación de carga con mayores solicitaciones corresponden al caso operacional (OPE) y en el caso cuando se realiza la combinación del caso sostenido (SUS) son menores.

Se puede apreciar que los valores máximos de esfuerzo axial y momentos se encuentran ubicados en el comienzo del tramo de la cañería, señalados por la zona B y A respectivamente. La mayor reacción para el caso de las guías se indica con G1 y para los machones se encuentra en G2.

Tensiones de trabajo

La combinación de los esfuerzos que generan las mayores tensiones, se encuentran ubicados en la zona A al comienzo del trazado de la cañería. La comparación de los valores máximos de tensiones con los admisibles para las distintas combinaciones de carga se muestran en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con guías equidistantes.

TENSIONES [kgf/cm ²]									
Combinación de carga	σ_x	σ_t	$\tau_{m\acute{x}}$	σ_{Ladm}	σ_{tadm}	τ_{adm}	Obs.	$\tau_{m\acute{x}}/\tau_{adm}$	Condición
SUS	230	2466	1118		3656	2057		0,54	Cumple
EXP	-1036	0	518	3290		2057	$\sigma_x = \Delta\sigma_x$	0,25	Cumple
OPE	-1554	2466	2010	2468		2057		0,98	Cumple
HYD	217	2713	1248		4113	2057		0,61	Cumple

Tabla 3.13 – Desplazamientos máximos para cañería con guías equidistantes.

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS [cm]			
Caso	$d_{m\acute{x}}$	$d_{criterio}$	Condición
SUS	16	45	Cumple
EXP	16	45	Cumple
OPE	44	45	Cumple
HYD	17	45	Cumple

Se desprende que las tensiones de trabajo de la cañería para el caso de las combinaciones de carga cumplen con los valores de las tensiones admisibles impuestas por el código ASME B31.11 y también cumplen los desplazamientos de acuerdo al criterio adoptado como admisibles.

3.6 Modelo 3 - Cañería con juntas de expansión

Es usual en este tipo de proyecto usar grandes cantidades de hormigón para guías y machones de anclajes. Además, con las dificultades de logística que tiene realizar estas faenas constructivas en medio del desierto y dado a su peso no es factible transportar soportes prefabricados.

Para este caso, se muestra una solución orientada a reemplazar los elementos que restringen la deformación como los soportes por elementos que concentran la deformación tales como las juntas de expansión. Estos se ubican estratégicamente en puntos de cambios de dirección o en una zona de quiebre donde ocurre una deformada tipo "acordeón", como se muestra en la figura 3.19.



Figura 3.19 – Deformada en zona de quiebre.

Estas juntas de expansión pueden materializarse como lazos de expansión (*loops*) o juntas prediseñadas de material flexible. Estas permiten concentrar grandes deformaciones sin inducir esfuerzos, se muestra su simbología en la figura 3.20. Dichos elementos constructiva y visualmente son distintos como se puede apreciar en la figura 3.21, pero su comportamiento e influencia en el análisis son iguales. Cabe indicar en este caso, que para efectos de apreciación del modelo las juntas flexibles se realizan como lazos de expansión.



Figura 3.20 – Simbología a) Lazo de expansión (Loop) b) Junta flexible.

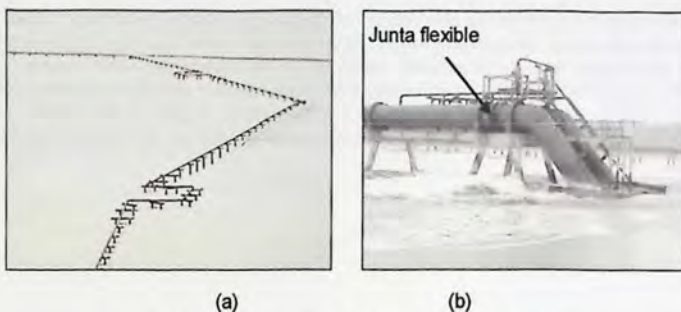


Figura 3.21 –a) Lazo de expansión (Loop) b) Junta flexible.

Fuente: Sistema de oleoducto Trans-Alaska y acueducto ventana.

El lazo de expansión, consiste en modificar una parte del tramo recto de la cañería dando una forma muy similar a un arco permitiendo que se expanda, lo cual entrega flexibilidad al sistema de línea de cañería y disminuye la concentración de esfuerzos, como se puede apreciar en la figura 3.21 (a). Mientras que las juntas flexibles son un elemento tipo fuelle (sección plegable) que permite desplazamientos relativos axiales entre sus extremos sin entrar en deformaciones plásticas, se muestra en la figura 3.21 (b). Estos, se pueden utilizar en aquellos casos donde las exigencias del proceso sean indeseables o impracticables, o bien la falta de espacio físico no permita diseñar lazos.

Las zonas donde hay concentración de deformaciones en la cañería libre se señalan en la figura 3.22 (a) y en cada zona se coloca una junta de expansión como se muestra en la figura 3.22 (b), el cual corresponde al tipo lazo de expansión (loop) para tener una visión más conceptual de la deformada.

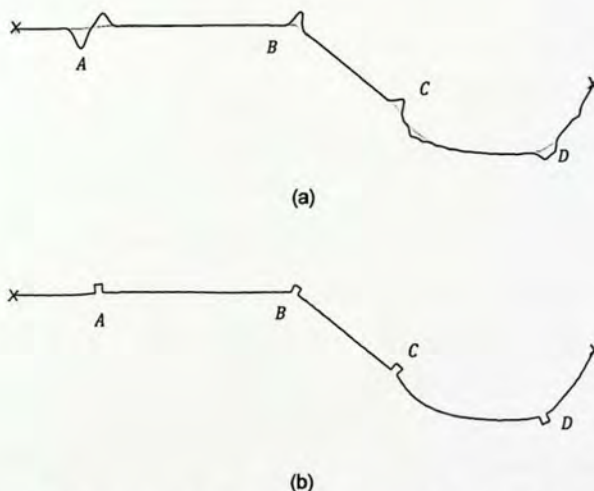
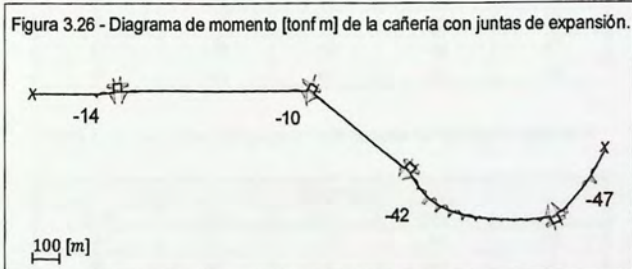
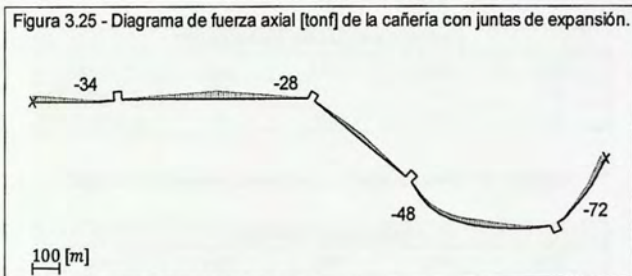
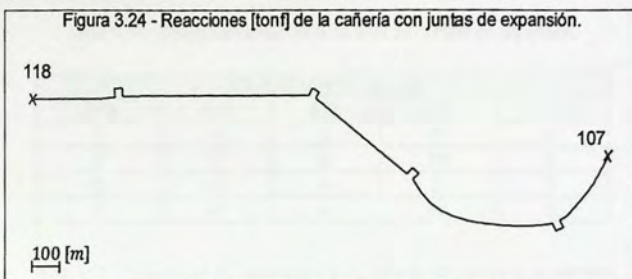
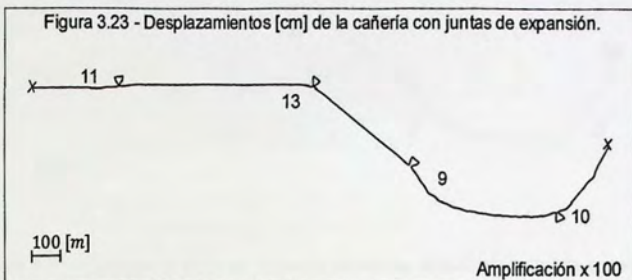


Figura 3.22 – a) Desplazamiento de cañería libre b) Ubicación de juntas de expansión.

La configuración en planta del trazado de cañería sólo se modifica en los lugares donde se implementan los lazos de expansión. Para este caso, las dimensiones son igual a 30 x 30 x 30 metros simulando el arco. Con estas longitudes se obtienen menores tensiones, logrando la flexibilidad adecuada sin inducir tensiones considerables. Se implementa un total de cuatro lazos a lo largo de la cañería, ubicados en las zonas donde se puede apreciar un desplazamiento considerable, como se muestra en la figura 3.22. La forma de presentar los resultados es igual que en el modelo anterior.



Resultados modelo 3 – Cañería con juntas de expansión



Estas figuras corresponden a la cañería con juntas de expansión, bajo la combinación de carga caso operacional (OPE).

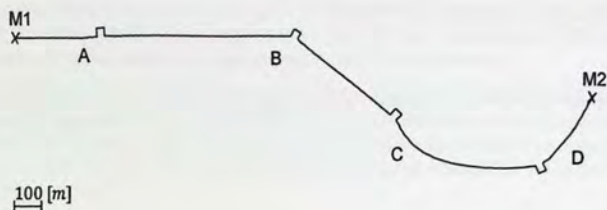


Figura 3.27 – Ubicación de zonas de esfuerzos relevantes, cañería con juntas de expansión.

Tabla 3.14 - Desplazamientos de la cañería con juntas de expansión.

DESPLAZAMIENTOS [cm]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	4	5	11	5
B	5	6	13	6
C	4	4	9	5
D	4	4	10	5

Tabla 3.15 - Reacciones de los anclajes de la cañería con juntas de expansión.

REACCIONES (RESULTANTES) [tonf]				
Reacción	SUS	EXP	OPE	HYD
M1 (machón)	115	115	118	116
M2 (machón)	103	103	107	103

Tabla 3.16 - Esfuerzos axiales de la cañería con juntas de expansión.

ESFUERZO AXIAL [tonf]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	-32	-33	-34	-33
B	-26	-26	-28	-26
C	-46	-46	-48	-47
D	-66	-67	-72	-70

Tabla 3.17 - Esfuerzos de momento de la cañería con juntas de expansión.

FLEXIÓN [tonf m]				
Zona	SUS	EXP	OPE	HYD
A	-11	-12	-14	-12
B	-5	-5	-10	-7
C	-35	-36	-42	-36
D	-37	-38	-47	-39

Se desprende de las tablas que al igual que los modelos anteriores, el caso de combinación de carga con mayores solicitaciones corresponde para el caso operacional (OPE) y en el caso cuando se realiza la combinación del caso sostenido (SUS) son menores.

Se puede notar de la figura 3.23 que la deformación de la cañería prácticamente no se encuentra fuera del eje del trazado. Cabe indicar, que los momentos que se muestran en la figura 3.26 en los lazos de expansión dependen de las dimensiones de estos lazos y se pueden ajustar sus dimensiones para que no sean relevantes. Si se utiliza una junta flexible tipo fuelle no se transmiten esfuerzos en esos puntos.

Se puede apreciar que los valores máximos de las solicitaciones de fuerza axial y esfuerzo de momento se encuentran ubicados en la zona D al final del tramo de la cañería. Cabe indicar, que los esfuerzos de momento ubicados en los lazos no se consideran relevantes, ya que se pueden modificar variando el tamaño del arco.

Tensiones de trabajo

La combinación de los esfuerzos que generan las mayores tensiones, se encuentran ubicados en la zona D al final del tramo recto de la cañería. Los máximos valores de tensiones para las distintas combinaciones de carga se muestran en la tabla 3.18.

Tabla 3.18 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con juntas de expansión.

TENSIONES [kgf/cm ²]									
Combinación de carga	σ_t	σ_r	$\tau_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{L adm}$	$\sigma_{r adm}$	τ_{adm}	Obs.	$\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{adm}$	Observación
SUS	882	2466	792		3656	2057		0,39	Cumple
EXP	-359	0	178	3290		2057	$\sigma_r = \Delta\sigma_t$	0,09	Cumple
OPE	805	2466	831	2468		2057		0,40	Cumple
HYD	986	2713	864		4113	2057		0,42	Cumple

Se puede notar, que el valor máximo de tensión de corte en este caso corresponde al de prueba hidráulica (HYD) a diferencia de lo que ocurre anteriormente.

Tabla 3.19 – Desplazamientos máximos para cañería con juntas de expansión.

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS [cm]			
Caso	$d_{m\acute{a}x}$	$d_{criterio}$	Condición
SUS	5	45	Cumple
EXP	6	45	Cumple
OPE	13	45	Cumple
HYD	6	45	Cumple

Se desprende que las tensiones de trabajo de la cañería cumplen con los valores de las tensiones admisibles impuestas por el código. Donde las tensiones disminuyen cerca de un 50 [%] y el cociente de los desplazamientos es hasta un 500 [%] con respecto al modelo de la cañería libre. Esta opción reduce los desplazamientos laterales de la cañería, no presenta la necesidad de implementar soportes y disminuye las tensiones conformando una alternativa viable tanto constructiva como económicamente. No obstante, todas las alternativas mencionados anteriormente con un espesor igual a 24 [mm], cumplen con todos los requisitos indicado por el código ASME B31.11, salvo la cañería libre que no cumple con el criterio de desplazamiento admisible.

4 Análisis Sísmico

En la Norma Chilena NCh 2369.Of2003 en su anexo C, sección 11.5.2, se indica que debe considerarse la acción sísmica en cañerías de diámetro mayor o igual a 200 mm. En su sección C.6.3, señala que se deben limitar las deformaciones sísmicas horizontales en construcciones industriales, siempre y cuando estas puedan generar daños en los elementos unidos a la estructura como cañerías o ductos. Además, en su sección 11.5.1 exige que se dispongan juntas de expansión y apoyos que aseguren la estabilidad sísmica y permitan simultáneamente deformaciones térmicas, con el objetivo de la continuidad de operaciones incluso después de un sismo de alta intensidad.

La norma NCh2369 permite tres formas de realizar el análisis sísmico. Un análisis estático considerando una fuerza estática aplicada al sistema de cañerías, un análisis modal espectral el cual no aplica en este caso porque no existe una fuerza restitutiva, por lo tanto no hay un periodo y por último un análisis tiempo historia que considera un movimiento del suelo en función del tiempo. Se muestra una esquematización en la figura 4.1.

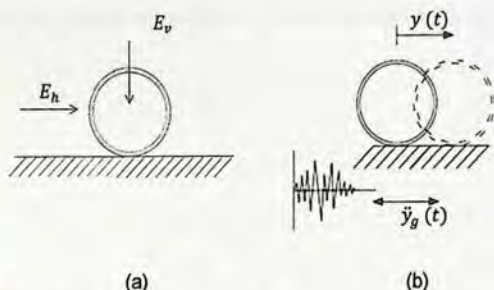


Figura 4.1 – Esquematización a) Análisis estático b) Análisis tiempo-historia.

El término E_h y E_v se refiere a la fuerza horizontal y vertical indicados en la norma para simular la acción del sismo a través de un análisis estático, ver figura 4.1 (a). Mientras que en un análisis tiempo-historia, se introduce la acción sísmica utilizando un registro de aceleración del suelo $\ddot{y}_g(t)$ obteniendo la respuesta $y(t)$ que es el desplazamiento de la cañería en función del tiempo. Cabe mencionar que un análisis estático en este tipo de problema no es consistente con el fenómeno, como se muestra en la figura 4.1. En consecuencia, la forma que se opta para abordar la acción sísmica es a través de un movimiento del suelo.

Existe una fuerza opositora a la acción del movimiento, la que se conoce como fuerza de roce, la cual viene dada por el producto entre el coeficiente de roce μ y la fuerza normal N , donde inicialmente actúa la fuerza de roce estático $\mu_e N$, el cual es igual a la fuerza aplicada, como se muestra en la figura 4.2. Lo anterior es válido hasta el punto en que el elemento comienza a moverse, dando lugar a la fuerza de roce dinámica $\mu_d N$ la cual es constante. Los valores típicos de coeficiente de roce dinámico μ_d entre el acero y la arena seca son aproximadamente 24% más pequeños que el del coeficiente de roce estático μ_e [21]. La transición de fuerza de roce estática con la dinámica, al ser menor genera un desfase donde se pierde la igualdad en magnitud entre el roce estático y la fuerza aplicada continuando el valor de roce dinámico constante. Para este caso, se utiliza la simplificación de este modelo, el cual resulta ser más conservador considerando μ_e igual al μ_d , donde μ_e es igual a 0,24.

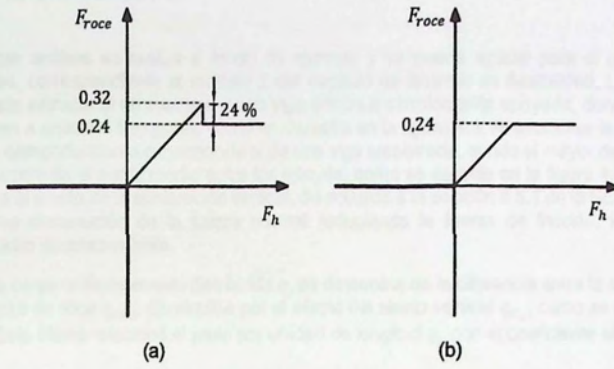


Figura 4.2 – a) Ley de la fuerza aplicada versus fuerza de roce b) Ley simplificada.

4.1 Análisis estático

Este análisis se realiza a modo de ejemplo y se puede aplicar para el caso de guías equidistantes, correspondiente al modelo 2 del capítulo de análisis de flexibilidad. La cañería del punto de vista estructural se asemeja a una viga continua simplemente apoyada, donde los apoyos corresponden a soportes tipo guías, como se muestra en la figura 4.3. Al seccionar la cañería entre soportes su comportamiento corresponde al de una viga empotrada, donde el mayor desplazamiento horizontal ocurre en el punto medio entre los apoyos, como se aprecia en la figura 4.4. Además, si se considera el efecto de la aceleración vertical, de acuerdo a la sección 5.5.1 de la NCh 2369 puede provocar una disminución de la fuerza normal reduciendo la fuerza de fricción, lo cual puede aumentar dicho desplazamiento.

La carga uniformemente distribuida q , se determina de la diferencia entre la acción sísmica q_{Eh} y la fuerza de roce q_{roce} disminuida por el efecto del sismo vertical q_{Ev} , como se muestra en la figura 4.5. Esta última relaciona el peso por unidad de longitud q_p con el coeficiente sísmico vertical C_v .

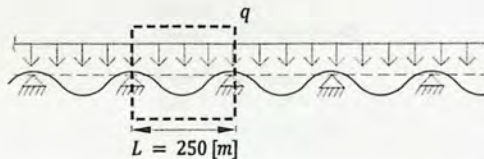


Figura 4.3 – Viga simplemente apoyada con una carga uniforme q y de largo L .

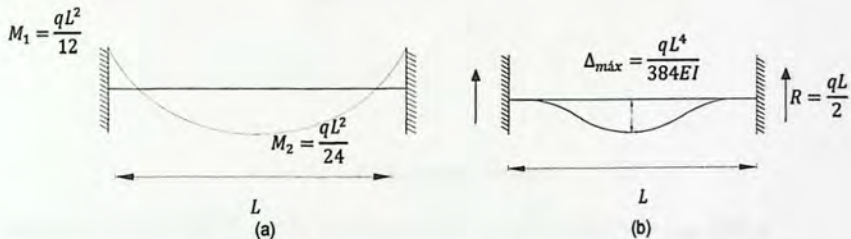


Figura 4.4 – a) Diagrama de momento de una viga empotrada b) Deflexión máxima de una viga empotrada

Cálculo solicitaciones:

Los valores del coeficiente sísmico C , coeficiente de importancia I y el coeficiente sísmico vertical C_v , se encuentran en la tabla 2.1 del presente trabajo de título. Se utiliza el coeficiente sísmico C igual al coeficiente máximo $C_{máx}$ por ser un sistema inelástico, ya que no existe un período y en consecuencia no se puede calcular el valor del coeficiente sísmico para un período dado.

$$\begin{aligned}q_{E_h} &= CIP \\q_{E_h} &= 0,26 \cdot 1,2 \cdot 11 \\q_{E_h} &= 3,43 \text{ [kgf/cm]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}q_{E_v} &= PC_v \\q_{E_v} &= 11 \cdot 0,266 \\q_{E_v} &= 2,93 \text{ [kgf/cm]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}q_{normal} &= q_p - q_{E_v} \\q_{normal} &= 11 - 2,93 \\q_{normal} &= 8,07 \text{ [kgf/cm]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}q_{roce} &= \mu_e q_{normal} \\q_{roce} &= 0,32 \cdot 8,07 \\q_{roce} &= 2,58 \text{ [kgf/cm]}\end{aligned}$$

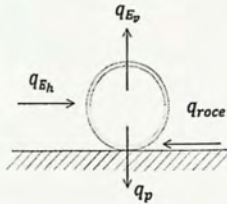


Figura 4.5 – DCL de un tramo de cañería

Reemplazando los valores, se obtiene un desplazamiento máximo de la cañería $\Delta_{máx}$ igual a:

$$\begin{aligned}\Delta_{máx} &= \frac{(q_{E_h} - q_{roce}) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \\ \Delta_{máx} &= \frac{(3,43 - 2,58) \cdot (25000)^4}{384 \cdot (2000000) \cdot (668350)} \\ \Delta_{máx} &= 647 \text{ [cm]}\end{aligned}$$

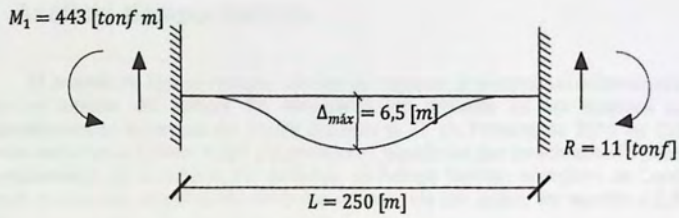


Figura 4.6 – Deflexión máxima y reacciones de la viga empotrada.

Como la cañería es un sistema muy flexible, el método de fuerzas entrega enormes desplazamientos, siendo este valor poco razonable con respecto a los vistos en terremotos. Finalmente esta metodología no se puede aplicar, por lo cual se escoge la formulación más realista que se refiere a una aceleración del suelo utilizando un análisis tiempo historia no lineal y no un conjunto de fuerzas estáticas. Lo anterior resulta aún más evidente para el caso del modelo 3 del análisis de flexibilidad en que no hay soportes tipo guías.

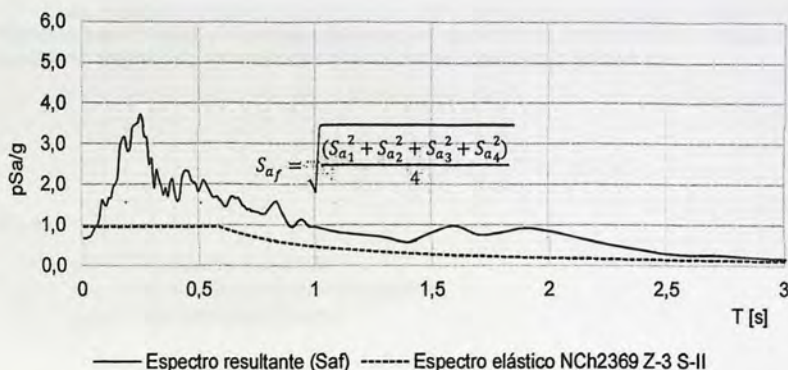


Figura 4.8 - Espectro elástico NCh 2369 y espectro resultante.

Para la modelación del análisis sísmico se realizan dos modelos. El primero consiste en un sistema de un grado de libertad considerando un elemento unitario, el cual permite analizar el comportamiento de la cañería en zonas alejadas de los soportes o bien para sistemas de cañería sin soportes. Finalmente de este modelo se puede extraer la deformación máxima en un tramo libre de la cañería.

El segundo modelo considera un tramo del trazado de cañería con un soporte en el punto medio, para analizar el comportamiento de la cañería en zonas cercanas a los soportes y poder evaluar la reacción de la guía y los esfuerzos sísmicos. Los resultados de este modelo se pueden emplear para un sistema con guías equidistantes.

4.2.1 Modelo para condición sin soportes cercanos (modelo de 1GL)

Dado que la cañería tiene una longitud mucho mayor que el ancho, es razonable considerar un elemento de longitud unitaria y abstraerse de la influencia del resto de la cañería debido a la flexibilidad transversal, donde se realiza un modelo de un grado de libertad siempre que se encuentre alejado de los soportes, como se muestra esquemáticamente en la figura 4.9.

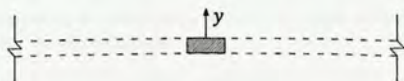


Figura 4.9 – Esquemática de una longitud unitaria de cañería.

Es necesario conocer el desplazamiento absoluto del sistema, donde se desglosa en desplazamiento del suelo y el desplazamiento relativo del elemento, ver ecuación 4.1. Donde esta ecuación se obtiene de la cinemática del modelo que se muestra en la figura 4.10.

$$y(t) = v(t) + y_g(t) \quad (4.1)$$

$$\dot{y}(t) = \dot{v}(t) + \dot{y}_g(t) \quad (4.2)$$

$$\ddot{y}(t) = \ddot{v}(t) + \ddot{y}_g(t) \quad (4.3)$$

Siendo:

- $y(t)$: Desplazamiento absoluto.
- $v(t)$: Desplazamiento relativo de la cañería.
- $y_g(t)$: Desplazamiento del suelo.

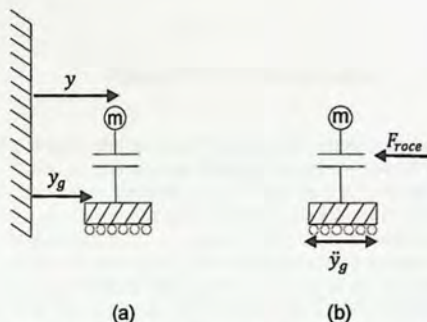


Figura 4.10 – a) Cinemática del modelo b) Diagrama de cuerpo libre.

Al obtener la relación cinemática en el sistema, se combina con la ecuación de movimiento con la finalidad de analizar la fuerza de roce con el movimiento relativo.

En la figura 4.10 (b) se representa un tramo de la cañería como un sistema de un grado de libertad, donde m es la masa del sistema a considerar y F_{roce} la fuerza de roce. Este sistema está sometido a una aceleración \ddot{y}_g , la cual representa el efecto del sismo.

Se realiza un diagrama de cuerpo libre como se muestra en la figura 4.10 (b) y se obtiene la ecuación de movimiento, ver ecuación 4.4.

$$-F_{roce} = m\ddot{y} \quad (4.4)$$

Con la finalidad de obtener la relación entre la fuerza de roce y el desplazamiento de un sistema de línea de cañería, se reemplaza la ecuación de movimiento, ecuación 4.4 con la aceleración absoluta ecuación 4.3 para un sistema de un grado de libertad, descrita por:

$$-F_{roce} = m\ddot{y}_g + m\ddot{v}$$

Reordenando la igualdad, se tiene:

$$-F_{roce} - m\ddot{y}_g = m\ddot{v}$$

En el lado izquierdo de la ecuación, se tiene la fuerza de roce junto al producto de $m\ddot{y}_g$ (fuerza externa equivalente), donde \ddot{y}_g es la aceleración del suelo. Por el lado derecho de la igualdad, se tiene el producto de $m\ddot{v}$ (fuerza inercial de la cañería), donde \ddot{v} es la aceleración de la cañería, como se muestra en la figura 4.11. Esto es matemáticamente equivalente a acelerar la masa y dejar el sistema con base fija.

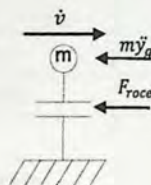


Figura 4.11 – Movimiento relativo.

Se puede notar que la fuerza de roce depende del movimiento relativo, no así cuando la cañería se mueve con el suelo, ya que en ese caso se mueve de manera monolítica. En la figura 4.12 (a) se puede observar que la pendiente de 45° corresponde a la igualdad entre la fuerza aplicada F_h y la fuerza de roce estática, su comportamiento cambia al comenzar el movimiento donde la fuerza opositora es la fuerza de roce dinámica $\mu_d \cdot N$, la cual se mantiene constante siendo el valor máximo de esta fuerza opositora y pasando este umbral la cañería se está desplazando. Se puede observar en la figura 4.12 (b) el efecto de rodadura de la cañería, el cual no se considera, como se menciona en los alcances. Además, este efecto bien puede ser aminorado por la torsión restitutiva del resto de la cañería.

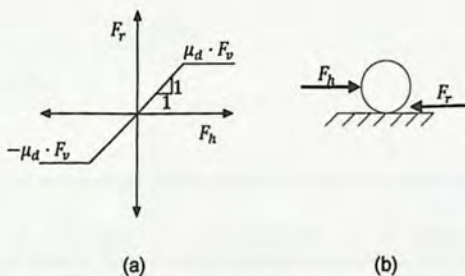


Figura 4.12 – a) Gráfico ley del roce b) Esquema de fuerzas

La fuerza de roce se define como:

$$F_{roce}(\dot{v}) = \begin{cases} F_{aplicada} (F_h) & \text{si } \dot{v} = 0 \\ -\mu_d N & \text{si } \dot{v} > 0 \\ \mu_d N & \text{si } \dot{v} < 0 \end{cases}$$

Características del modelo

El efecto del sismo corresponde a una aceleración del suelo, pero el programa computacional empleado para realizar el análisis acelera masas. Sin embargo como se muestra anteriormente, es matemáticamente equivalente a una aceleración de la masa para obtener el desplazamiento relativo y las reacciones. Las características del suelo se obtienen de estudios de mecánica de suelo de la zona norte cercana a la zona del proyecto y se muestran en la tabla 4.1

Tabla 4.1 – Parámetros relevantes del suelo

Parámetros	Valor
Amortiguamiento vertical	4 [%]
Amortiguamiento horizontal	0
Rigidez vertical	12000 $\left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}}\right]$
Coefficiente de roce dinámico	0,24

Para simular la interacción entre el suelo y la cañería se utiliza un elemento de enlace compuesto por dos resortes al igual que en el análisis de flexibilidad, como se muestra en la figura 4.13 (a). A excepción que al resorte vertical se le incorpora un amortiguamiento (ξ) igual al 4% y para el resorte horizontal se trabaja con el coeficiente de roce dinámico μ_d como se indica en la figura 4.12 (a)

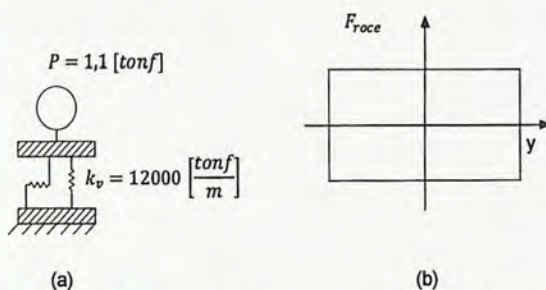


Figura 4.13 – a) Esquemización modelo b) Esquema curva de respuesta de la fuerza de roce

La fuerza de roce tiene un comportamiento en el tiempo como se muestra esquemáticamente en la figura 4.13 (b), donde la ordenada corresponde a la fuerza de roce, es decir, $\mu_d N$ y la abscisa los desplazamientos en función del tiempo. Una vez que el sistema se comienza a desplazar, el sistema no necesariamente volverá a su posición inicial, porque no hay una fuerza restitutiva.

Para incluir la carga debido al peso propio y peso del agua en función del tiempo, se utiliza una función rampa. Consiste en cargar de forma paulatina una fuerza constante en el tiempo lo suficiente para que deje de vibrar, para establecer el real comportamiento del modelo antes de que empiece a actuar el sismo de forma severa, como se puede apreciar en la figura 4.14. Además, dicha función rampa es necesaria para activar la ley de resorte horizontal en el modelo.

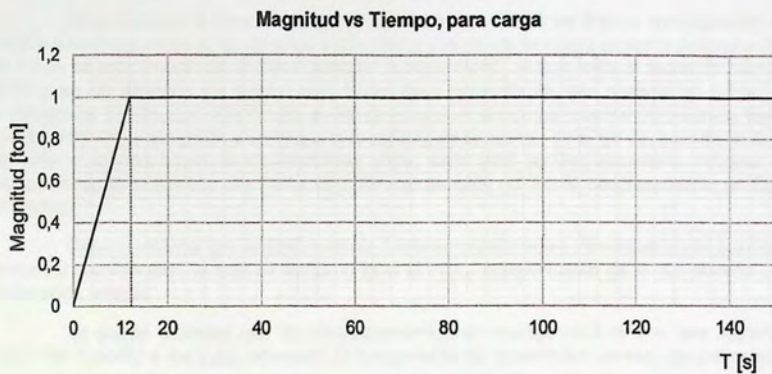


Figura 4.14 - Función rampa.

Resultados del análisis del modelo de un grado de libertad

Se muestra la respuesta en el tiempo de los desplazamientos junto a los registros horizontales y verticales de aceleraciones para el caso de Llole en la figura 4.15, Concepción en la figura 4.16, Constitución en la figura 4.17 y Angol en la figura 4.18. Con la finalidad de obtener el máximo desplazamiento de los registros para ser considerado en el diseño de acuerdo a la NCh2369.

Cabe señalar, si bien los desplazamientos indicados en las figuras corresponden a los máximos medidos desde el eje de la línea de cañería y es donde se quiere acotar el desplazamiento, se define en este trabajo un término llamado "deslizamiento", el cual mide el recorrido total de la cañería en un intervalo de tiempo casi instantáneo producto de una aceleración fuerte. Este parámetro se analiza con más detalle en las conclusiones donde se propone considerarlo también como parámetro a comparar, puesto que si la cañería se encuentra en el eje del trazado de la línea de cañería cuando ocurre el deslizamiento, dicho valor será su desplazamiento máximo. Este deslizamiento se indica por una flecha de color rojo en cada gráfico de desplazamiento en función del tiempo.

Cabe mencionar que el deslizamiento fuerte es ocasionado en los instantes de aceleración horizontal considerable, la cual es similar o igual al PGA_H independiente de lo que suceda con la aceleración vertical.

Se puede observar que los desplazamientos se pueden producir con una aceleración horizontal superior a los $0,24g$, obviando la componente de aceleración vertical, ya que supera la fuerza de roce estática iniciando el desplazamiento de la cañería.

Al existir cambios de direcciones en las aceleraciones horizontales en intervalos muy cortos de tiempo, repercute que en ocasiones no se desarrolle por completo su deslizamiento debido a que la aceleración que inicia el movimiento, si bien puede ser muy fuerte ocurre en un periodo muy corto de tiempo, tal es el caso del registro de Angol.

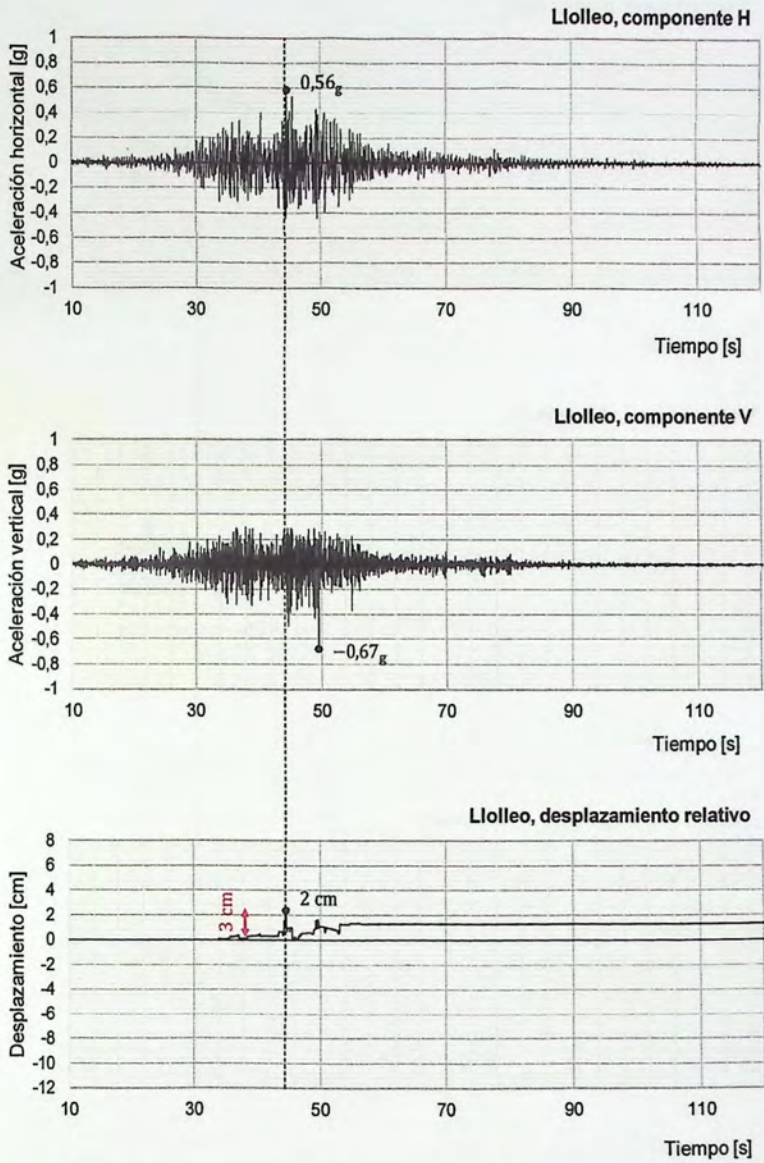


Figura 4.15 - a) Registro de aceleraciones horizontales, b) Registro de aceleraciones verticales y c) Desplazamientos en función del tiempo, caso Llollo.

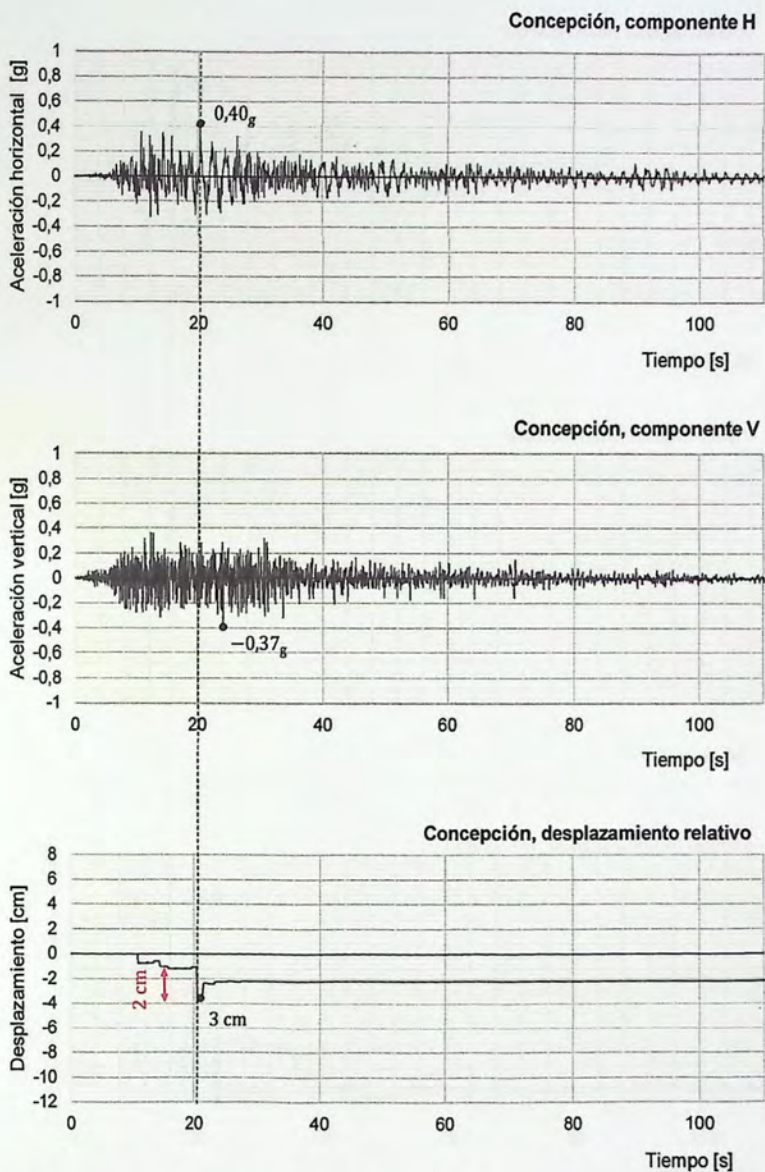


Figura 4.16 - a) Registro de aceleraciones horizontales, b) Registro de aceleraciones verticales y c) Desplazamientos en función del tiempo, caso Concepción.

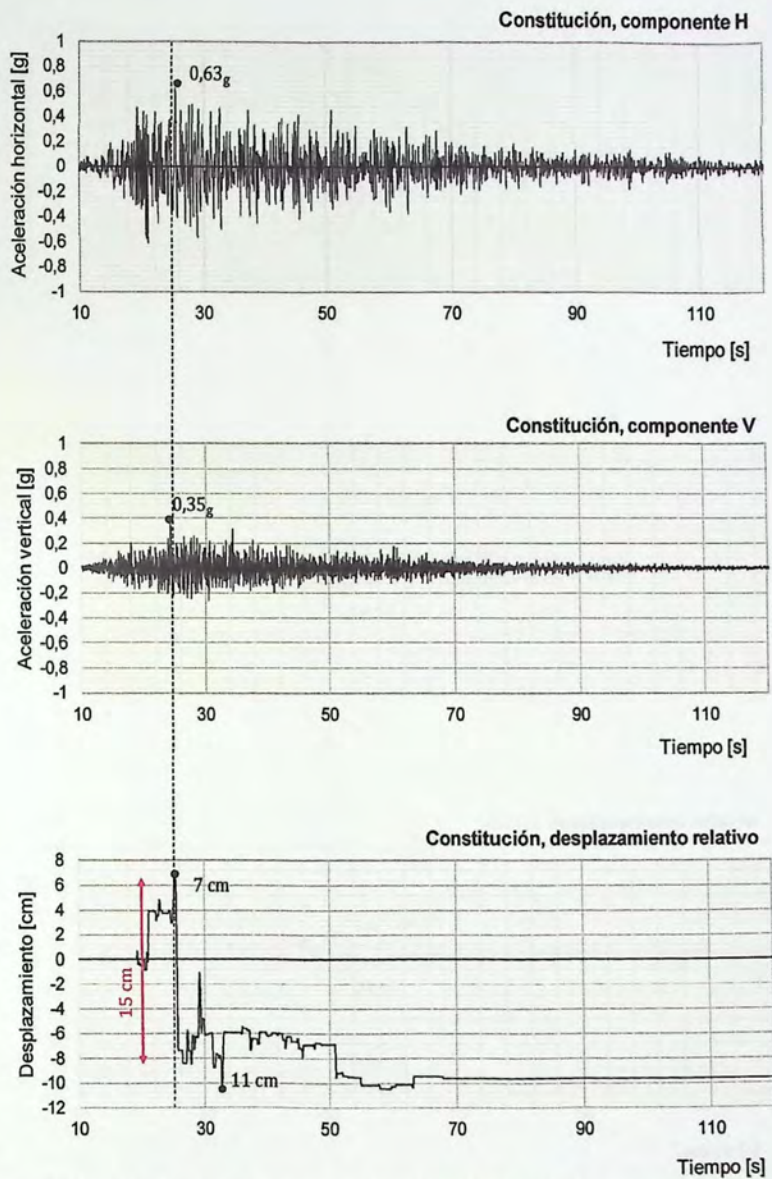


Figura 4.17 - a) Registro de aceleraciones horizontales, b) Registro de aceleraciones verticales y c) Desplazamientos en función del tiempo, caso Constitución.

Respuesta de la fuerza de roce

Cuando el sistema de un grado de libertad es sometido a las aceleraciones horizontales y verticales simultáneamente, la fuerza de roce dinámica varía dependiendo del registro. Esto, debido que al existir aceleraciones verticales afectan la reacción de la fuerza normal, por ende, a la fuerza de roce.

Se busca verificar que la respuesta de la fuerza de roce se encuentra dentro de los límites de la fuerza dada por $\mu_d \cdot N$ indicada por la línea segmentada cuyo valor es igual a 0,26 [tonf] ver ecuación 4.5, con la finalidad de comparar el efecto de incorporar la aceleración vertical.

$$F_{roce} = \mu_d \cdot N \quad (4.5)$$

$$F_{roce} = 0,24 \cdot 1,1$$

$$F_{roce} = 0,26 \text{ [tonf]}$$

Se muestra el comportamiento de la fuerza de roce entre el suelo y la cañería considerando los análisis sísmicos con el registro vertical y horizontal simultáneamente y se aprecian las curvas de respuesta del caso de Llolleo, Concepción y Angol en la figuras 4.19.

Para el caso de Llolleo se puede apreciar una disminución considerable de la fuerza normal, lo cual puede ocurrir producto de la máxima aceleración vertical igual a $-0,67g$, se destaca con un círculo de color rojo dicho fenómeno.

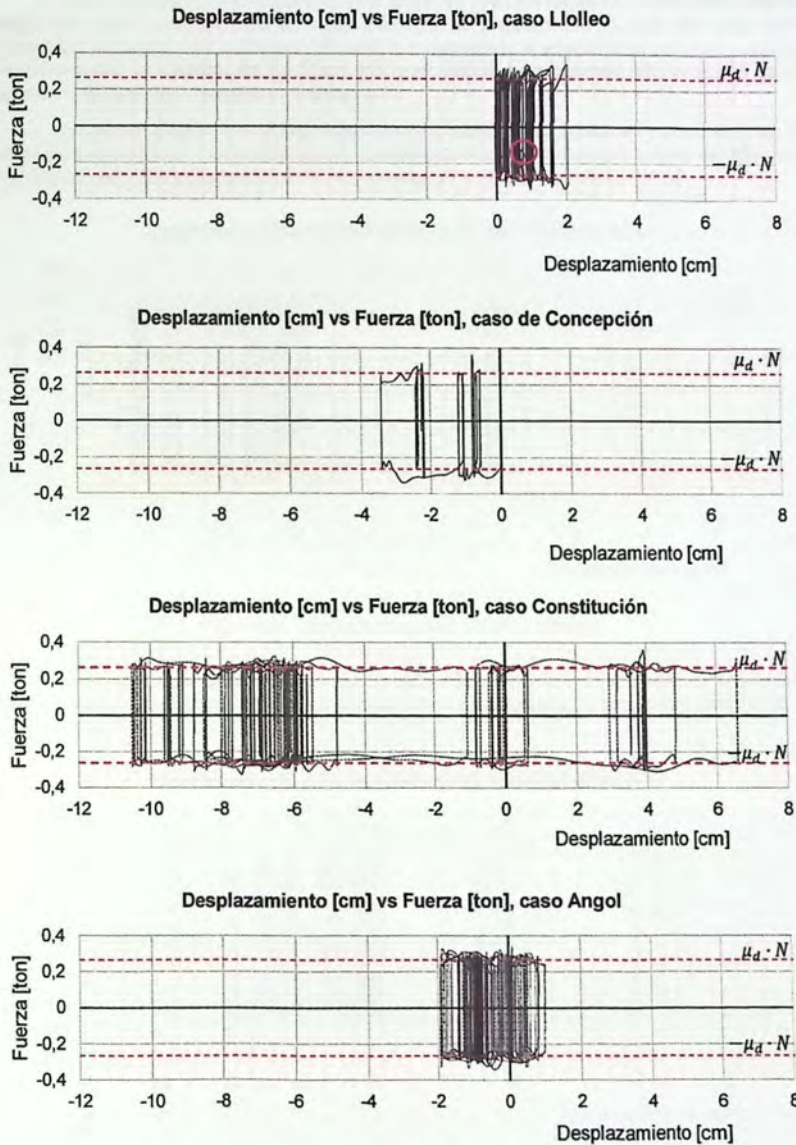


Figura 4.19 - Curvas de respuesta caso Lolloe, Concepción, Constitución y Angol.

Para comparar qué tan importante es el efecto de la acción del sismo vertical, se realiza el análisis del registro que presenta la mayor demanda de deslizamiento, el cual para este caso corresponde al registro de Constitución. El análisis considerando la aceleración horizontal y vertical simultáneamente se muestra en las figura 4.20 y el análisis considerando sólo la acción de la aceleración horizontal se muestra en la figura 4.21.

Se puede apreciar que la fuerza de roce no presenta mucha variación por el efecto de la acción del sismo vertical. Dicha variación se considera del límite generado por la línea de color rojo segmentada que representa la fuerza de roce máxima sin considerar el sismo vertical.

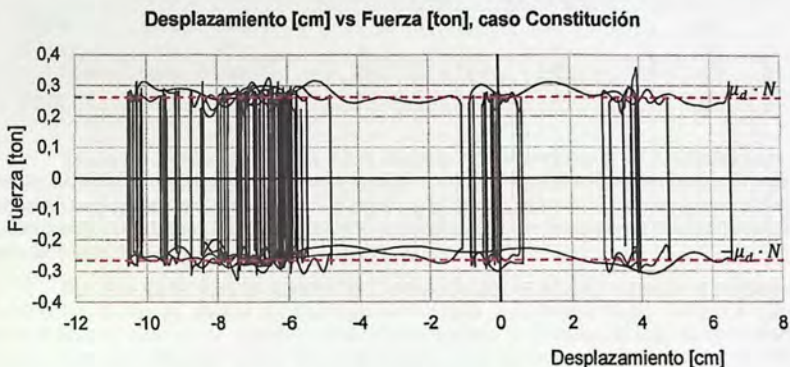


Figura 4.20 - Curvas de respuesta, caso Constitución

Al no considerar la aceleración vertical se puede ver que la respuesta es muy similar para este caso, salvo que la fuerza máxima de roce dinámica es constante, porque no hay variación de la fuerza normal.

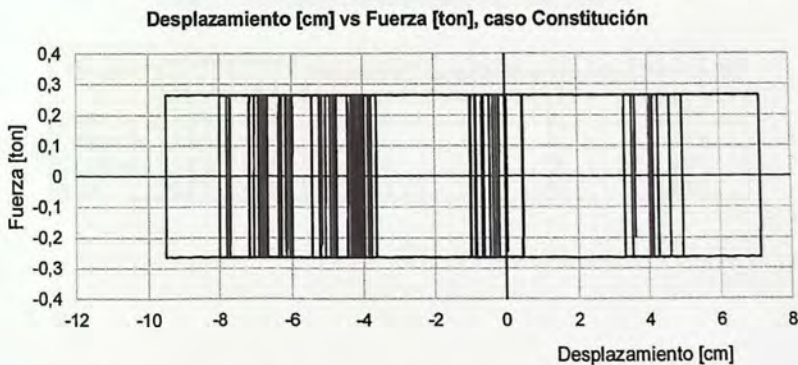


Figura 4.21 - Curvas de respuestas sólo registro horizontal, caso Constitución.

Al comparar los desplazamientos utilizando la aceleración horizontal y vertical simultáneamente con los desplazamientos sólo de la aceleración horizontal, se puede notar que no se aprecian grandes variaciones en magnitud, como se muestra en la tabla 4.2. Por lo cual se podrían utilizar los valores del desplazamiento sin la necesidad del sismo vertical, para obtener modelos aún más simples del fenómeno.

Tabla 4.2 – Comparación de desplazamientos.

Registros	Aceleraciones [g]		Desplazamiento máximos [cm]		Diferencia [%]
	PGA_H	PGA_V	Acc. vertical y horizontal	Acc. horizontal	
Llolleo	0,56g	-0,67g	2	3	50%
Concepción	0,40g	-0,37g	3	4	33%
Constitución	0,63g	0,35g	11	10	-9%
Angol	0,93g	-0,29g	2	2	0%

Se puede apreciar en la tabla 4.3 el resumen correspondiente a los resultados para el análisis del modelo de un grado de libertad, donde el máximo desplazamiento es igual a 11 [cm] y corresponde al registro de Constitución. Sin embargo su deslizamiento tiene un valor igual a 15 [cm], el cual ocurre cuando la cañería se encuentra ya desplazada y se mueve en la dirección contraria que ese desplazamiento.

Por otra parte, para el registro de Concepción ocurre el caso contrario al registro de Constitución, donde se aprecia un desplazamiento mayor a su deslizamiento. Debido a que el deslizamiento el cual ocurre cuando la cañería se encuentra ya desplazada y se da en la misma dirección que ese desplazamiento. En consecuencia es de suma importancia analizar de forma independiente cada caso y no generalizar, ya que cada respuesta de desplazamiento en función del tiempo se comporta de manera distinta para cada registro.

Finalmente el máximo desplazamiento $d_{m\acute{a}x}$ del análisis sísmico cuyo valor es igual a 11 [cm], se debe sumar al desplazamiento máximo del caso sostenido (SUS) realizado en el capítulo 3. Esto para obtener el desplazamiento total debido al caso de carga ocasional (OCC) del análisis de flexibilidad del sistema de cañería de acuerdo al código ASME 31.11.

Tabla 4.3 – Comparación de desplazamientos y deslizamientos.

Registros	Aceleraciones [g]		Desplazamiento [cm]	Deslizamiento [cm]	Diferencia [%]
	PGA_H	PGA_V			
Llolleo	0,56g	-0,67g	2	2	0%
Concepción	0,40g	-0,37g	3	2	-33%
Constitución	0,63g	0,35g	11	15	36%
Angol	0,93g	-0,29g	2	3	50%

4.2.2 Modelo para tramos con soportes equidistantes (modelo de VGL)

Con la finalidad de obtener una mayor información del comportamiento de la cañería en zonas cercanas a los soportes o para sistemas con soportes, se realiza un modelo más completo que el anterior. El modelo anterior es más simple porque considera un solo grado de libertad y sólo sirve para evaluar el comportamiento de la respuesta máxima del desplazamiento de la cañería sin considerar la interacción con el resto, lo cual se emplea para zonas alejadas a los soportes o bien para sistema sin soportes. Además, el modelo de un grado de libertad se puede utilizar para verificar los resultados del modelo de varios grados de libertad en el extremo de la cañería cuando se encuentra lejos del soporte.

El modelo de varios grados de libertad, considera el tramo de cañería entre soportes tipo guías. En el cual se obtienen los esfuerzos, reacción de la guía y el desplazamiento en el extremo para distintos largos de cañería. Donde el desplazamiento en el punto extremo de la cañería debería tender al valor del modelo de un grado de libertad, ya que disminuye el efecto de restricción de la guía.

Cuando la cañería se somete a una sollicitación de desplazamiento horizontal del suelo y se deforma como se muestra en la figura 4.22 (a), se puede obtener un modelo representativo más simple al repetirse el patrón como se muestra en la figura 4.22 (b). En este modelo la guía se encuentra en el centro y los extremos quedan libres de desplazarse, pero con restricción al giro para ser consistente con la deformada del modelo y cumplir con la continuidad de la cañería.

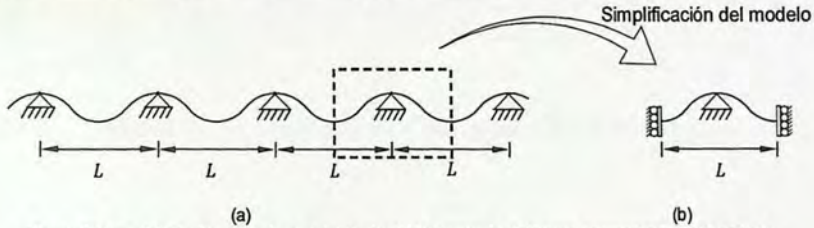


Figura 4.22 – a) Cañería con guías equidistantes b) Deformada del tramo segmentado de la cañería.

Características del modelo

El análisis considera la aceleración horizontal y vertical simultáneamente. Se realizan distintas variaciones en el largo de la cañería con la finalidad de encontrar a que largo los resultados de la reacción en la guía y el desplazamiento máximo se estabilizan, junto con analizar a que largo de separación entre guías es válido el modelo de un grado de libertad. Para esto, se deben agregar una mayor cantidad de nodos, siendo la distancia entre ellos siempre igual a 10 metros, cada uno de estos nodos equivale al modelo de un grado de libertad anterior, sólo que en este modelo se encuentran conectados con una barra y sus propiedades de elasticidad corresponden a la cañería. El parámetro "y" corresponde al desplazamiento máximo y R es la reacción en la guía, como se muestra en la figura 4.23.

No es necesario representar la no linealidad del material de la cañería, ya que como se muestra más adelante no existen incursiones inelásticas en ésta.

Se recuerda que los registros que se utilizan corresponden a Lolloe, Concepción, Constitución y Angol, lo cuales se muestran en la figura 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18, respectivamente.

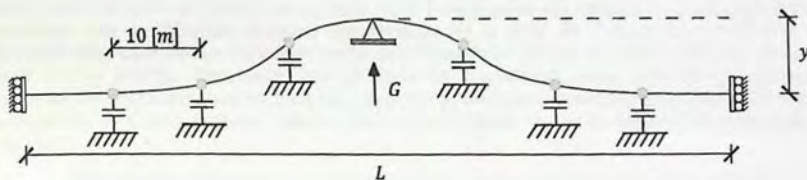


Figura 4.23 – Esquematación del modelo de varios grados de libertad.

Resultados del análisis del modelo de varios grados de libertad

Cuando la cañería es corta, no se comporta como un sistema flexible es más bien un sistema rígido y se puede calcular la frecuencia de vibración si se desprecia el efecto del roce en comparación a la fuerza restitutiva de la propia cañería. Es por esta razón que en sistemas con guías estrechamente distanciadas existe una amplificación dinámica, donde el período natural de la cañería se acerca al rango de los períodos de amplificación dinámica que se observa en los espectros de respuesta. Esto provoca un aumento en los desplazamientos y en la reacción del soporte. Para conocer a que distancia entre guías dicho fenómeno se encuentra presente se analiza el comportamiento de la cañería para distancias entre guías desde los 20 a 350 metros.

Cabe indicar que se habla de período o frecuencia, ya que en tramos cortos entre guías la fuerza de restitución elástica de la cañería tiene mayor relevancia en la dinámica y se puede despreciar el efecto del roce por ser una fuerza no lineal, de lo contrario no se puede obtener un período natural constante e invariable de la cañería.

Desplazamiento

Se grafica el desplazamientos máximo en el extremo de la cañería para distintas distancias entre soportes, como se muestra en la figura 4.24. Para el caso del registro de Lolloe y Angol no presentan una amplificación dinámica considerable, en el caso de Concepción se observa un aumento progresivo de sus desplazamientos estabilizándose cuando la cañería presenta un largo igual a 100 metros. Finalmente para el caso de Constitución que presenta los mayores desplazamientos en comparación a los demás registros, se observa una clara amplificación dinámica alcanzando un desplazamiento cercano a los 16 [cm] cuando tienen un largo entre guías igual a 100 [m].

Se observa que a partir de una distancia entre guías sobre los 150 [m] se estabilizan los desplazamientos de la cañería para todos los registros, cuyo valor en el extremo de la cañería tiende al desplazamiento máximo del modelo de un grado de libertad. Cabe destacar que las longitudes entre guías para estos tipo de proyectos son a lo menos de 200 a 500 metros. Esto le da validez al modelo de un grado de libertad para distancia entre soportes mayores a los 150 metros, para evaluar el desplazamiento sísmico para cualquier configuración de soportes o bien para sistema sin soportes visto en el capítulo 3 de análisis de flexibilidad.

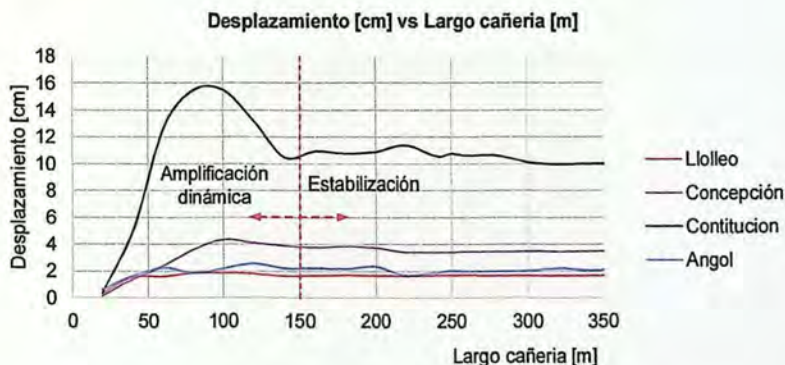


Figura 4.24 - Resumen de los desplazamientos en función del largo de la cañería.

Reacción en la guía

Se puede observar de la figura 4.25 correspondiente a la reacción de la guía en relación al largo de cañería entre soportes tipo guía, que para el caso del registro de Lolloe y Angol presentan una amplificación dinámica a los 60 [m], para el caso de Concepción no se observa una amplificación dinámica para los largos considerados. Finalmente el caso de Constitución presenta las mayores reacciones en comparación a los demás registros, donde su mayor reacción ocurre cuando el largo entre guías es igual a 40 [m] cuyo valor es igual a 30 [tonf].

Se observa que a partir de una distancia entre guías sobre los 150 [m] se estabilizan las reacciones en la guía para todos los registros. Se puede decir con este gráfico que la longitud tributaria a la reacción de una guía es aproximadamente 150 [m].

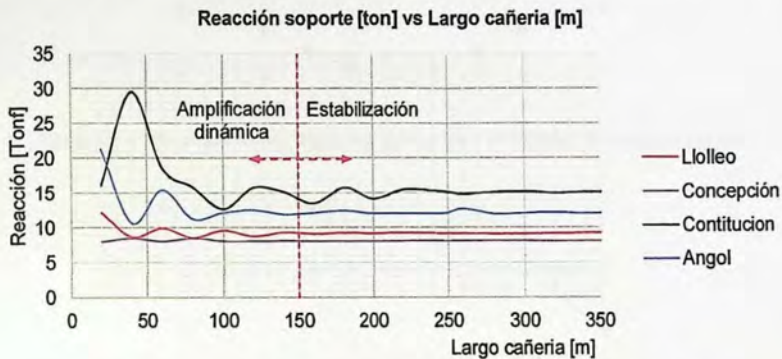


Figura 4.25 – Resumen de la reacción de la guía en función del largo de la cañería.

Amplificación dinámica en tramos cortos

La cañería, al igual que todas las estructuras, posee distintas formas de vibrar ante sollicitaciones dinámicas, las cuales pueden afectar en mayor o menor medida los desplazamientos, reacciones y esfuerzos. Esto se da en tramos cortos entre guías menor a 150 [m].

Las formas modales observadas en las deformaciones del análisis no lineal tiempo historia (ANTH) corresponden principalmente al modo 1 y al modo 2. Esto se puede observar también en la envolvente del diagrama de momento mostrada en la figura 4.30. Por lo cual, se muestra un ejemplo del primer y el segundo modo de vibrar de la cañería obtenidos de un análisis modal en las figuras 4.26 y 4.27, respectivamente.



Figura 4.26 – Vista en planta del primer modo de vibrar para un largo de cañería igual a 100 [m].



Figura 4.27 – Vista en planta del segundo modo de vibrar para un largo de cañería igual a 100 [m].

Para evaluar cuáles son los largos entre soportes que presentan amplificación dinámica y su modo de vibrar asociado, se realiza un análisis modal para encontrar el período natural en función del largo entre guías, ver gráficos de la figura 4.29. Esto con la finalidad de comparar en que largos entre soportes su período se acerca a los períodos con mayores pseudo-aceleraciones de los espectros de respuestas con una razón de amortiguamiento del 0,02 correspondiente para sistemas de cañerías estipulado en la tabla 5.5 de la NCh2369. De esta forma se pueden marcar los límites inferiores del largo entre soportes que se independizan de una amplificación dinámica importante, además de establecer el modo de vibrar asociado.

Durante el análisis no lineal tiempo historia, se detecta que la forma del segundo modo de vibrar tiene mayor influencia en la amplificación dinámica, en la figura 4.28 se muestra un deslizamiento importante producto de dicho comportamiento. Además, la amplificación dinámica ocurre en tramos cortos entre soportes tipo guías, que es donde el concepto de frecuencia natural tiene validez.

En la figura 4.29, se destaca en color la zona donde existe amplificación dinámica espectral, que ocurre durante los períodos menores a un segundo. Esta zona de amplificación se lleva a los gráficos de períodos en función del largo entre soportes, lo cual permite conocer los límites inferiores donde existe influencia de amplificación dinámica. Para el primer modo vibrar este fenómeno afecta a largos menores a 50 [m] y en el caso del segundo modo de vibrar su influencia afecta a tramos menores a 150 [m]. Finalmente el segundo modo evidencia una mayor participación.



Figura 4.28 – Deformación instantánea de la cañería para un largo entre guías igual a 250 [m].

No obstante, la separación usual entre guías para este tipos de proyecto es del orden de 200 [m] a 500 [m] y en consecuencia al considerar mayores distancias entre guías las frecuencias natural tiende a disminuir independizándose del efecto de amplificación dinámica.

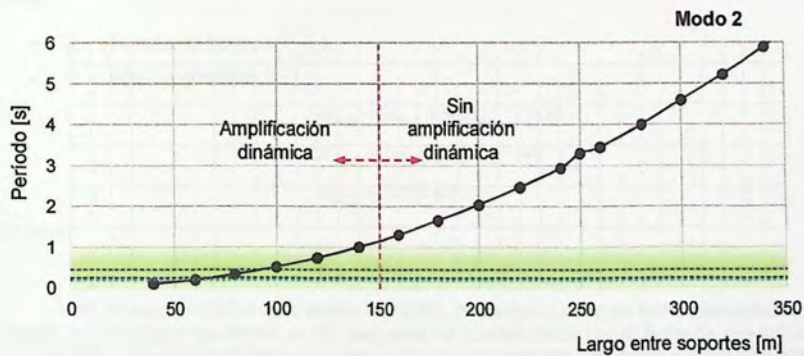
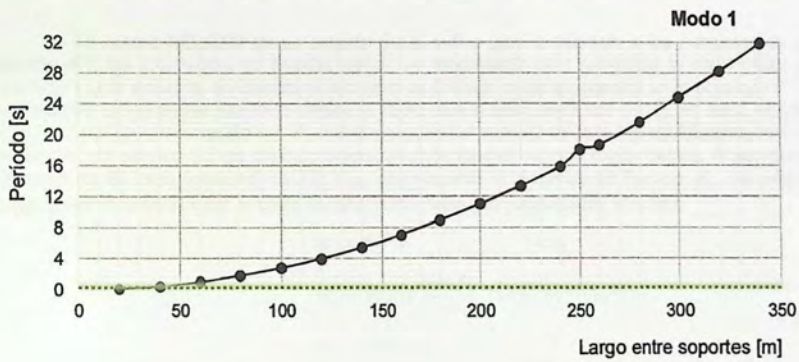
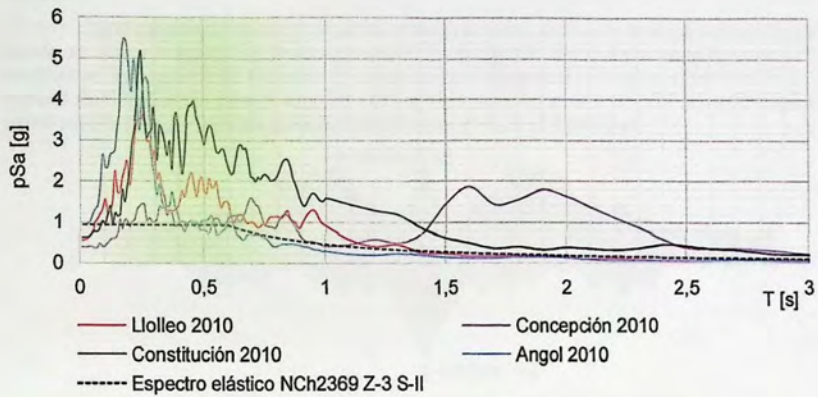


Figura 4.29 – Comparación de periodos del espectro de respuesta con los largo de la cañería.

Esfuerzos

De la sollicitación sísmica no existen esfuerzos axiales, se tiene sólo el esfuerzo de flexión, donde su mayor magnitud se encuentra situado en el soporte. Se muestra en la figura 4.30 la envolvente del diagrama de momento de mayor sollicitación producto del sismo correspondiente al registro de Constitución para el largo de 250 [m], cuyo valor es igual a 60 [tonf m]. Este largo se utiliza para la configuración de guías equidistantes del análisis de flexibilidad.

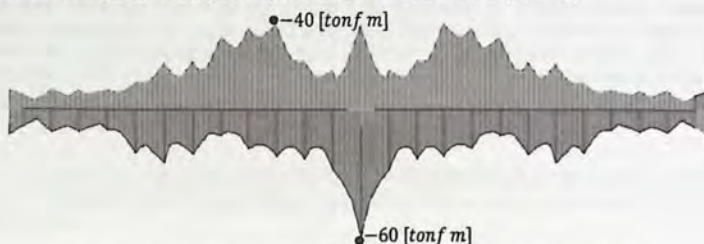


Figura 4.30 – Diagrama de momento para largo de cañería igual a 250 [m].

La norma NCh2369 en su sección 5.2.3, indica que de acuerdo a los principios de su sección 4.1, las incursiones no lineales deben ser moderadas para garantizar la continuidad de operación de la industria. Se calcula el momento de fluencia como se muestra en la ecuación 4.5 y se compara con el mayor momento debido al sismo más el caso sostenido (SUS), es decir, el caso ocasional (OCC), ver ecuación 4.6. El cual corresponde al sistema de cañerías equidistante zona A, ver figura 3.17 sección 3.5 del capítulo 3 del análisis de flexibilidad para mayor detalle. Al ser menor el momento del caso ocasional (OCC) M_{OCC} con respecto al momento de fluencia M_y , no existen incursiones no lineales y por lo tanto la cañería mantiene sus propiedades elásticas.

$$M_y = F_y \cdot w \quad (4.5)$$

$$M_y = 47000 \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \right] \cdot (14,6 \cdot 10^{-3}) [\text{m}^3]$$

$$M_y = 686 [\text{tonf} \cdot \text{m}]$$

Dónde:

- F_y : Tensión de fluencia $\left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \right]$.
- w : Módulo resistente $[\text{m}^3]$.

$$M_{OCC} = M_{SUS} + M_{Sismo} \quad (4.6)$$

$$M_{OCC} = 100 + 69 [\text{tonf} \cdot \text{m}]$$

$$M_{OCC} = 169 [\text{tonf} \cdot \text{m}]$$

Se tiene:

$$M_{OCC} \leq M_y$$

En la sección 5.8.2.4 de la norma NCh2360, indica que cuando no existen incursiones no lineales los esfuerzos resultantes en los elementos se pueden dividir por el factor de reducción R indicado en la tabla 5.6 de dicha norma. Para este caso, corresponde a un factor $R = 5$ y sólo aplica para los esfuerzos producto de la acción sísmica. Cabe mencionar, que los desplazamientos no deben ser reducidos, en consecuencia su magnitud son los obtenidos directamente del análisis.

4.3 Resultados del análisis sísmico para la combinación de carga caso ocasional (OCC) de acuerdo al código ASMEB31.11.

La NCh2369 en su sección 5.8.2 establece que cuando se usen tres registros diferentes, se adoptarán para el diseño los valores máximos del parámetro de interés, obtenidos de aplicar cada uno de ellos. Para este caso, los parámetros más relevantes de desplazamiento, reacciones y esfuerzos corresponden al registro de Constitución. Estos valores se suman al caso de carga sostenida (SUS) para obtener el caso de carga ocasional (OCC) como se muestra en la ecuación 4.7, para mayor detalle ver sección 3.1.2. Este se compara con las otras combinaciones de cargas obtenidas del capítulo 3 de análisis de flexibilidad.

$$OCC = SUS + Sismo \quad (4.7)$$

Se muestra la comparación de todas las combinaciones de carga para los sistemas de línea de cañería con guías equidistantes y con junta de expansión en la sección 4.3.1 y 4.3.2, respectivamente.

4.3.1 Sistema de cañería con guías equidistantes

Se muestra el sistema de cañería con guías equidistantes en la figura 4.31, indicando las zonas de interés para obtener los parámetros de desplazamientos, esfuerzos y reacciones producto del sismo. Estas son sumadas al caso sostenido (SUS) y de esta manera obtener el caso de carga ocasional (OCC) solicitado por el código ASME B.31.11.

Los soportes con mayor magnitud son los indicados por G1 y G3. Cabe indicar que la guía G1 de la zona A corresponde a un soporte adicional, el cual presenta un largo entre guías igual a 80 [m]. El resto de las guías se encuentran equidistantes a 250 [m].

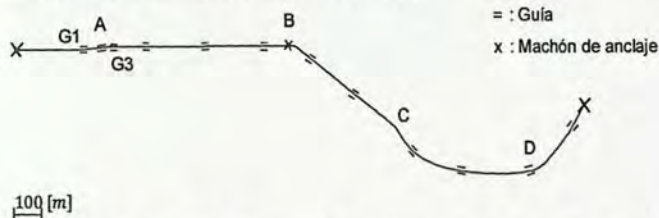


Figura 4.31 – Ubicación de las zonas de los esfuerzos y desplazamientos relevantes, cañería con guías equidistantes.

Desplazamiento

Se comenta anteriormente que el desplazamiento sísmico se estabiliza después de los 150 [m] de largo entre soportes, con un valor igual a 11 [cm]. Sin embargo, existe una excepción en la zona A puesto que se tiene un largo de cañería entre guía igual a 80 [m], donde su desplazamiento se encuentra dentro del rango de amplificación dinámica y corresponde a 15 [cm]. Se muestra en la tabla 4.4 el resumen de los desplazamientos más relevantes de las zonas señaladas en la figura 4.31.

Tabla 4.4 – Desplazamientos de la cañería con guías equidistantes, caso ocasional (OCC).

DESPLAZAMIENTOS [cm]			
Zona	SUS	SISMO	OCC
A	9	15	24
B	9	11	20
C	16	11	27
D	15	11	26

Finalmente la combinación de carga que controla los desplazamientos del sistema de cañería corresponde al caso de carga operacional (OPE) como se muestra en la tabla 4.5. A pesar del efecto sísmico el cual corresponde al caso ocasional (OCC) su aporte no fue tan significativo como se esperaba para este caso.

Tabla 4.5 – Desplazamientos máximos para cañería con guías equidistantes.

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS [cm]				
Caso	$d_{máx}$	$d_{criterio}$	Condición	Obs.
SUS	16	45	Cumple	
EXP	16	45	Cumple	
OPE	44	45	Cumple	Controla
OCC	27	45	Cumple	
HYD	17	45	Cumple	

Esfuerzos

Cabe señalar, que los únicos esfuerzos debido al sismo de acuerdo a las características de este modelo, el cual busca rescatar las características físicas esenciales del problema. Estos esfuerzos corresponden a flexión, los cuales se presentan en la tabla 4.6 ya reducidos por el factor de reducción R igual a 5 indicado para un sistema de cañerías en la tabla 5.6 de la norma NCh2369, como se muestra en la ecuación 4.7. La guía en la zona A como se menciona anteriormente presenta un largo entre guías igual a 80 [m], por lo cual se encuentra en la zona de amplificación dinámica y en consecuencia su momento es de 70 [tonf m]. Para el caso entre guías con largo igual a 250 [m] corresponde un momento de 60 [tonf m]. Puesto que el caso ocasional (OCC) proviene de la suma del caso sostenido (SUS) con la acción del sismo, se determina no presentar los esfuerzos axiales correspondientes sólo al caso sostenido (SUS).

$$M_{sismo} = \frac{\text{Valor de momento}}{\text{Factor de reducción } R} \quad (4.7)$$

$$M_{sismo} = \frac{60}{5} = 12 \text{ [tonf m]}$$

Tabla 4.6 - Esfuerzos de momento de la cañería con guías equidistantes, caso ocasional (OCC).

Zona	FLEXIÓN [ton m]		
	SUS	SISMO	OCC
A	-100	-14	-114
B	-45	-12	-57
C	-89	-12	-101
D	-83	-12	-95

Reacciones

Las reacciones del soporte tipo guía son reducidas por el factor de reducción R igual a 5 indicado para un sistema de cañerías en la tabla 5.6 de la norma NCh2369, como se muestra en la ecuación 4.6.

La reacción debido a la acción sísmica corresponde sólo para el soporte tipo guía, ya que su principal función es oponerse al movimiento transversal de la cañería, debido a la flexibilidad transversal puesto que presenta una longitud mucho mayor que su ancho. Al contrario del machón de anclaje cuyo principal funcionamiento es controlar la cañería de forma longitudinal, dirección que no se considera en el modelo, razón por la cual no se incluye en la tabla 4.7 de reacciones. Además la mayor fuerza debido a la presión y temperatura correspondiente al caso operacional (OPE) es aproximadamente 500 [tonf] para el soporte tipo machón, lo cual es mucho mayor respecto a la acción sísmica (aproximadamente 15 [tonf]).

La reacción de la guía se estabiliza después de los 150 [m] con un valor igual a 15 [tonf]. No obstante, la excepción en la zona A, donde su reacción se encuentra dentro del rango de amplificación dinámica no difiere significativamente, por lo cual se mantiene el valor de 15 [tonf]. Se muestra en la tabla 4.7 el resumen de las guías más relevantes señaladas por zonas en la figura 4.31.

$$Reacción_{guía} = \frac{\text{Valor de reacción}}{\text{Factor de reducción } R} \quad (4.6)$$

$$R_{guía} = \frac{15}{5} = 3 \text{ [tonf]}$$

Tabla 4.7 – Reacciones de guías del sistema con guías equidistantes, caso ocasional (OCC).

REACCIONES (RESULTANTES) [tonf]			
Reacción	SUS	SISMO	OCC
G1 (guía)	19	3	22
G3 (guía)	11	3	14

Finalmente la combinación de carga que controla la máxima reacción en la guía del sistema de cañería corresponde al caso de carga operacional (OPE) como se muestra en la tabla 4.8. A pesar la acción sísmica el cual corresponde al caso ocasional (OCC) su aporte no fue tan significativo como se esperaba, ya que su magnitud al ser tan pequeña sólo controla a las guías donde la reacción obtenida de las demás combinaciones era prácticamente nula. El resumen de las reacciones para todas las guías se encuentran en la tabla 5.2.

Tabla 4.8 – Reacciones de guías del sistema con guías equidistantes.

REACCIONES (RESULTANTES) [tonf]						
Nodo	SUS	EXP	OPE	OCC	HYD	Controla
G1 (guía)	19	19	37	22	21	OPE
G3 (guía)	11	11	27	14	12	OPE

Tensiones de trabajo

Sumando la reacción, desplazamiento y el esfuerzo debido a la acción sísmica a los valores obtenidos en el caso sostenido (SUS), es posible completar el caso ocasional (OCC) a la tabla de tensiones para cumplir con todas las combinaciones de carga entregada por el código ASMEB31.11.

La combinación de los esfuerzos que generan las mayores tensiones, se encuentran ubicados en la zona A de la figura 4.31 al comienzo del tramo de cañería, al igual que el resto de los casos de carga del análisis en el capítulo 3.

Finalmente la combinación de carga que controla las tensiones del sistema de cañería corresponde al caso de carga operacional (OPE) como se muestra en la tabla 4.9. A pesar del efecto sísmico el cual corresponde al caso ocasional (OCC) su aporte no fue tan significativo como se esperaba para este caso.

Tabla 4.9 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con lazos de expansión.

TENSIONES [kgf/cm^2]										
Combinación de carga	σ_l	σ_t	$\tau_{m\acute{a}x}$	σ_{tadm}	σ_{tadm}	τ_{adm}	Obs.	$\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{adm}$	Condición	Obs.
SUS	230	2466	1118		3656	2057		0,54	Cumple	
EXP	-1036	0	518	3290		2057	$\sigma_s = \Delta\sigma_s$	0,25	Cumple	
OPE	-1554	2466	2010	2468		2057		0,98	Cumple	Controla
OCC	134	2466	1166	4022		2057		0,57	Cumple	
HYD	217	2713	1248		4113	2057		0,61	Cumple	

4.3.2 Sistema de cañería con juntas de expansión

Para esta configuración del sistema de línea de cañería de un largo igual a 2520 [m] y al no presentar soportes se comporta como un sistema muy flexible. En consecuencia no existen esfuerzos sísmicos, ni reacciones. Con esta condición el caso ocasional (OCC) corresponde al caso sostenido (SUS). No obstante, el efecto de la acción sísmica genera un desplazamiento el cual se suma con el caso de carga sostenido (SUS) para obtener el caso ocasional (OCC). Se muestra el sistema de línea de cañería con juntas de expansión en la figura 4.32, indicando las zonas relevantes de desplazamientos.

No se muestran los esfuerzos de momento y axial, puesto que no existe una variación producto de la acción sísmica. En consecuencia las tensiones de trabajo del caso de carga ocasional (OCC) corresponden al del caso de carga sostenido (SUS), visto en el capítulo 3 sección 3.6.

Se remarca, que para este tipo de configuración lo único que se suma de la acción sísmica es el desplazamiento, siendo igual para toda la cañería. No obstante en el caso sostenido (SUS) su desplazamiento puede variar de acuerdo a la zona.

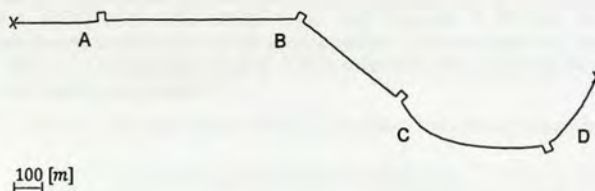


Figura 4.32 – Ubicación de las zonas de desplazamientos relevantes para la cañería con juntas de expansión.

Desplazamiento

El desplazamiento máximo producto de la acción sísmica visto en la sección 4.2.2 corresponde a 11 [cm], siendo el desplazamiento de diseño. Se indica en la tabla 4.10 el resumen de los desplazamientos más relevantes señalados para las zonas indicadas en la figura 4.33, ya que en esas zonas existen los mayores desplazamientos del caso sostenido (SUS), recordando que el sismo afecta a toda la línea de cañería.

Tabla 4.10 – Desplazamientos de la cañería con lazos de expansión.

DESPLAZAMIENTOS [cm]			
Zona	SUS	SISMO	OCC
A	4	11	15
B	5	11	16
C	4	11	15
D	4	11	15

Se puede notar que los desplazamientos son controlados por la combinación de carga del caso ocasional (OCC) para esta configuración, que equivale a 16 [cm]. Sin embargo, el desplazamiento correspondiente al caso de carga operativo (OPE) es igual a 13 [cm] donde no se aprecia gran diferencia considerando que el criterio adoptado como límite de desplazamiento es 45 cm, como se muestra en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 – Desplazamientos máximos para cañería con juntas de expansión.

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS [cm]				
Caso	$d_{m\acute{a}x}$	$d_{criterio}$	Condición	Obs.
SUS	5	45	Cumple	
EXP	6	45	Cumple	
OPE	13	45	Cumple	
OCC	16	45	Cumple	Controla
HYD	6	45	Cumple	

Tensiones de trabajo

Se muestran en la tabla 4.12 todas las combinaciones de cargas restantes para comparar las tensiones y conocer cual controla el diseño. La combinación de carga que controla el sistema de cañería con juntas de expansión sigue siendo al caso de carga operacional (OPE), las cuales son muy similares al caso ocasional (OCC). Para todos los casos de combinaciones de carga las tensiones admisibles impuestas por el código ASME B31.11 cumplen.

Tabla 4.12 - Comparación de tensiones para cada combinación de carga de la cañería con lazos de expansión.

TENSIONES [kgf/cm^2]											
Combinación de carga	σ_t	σ_r	$\tau_{m\acute{a}x}$	σ_{Ladm}	$\sigma_{\tau adm}$	τ_{adm}	Obs.	$\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{adm}$	Condición	Obs.	
SUS	882	2466	792		3656	2057		0,39	Cumple		
EXP	-359	0	178	3290		2057	$\sigma_t = \Delta\sigma_t$	0,09	Cumple		
OPE	805	2466	831	2468		2057		0,40	Cumple	Controla	
OCC	882	2466	792	4022		2057		0,39	Cumple		
HYD	986	2713	864		4113	2057		0,42	Cumple		

5 Cálculo de soportes

Los soportes para este tipo de proyectos suelen ser de hormigón armado por el peso requerido y porque se encuentran bajo tierra o a ras de ella como es el caso del machón de anclaje y las guías respectivamente. Estos transmiten los esfuerzos de la cañería obtenidos en el análisis al suelo con la finalidad de controlar, limitar o guiar la cañería materializando las condiciones de restricciones consideradas en el análisis de flexibilidad.

El cálculo de estabilidad de las guías y machones de anclajes son distintos, debido al mecanismo resistente que se utiliza para desarrollar la estabilidad en cada uno. La guía se trabaja como una fundación superficial donde la estabilidad a cargas laterales se desarrolla con el mismo peso del elemento. El machón de anclaje por otro lado se encuentra enterrado y obtiene su estabilidad a fuerzas longitudinales por medio de la cuña pasiva principalmente.

Las variables a utilizar para realizar los cálculos, además de los criterios utilizados de estabilidad son las propiedades del suelo. Estos parámetros se obtienen de un estudio de mecánica de suelo cercano a la ubicación del proyecto, los cuales se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 – Propiedades del suelo.

Propiedades	Valor
Peso específico del suelo (γ_s)	1,8 [tonf/m ³]
Tensión admisible del suelo (q_{adm})	20 [tonf/m ²]
Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ)	35°

El factor de seguridad es el cociente entre la capacidad máxima calculada que soporta un sistema y la demanda a la cual es sometido. Para este caso, se considera un factor de seguridad igual a 1,2 tanto para el criterio de deslizamiento o volcamiento de elemento, esta información es referenciada del Manual de Carretera Volumen N°3. Además, corresponde a un valor comúnmente utilizado en este tipo de proyectos para el cálculo de soportes.

5.1 Cálculo de guías

Dado que el soporte tipo guía presenta una baja profundidad, se desprecia el empuje pasivo y activo producto de las cuñas que se generan al ocurrir un desplazamiento horizontal. Por lo tanto, su cálculo de diseño corresponde al de una fundación superficial. Donde la fuerza resistente se obtiene utilizando su propio peso, como se puede apreciar en la figura 5.1 (b).

Lo que sobresale del bloque de hormigón para sujetar la cañería transversalmente, pueden ser perfiles metálicos empotrados los cuales transmiten las fuerzas de la cañería a una sección importante de hormigón logrando guiar las deformaciones. Entre estos perfiles y la cañería se deja una pequeña separación por lo general de $\frac{1}{2}$ " por lado con el fin de permitir el movimiento longitudinal, como se puede apreciar en la figura 5.1.

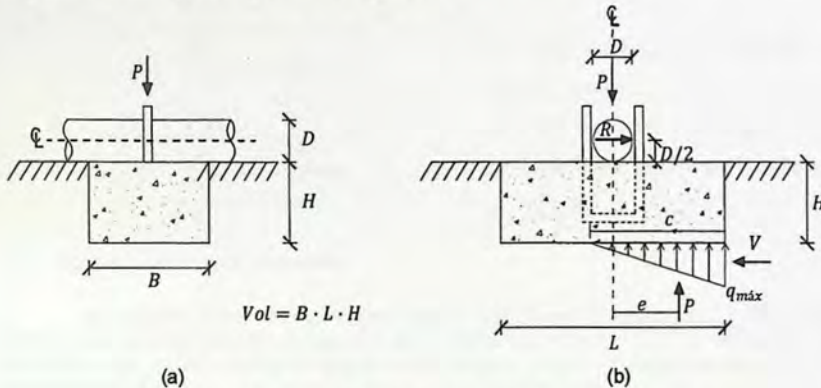


Figura 5.1 - a) Vista lateral de la guía b) DCL sentido transversal de la guía.

Dónde:

- c : Zona comprimida [m].
- e : Excentricidad de la resultante [m].
- R : Carga lateral ejercida por la cañería [tonf].
- P : Peso del bloque de hormigón más el peso de la cañería sobre él [tonf].
- $q_{m\acute{a}x}$: Tensión máxima en el suelo [tonf/m²].
- Vol : Volumen de hormigón [m³].

5.1.1 Mecanismos de falla

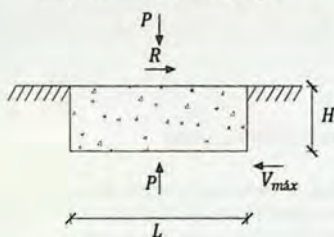
Para el cálculo de diseño del soporte tipo guía se debe verificar la estabilidad frente a tres mecanismos de falla:

- Deslizamiento
- Volcamiento
- Tensión máxima del suelo

Estabilidad al deslizamiento en guías

Para analizar el cálculo de estabilidad al deslizamiento se comparan las fuerzas laterales producto de la carga lateral ejercida por la cañería (R) con las fuerzas resistentes provenientes del roce entre el suelo y el bloque de hormigón ($V_{máx}$). En la figura 5.2 se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL), donde se pueden apreciar las fuerzas involucradas ante dicho efecto. Se realiza un cociente entre dichas fuerzas y se obtiene un factor de seguridad al deslizamiento (FS_d) que debe ser mayor o igual a 1,2. Cabe indicar que en este caso, como se trata de un suelo arenoso en contacto con hormigón se utiliza el ángulo de roce suelo-hormigón (δ) igual al ángulo de fricción interna del suelo (ϕ), referenciado de la tabla 11.6 del libro *Bowles, Joseph E. "Foundation Analysis and Design"* [5].

Las ecuaciones son las siguientes:



$$V_{máx} = (\gamma_n \cdot Vol + P_{cañería} \cdot B) \cdot \tan(\phi)$$

$$V_{máx} = P \cdot \tan(\phi)$$

γ_n = Peso específico del hormigón

R = Carga lateral ejercida por la cañería

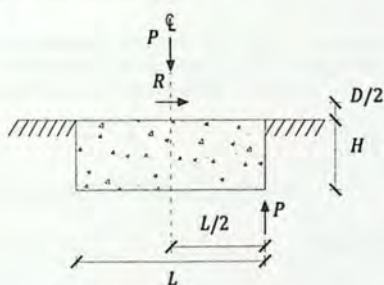
$$FS_d = \frac{V_{máx}}{R} \quad (5.1)$$

Figura 5.2 – DCL fuerzas horizontales.

Se recuerda, que el peso correspondiente por metro lineal de cañería ($P_{cañería}$) considera el peso propio del elemento más el peso del fluido obteniéndose un total de 1,1 [tonf/m]. El caso de la cañería vacía no tiene sentido porque no existe presión y el caso de carga que controla es el operacional (OPE).

Estabilidad al volcamiento en guías

La estabilidad al volcamiento consiste en verificar que el peso por el máximo brazo de palanca correspondiente a $L/2$ ($M_{máx}$), supere al momento volcante ($M_{volcante}$) producto de la reacción de la guía por su distancia desde el punto de giro al punto de aplicación de dicha fuerza correspondiente a $H + D/2$, respetando el factor de seguridad adoptado (FS_v) ya mencionado anteriormente. En la figura 5.3 se puede apreciar el diagrama de cuerpo libre (DCL) y se obtiene las siguientes ecuaciones:



$$M_{máx} = P \cdot \left(\frac{L}{2}\right)$$

$$M_{volcante} = R \cdot \left(H + \frac{D}{2}\right)$$

$$FS_v = \frac{M_{máx}}{M_{volcante}} \quad (5.2)$$

Figura 5.3 – DCL fuerzas verticales.

Tensión máxima en el suelo

Para verificar si el suelo es capaz de soportar los esfuerzos de la guía, se debe calcular la tensión máxima del suelo ($q_{m\acute{a}x}$) y compararla con su tensión admisible (q_{adm}), la cual no se debe superar. Para esto se calcula la excentricidad (e) del bloque de hormigón y poder calcular el porcentaje de la zona en compresión. En la figura 5.4 se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL) donde se indican las fuerzas y distancias a considerar.

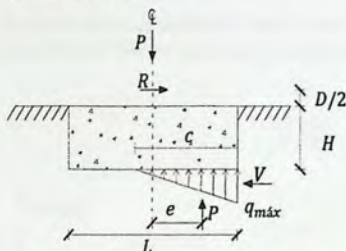


Figura 5.4 – Diagrama cuerpo libre sentido transversal.

Para este sistema casi siempre queda levantada una parte de la fundación, puesto que se diseña al límite por lo cual siempre existe una sección que no se encuentra comprimida. Esto ocurre en todos los casos de las guías. El cálculo de la excentricidad se puede realizar utilizando la ecuación 5.3, la cual proviene de un equilibrio de fuerzas obtenida del diagrama de cuerpo libre (DCL) de la figura 5.4, se tiene:

$$Pe = R \left(H + \frac{D}{2} \right)$$

$$e = \frac{R}{P} \left(H + \frac{D}{2} \right) \quad (5.3)$$

Una vez despejada la excentricidad se puede relacionar por medio del centroide de un triángulo con la finalidad de obtener la zona comprimida c :

$$\frac{1}{3}c + e = \frac{L}{2}$$

$$\frac{1}{3}c = \frac{L}{2} - e$$

$$c = 3 \left(\frac{L}{2} - e \right) \quad (5.4)$$

Se realiza un equilibrio de fuerzas entre el peso total del soporte y las tensiones en el suelo. Considerando la distribución triangular de estas tensiones junto a la zona comprimida y al ancho de la guía, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{(q_{m\acute{a}x} \cdot c \cdot B)}{2} = P \quad (5.5)$$

Al despejar la variable $q_{m\acute{a}x}$, se tiene:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{2P}{c \cdot B} \quad (5.6)$$

5.1.2 Dimensionamiento para la guía más solicitada

Se muestra el cálculo para la guía más solicitada vista en el análisis de flexibilidad, la cual corresponde a la guía G1 de la configuración con guías equidistantes del sistema de línea de cañería y bajo la combinación de carga operacional (OPE) cuyo valor de reacción resultante lateral debido a la cañería es igual a 37 [tonf], ver la tabla 3.9 para mayor detalle.

Las dimensiones propuestas que se muestran en la figura 5.5 son las que entregan un volumen óptimo, es decir, el menor volumen posible para cumplir con todos los criterios de estabilidad.

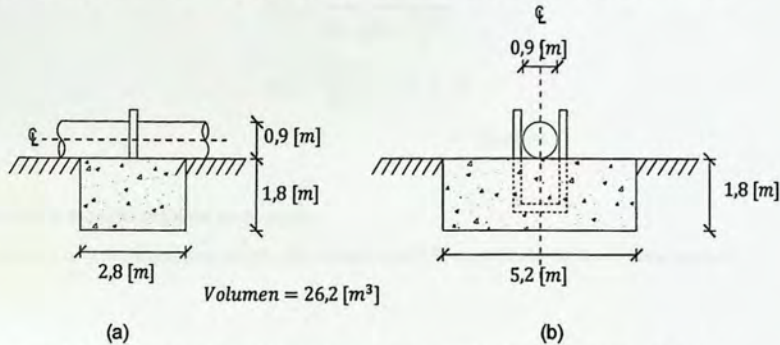


Figura 5.5 – Dimensionamiento a) Vista lateral de la guía b) Vista frontal del soporte tipo guía.

Cálculo de la estabilidad al deslizamiento

Para obtener la estabilidad al deslizamiento se utiliza la ecuación 5.1, donde el volumen (Vol) de la guía se muestra en la figura 5.5, reemplazando los valores se tiene:

$$FS_d = \frac{V_{máx}}{R}$$

$$FS_d = \frac{P \cdot tg(\phi)}{R}$$

$$FS_d = \frac{(\gamma_n \cdot Vol + P_{cañería} \cdot B) \cdot tg(\phi)}{R}$$

$$FS_d = \frac{(2,4 \cdot 26,2 + 1,1 \cdot 2,8) \cdot tg(35^\circ)}{R}$$

$$FS_d = \frac{66 \cdot tg(35^\circ)}{37}$$

$$FS_d = \frac{46}{37} = 1,2 \geq 1,2$$

Cumple.

Cálculo de la estabilidad al volcamiento

Los parámetros a utilizar se obtienen de la figura 5.3 y reemplazando los valores en la ecuación 5.2 se tiene:

$$FS_v = \frac{P \cdot \left(\frac{L}{2}\right)}{R \cdot \left(H + \frac{D}{2}\right)}$$

$$FS_v = \frac{66 \cdot \left(\frac{5,2}{2}\right)}{37 \cdot \left(1,8 + \frac{0,9}{2}\right)}$$

$$FS_v = \frac{171,6}{83,3} = 2,1 \geq 1,2$$

Cumple.

Cálculo de la tensión máxima en el suelo

Para obtener la excentricidad se utilizan las ecuaciones 5.3, reemplazando los valores se tiene:

$$e = \frac{R}{P} \left(H + \frac{D}{2}\right)$$

$$e = \frac{37}{66} \left(1,8 + \frac{0,9}{2}\right)$$

$$e = 1,26 \text{ [m]}$$

Reemplazando la excentricidad en la ecuación 5.4, se tiene la zona comprimida:

$$c = 3 \left(\frac{L}{2} - e\right)$$

$$c = 3 \left(\frac{5,2}{2} - 1,26\right)$$

$$c = 3 \left(\frac{5,2}{2} - 1,26\right)$$

$$c = 4 \text{ [m]}$$

La tensión admisible del suelo (q_{adm}) corresponde a $20 \text{ [tonf/m}^2\text{]}$ ver tabla 5.1, la cual debe ser mayor a la tensión generada por el soporte ($q_{máx}$) y reemplazando en la ecuación 5.6, se tiene:

$$q_{máx} = \frac{2P}{c \cdot B}$$

$$q_{máx} = \frac{2 \cdot 66}{4 \cdot 2,8}$$

$$q_{máx} = \frac{132}{11,2} = 12 < q_{adm} = 20 \text{ [tonf/m}^2\text{]}$$

Cumple.

Se puede notar de los resultados, que el soporte tipo guía queda controlado por la estabilidad al deslizamiento, ya que corresponde al valor más cercano al límite del factor de seguridad. Por lo tanto, se puede calcular directamente el volumen mínimo de hormigón a utilizar despejando su valor de la ecuación 5.1 y reemplazando el valor de la reacción (R) para cada soporte tipo guía. Cabe indicar que no se considera el peso de la cañería puesto que depende del ancho del bloque de hormigón (B) y al ser una variable dependiente del volumen, el cálculo no sería tan directo. No obstante, es más conservador y puede ser una buena aproximación para el cálculo del volumen necesario para evitar el deslizamiento. En consecuencia la ecuación 5.1 se reduce a:

$$FS_d = \frac{V_{m\acute{a}x}}{R}$$

$$V_{m\acute{a}x} = FS_d \cdot R$$

$$(\gamma_h \cdot Vol) \cdot \tan(\phi) = FS_d \cdot R$$

$$(\gamma_h \cdot Vol) = FS_d \cdot \frac{R}{\tan(\phi)}$$

$$Vol = \frac{1}{\gamma_h} \left(FS_d \cdot \frac{R}{\tan(\phi)} \right)$$

En la tabla 5.2 se resumen los volúmenes de hormigón utilizados para todas las guías de la configuración de guías equidistantes propuesta en el capítulo 3. Se pueden apreciar los valores de cada volumen necesario para evitar su deslizamiento junto a la reacción de acuerdo a su combinación de carga indicando cual controla, puesto que se debe utilizar el mayor valor de acuerdo al código ASME B.31.11. Se puede observar de dicha tabla que todos los soportes pueden ser transportados por medio de un camión puesto que su peso es menor a 52 [tonf] a excepción de la guía más solicitada (G1), ver sección 2.4 para mayor detalle.

En la figura 5.6 se muestra la ubicación de todos los soportes para la configuración de guías equidistantes del sistema de línea de cañería.

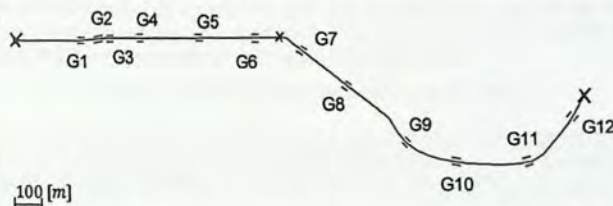


Figura 5.6 – Ubicación de todos los soportes para la configuración de guías equidistantes.

Se recuerda que el volumen del soporte que se muestra en la tabla 5.2, no considera el peso de la cañería. Por dicha condición existe una pequeña diferencia de volumen por ejemplo en la guía G1 calculada anteriormente.

Tabla 5.2 - Reacciones de todos los soportes del sistema de cañería con guía equidistantes.

Nodo	REACCIONES [tonf]							Volumen [m3]	Peso [tonf]	Transportable
	SUS	EXP	OPE	OCC	HYD	Controla	Máximo			
G1 (guía)	19	19	37	22	21	OPE	37	26,4	63	No
G2 (guía)	4	4	17	7	5	OPE	17	12,4	30	Sí
G3 (guía)	11	11	27	14	12	OPE	27	19,3	46	Sí
G4 (guía)	0	0	1	3	0	OCC	3	2,1	5	Sí
G5 (guía)	0	0	0	3	0	OCC	3	2,1	5	Sí
G6 (guía)	0	0	0	3	0	OCC	3	2,1	5	Sí
G7 (guía)	0	0	0	3	0	OCC	3	2,1	5	Sí
G8 (guía)	0	0	0	3	0	OCC	3	2,1	5	Sí
G9 (guía)	8	8	12	11	8	OPE	12	8,6	21	Sí
G10 (guía)	0	0	1	3	1	OCC	3	2,1	5	Sí
G11 (guía)	3	3	6	6	3	OCC	6	4,3	10	Sí
G12 (guía)	16	16	17	19	17	OCC	19	13,6	33	Sí

Total [m3]	97,3
------------	------

En la tabla 5.3 se muestra un presupuesto estimativo considerando sólo el hormigón a utilizar para la implementación de los soportes tipo guía. Cabe destacar, que no se considera los costos asociados al movimiento de tierra, transporte, entre otros. Recordando también que este es sólo un trayecto de 2,5 [km] de los aproximadamente 140 [km] del total.

Tabla 5.3 – Presupuesto estimativo para soporte tipo guía.

PRESUPUESTO					
ITEM	DESCRIPCIONES	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	TOTAL
	Mano de obra				
	Hormigón H30(90)	m3	97,3	UF 0,57	UF 55
	Materiales				
	Hormigón H30(90)	m3	97,3	UF 3,07	UF 299

TOTAL COSTO DIRECTO

UF 354

5.2 Cálculo de machón de anclaje

Los machones de anclajes se encuentran bajo terreno y trabajan como muros bajo la tierra, una especie de "pala" que trata de sacar la cuña pasiva. El objetivo es evitar el movimiento longitudinal en un punto de la cañería. Es por esto que antes y después de un machón de anclaje la cañería debe ser enterrada. La principal fuerza que mantiene dicha estabilidad es el empuje pasivo producto del suelo. Como se ve más adelante es la cuña pasiva que entrega prácticamente todo el aporte para contrarrestar la fuerza transmitida al soporte por la cañería, esto se esquematiza en la figura 5.7. Cabe señalar, que sólo se considera la estabilidad al deslizamiento puesto que como la cañería atraviesa el bloque y se encuentra confinada por el suelo, es poco relevante el efecto volcante. Esta propuesta de solución al problema tiene validez empírica (véase Smith (1957) y Tschebotarioff (1962)).

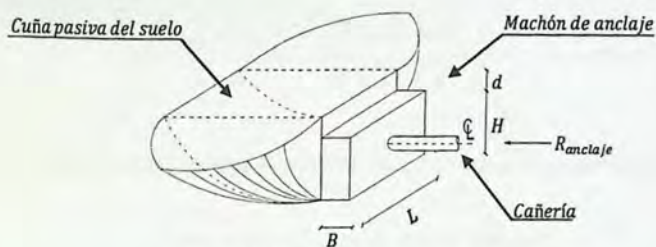


Figura 5.7 – Mecánica del machón de anclaje.

Con las consideraciones antes mencionadas se calculan las dimensiones óptimas para aprovechar al máximo la resultante del empuje producto de la acción generada por la cuña pasiva, con el fin de utilizar la menor cantidad de hormigón posible. La cuña activa no ayuda a contrarrestar el movimiento, ya que ejerce presiones en el mismo sentido que la reacción de la cañería. Sin embargo como se ve en los cálculos más adelante su resultante es varias veces menor que el empuje pasivo. Se muestra un esquema de las cuñas en la figura 5.8.

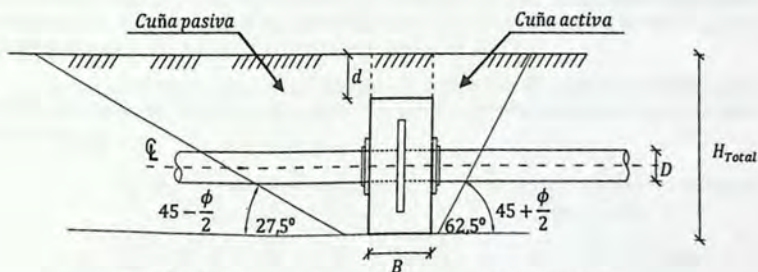


Figura 5.8 – Cuña pasiva y activa del suelo en el machón de anclaje.

Para transmitir la reacción de la cañería al machón de anclaje se utiliza un flange de anclaje tipo "slip-on", como se puede apreciar en la figura 5.9. Se debe verificar la resistencia al aplastamiento del homigón y la conexión del flange por soldadura a la cañería. Esto no se considera al momento de realizar los cálculos, puesto que no influye en el volumen de homigón, siendo éste el parámetro de interés en este caso.

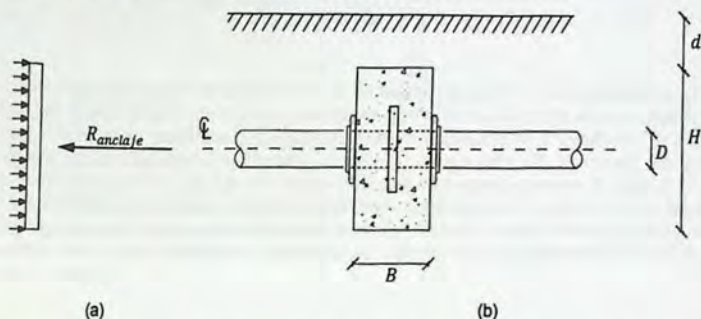


Figura 5.9 – a) DCL del flange de anclaje tipo "slip-on" b) flange de anclaje tipo "slip-on".

5.2.1 Estabilidad al deslizamiento en machón de anclaje

Para asegurar la estabilidad al deslizamiento es necesario respetar el factor de seguridad (FS_d) entre el cociente de las fuerzas que se oponen al desplazamiento y la fuerza en el soporte ejercida por la cañería, como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$FS_d = \frac{F_{resistente}}{R_{anclaje}} \geq 1,2 \quad (5.7)$$

Los empujes (E_a y E_p) consisten en el producto de la presión generada por la cuña de suelo con su sección de aplicación del alto por su largo (L). En la figura 5.10 (a), se muestran las presiones activa y pasiva (σ_a y σ_p), que provienen del producto entre el peso específico del suelo (γ_{suelo}), por la altura de aplicación con su coeficiente de empuje respectivo (K_a y K_p).

En la figura 5.10 (b) se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL) del machón de anclaje, donde las fuerzas resistentes deben ser mayores a la fuerza deslizante producto de la acción sobre el machón $R_{anclaje}$.

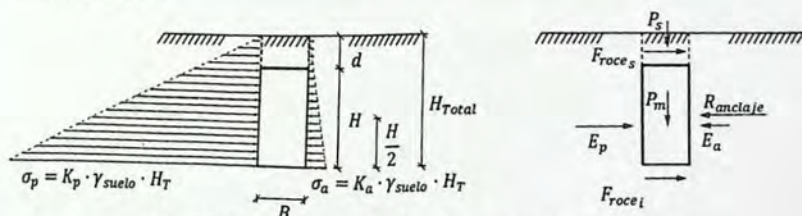


Figura 5.10 – a) Presiones del suelo b) DCL en el machón de anclaje.

Dónde:

- E_a : Empuje activo [tonf].
- E_p : Empuje pasivo [tonf].
- P_m : Peso del machón de anclaje [tonf].
- P_s : Peso de la cañería [tonf].
- P : $P_m + P_s$.

Para calcular las presiones del suelo, es necesario calcular los coeficientes de empujes respectivos, los cuales dependen de las características geométricas y del roce entre el bloque y el suelo. Para este caso, se considera conservadoramente la inclinación de la pendiente (β) igual a cero, el ángulo de fricción entre el hormigón y el suelo (δ) igual a cero y la inclinación del ángulo posterior de la estructura (α) igual a 90° , se muestra una esquematización en la figura 5.11. Lo anterior, con la finalidad de realizar un análisis simplificado de la teoría de Coulomb sobre la presión del suelo, ya que el muro no presenta inclinación y la presión del suelo trabaja de forma perpendicular a la superficie. Por lo cual, se utilizan las siguientes ecuaciones simplificadas para el cálculo de los coeficientes de empuje:

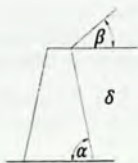


Figura 5.11 – Características geométricas entre el bloque y el suelo.

Coefficiente de empuje activo:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(\phi)}{1 + \text{sen}(\phi)} \quad (5.8)$$

Coefficiente de empuje pasivo:

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)} \quad (5.9)$$

Se puede notar de las ecuaciones anteriores que una es inversamente proporcional a la otra.

El empuje se obtiene integrando las presiones aplicadas en la superficie considerada, tanto para el empuje pasivo como activo, se muestra en la figura 5.12.

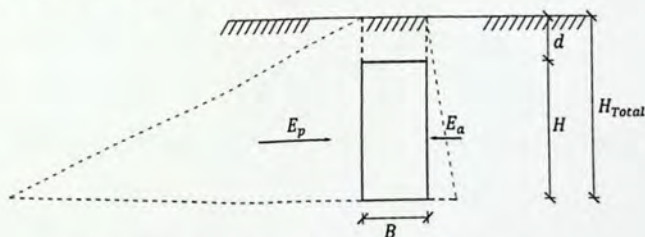


Figura 5.12 – Esquematación de empujes en el elemento.

Los cálculos de los empujes se obtienen de las ecuaciones 5.12 y 5.13, considerando los parámetros del suelo indicados en la tabla 5.1.

Presión activa:

$$\sigma_a = \gamma_{\text{suelo}} \cdot K_a \cdot H_T \quad (5.10)$$

Presión pasiva:

$$\sigma_p = \gamma_{\text{suelo}} \cdot K_p \cdot H_T \quad (5.11)$$

Para calcular el empuje activo (E_a):

$$E_a = \frac{(\sigma_a \cdot H_{\text{Total}})}{2} \cdot L \quad (5.12)$$

Para calcular el empuje pasivo (E_p):

$$E_p = \frac{(\sigma_p \cdot H_{\text{Total}})}{2} \cdot L \quad (5.13)$$

Para el cálculo de la fuerza de roce, es necesario conocer el peso total (P). El cual corresponde al peso del suelo sobre el machón (P_{suelo}) más el peso del machón ($P_{\text{machón}}$) sobre la cara inferior del bloque de hormigón. Para esto, es necesario calcular el volumen de cada elemento.

$$Vol_{\text{suelo}} = B \cdot L \cdot d \quad (5.14)$$

$$Vol_{\text{machón}} = B \cdot L \cdot H \quad (5.15)$$

$$P = P_{\text{suelo}} + P_{\text{machón}}$$

$$P = (\gamma_{\text{suelo}} \cdot Vol_{\text{suelo}} + \gamma_{\text{machón}} \cdot Vol_{\text{machón}}) \quad (5.16)$$

Para calcular la fuerza de roce en cara inferior (F_{roce_i}) se considera todo el peso en la base del soporte (P), por lo que se tiene:

$$F_{\text{roce}_i} = (Peso_{\text{suelo}} + Peso_{\text{machón}}) \cdot \tan(\phi) \quad (5.17)$$

Para calcular la fuerza de roce en cara superior (F_{roce_s}) sólo se considera el suelo que se encuentra sobre el soporte, por lo que se tiene:

$$F_{\text{roce}_s} = Peso_{\text{suelo}} \cdot \tan(\phi) \quad (5.18)$$

Reemplazando en la ecuación 5.7 los parámetros obtenidos, se tiene:

$$FS_d = \frac{F_{\text{resistente}}}{R_{\text{soporte}}} \geq 1,2$$

$$FS_d = \frac{E_p - E_a + F_{\text{roce}_s} + F_{\text{roce}_i}}{R_{\text{soporte}}} \geq 1,2$$

5.2.2 Dimensionamiento y cálculo para el machón más solicitado

A continuación se muestran las dimensiones con las cuales se logra una menor cantidad de hormigón del machón de anclaje tras realizar un proceso iterativo de diseño. Estas dimensiones cumplen frente al mecanismo de falla al deslizamiento como se menciona anteriormente. Las dimensiones propuestas se muestran en la figura 5.13.

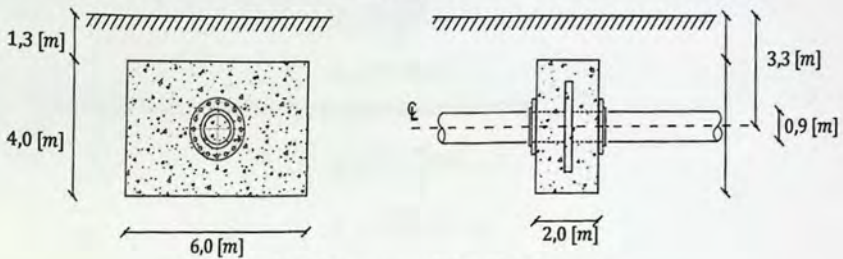


Figura 5.13 – Esquema soporte tipo machón de anclaje.

Reemplazando los valores en la ecuación 5.8, se obtiene el coeficiente de empuje activo:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(\phi)}{1 + \text{sen}(\phi)}$$

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(35^\circ)}{1 + \text{sen}(35^\circ)}$$

$$K_a = \frac{0,43}{1,57} = 0,27$$

Reemplazando los valores en la ecuación 5.9, se obtiene el coeficiente de empuje pasivo:

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)}$$

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}(35^\circ)}{1 - \text{sen}(35^\circ)}$$

$$K_p = \frac{1,57}{0,43} = 3,69$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 5.10, se obtiene la presión activa:

$$\sigma_a = \gamma_{\text{suelo}} \cdot K_a \cdot H_T$$

$$\sigma_a = 1,8 \cdot 0,27 \cdot 5,3$$

$$\sigma_a = 2,6 \text{ [tonf/m}^2\text{]}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 5.11, se obtiene la presión pasiva:

$$\sigma_p = \gamma_{\text{suelo}} \cdot K_p \cdot H_T$$

$$\sigma_p = 1,8 \cdot 3,69 \cdot 5,3$$

$$\sigma_p = 35,2 \text{ [tonf/m}^2\text{]}$$

Para calcular el empuje activo (E_a), se utiliza la ecuación 5.12:

$$E_a = \frac{(\sigma_a \cdot H_{Total})}{2} \cdot L$$

$$E_a = \frac{(2,6 \cdot 5,3)}{2} \cdot 6$$

$$E_a = \frac{(13,8)}{2} \cdot 6$$

$$E_a = 41 \text{ [tonf]}$$

Para calcular el empuje pasivo (E_p), se utiliza la ecuación 5.13:

$$E_p = \frac{(\sigma_p \cdot H_{Total})}{2} \cdot L$$

$$E_p = \frac{(35,2 \cdot 5,3)}{2} \cdot 6$$

$$E_p = \frac{(187)}{2} \cdot 6$$

$$E_p = 561 \text{ [tonf]}$$

El cálculo del peso total (P) proviene de la ecuación 5.16. Donde, se necesita el volumen del suelo sobre el machón y del machón, reemplazando en las ecuaciones 5.14 y 5.15:

$$Vol_{suelo} = B \cdot L \cdot d$$

$$Vol_{suelo} = 2 \cdot 6 \cdot 1,3$$

$$Vol_{suelo} = 16 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$Vol_{machón} = B \cdot L \cdot H$$

$$Vol_{machón} = 2 \cdot 6 \cdot 4$$

$$Vol_{machón} = 48 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$P = P_{suelo} + P_{machón}$$

$$P = (\gamma_{suelo} \cdot Vol_{suelo} + \gamma_{machón} \cdot Vol_{machón})$$

$$P = (1,8 \cdot 16 + 2,4 \cdot 48)$$

$$P = (28,8 + 115,2)$$

$$P = 144 \text{ [tonf]}$$

Para calcular la fuerza de roce en la cara inferior (F_{roce_i}) se utiliza la ecuación 5.17

$$F_{roce_i} = (P) \cdot \tan(\phi)$$

$$F_{roce_i} = (144) \cdot \tan(35^\circ)$$

$$F_{roce\ i} = 101 \text{ [tonf]}$$

Para calcular la fuerza de roce en la cara superior ($F_{roce\ s}$) se utiliza la ecuación 5.18

$$F_{roce\ s} = P_{eso\ suelo} \cdot \tan(\phi)$$

$$F_{roce\ s} = 28,8 \cdot \tan(35^\circ)$$

$$F_{roce\ s} = 20 \text{ [tonf]}$$

Se reemplazan en la ecuación 5.6 los valores de fuerza resistente junto a la mayor reacción correspondiente al machón M2 cuyo valor es igual a 507 [tonf], ver la tabla 3.9 para mayor detalle. Por lo que se tiene:

$$FS_d = \frac{F_{resistente}}{R_{soporte}}$$

$$FS_d = \frac{E_p - E_a + F_{roce\ s} + F_{roce\ i}}{F_{soporte}}$$

$$FS_d = \frac{561 - 41 + 20 + 101}{507}$$

$$FS_d = \frac{641}{507} = 1,3 \geq 1,2$$

En la figura 5.14 se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL) en el machón de anclaje. Cabe indicar, que las unidades de las fuerzas calculadas anteriormente se expresan en toneladas [tonf]. Esta figura se puede complementar con la figura 5.10 (b).

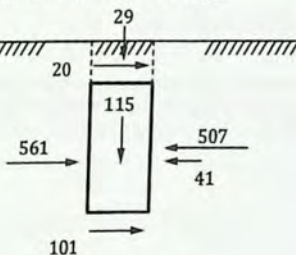


Figura 5.14 – DCL en el machón de anclaje.

Se puede notar de los resultados, que la estabilidad al deslizamiento con las dimensiones propuestas del machón ver figura 5.13, cumple con los criterios del factor de seguridad.

A continuación, se resumen los volúmenes de hormigón utilizados para todos los machones en la tabla 5.4, calculados de la misma forma antes mostrada. En esta tabla se pueden apreciar los valores de cada volumen necesario para evitar su deslizamiento junto a la reacción de acuerdo a su combinación de carga indicando cual controla, puesto que se debe utilizar el mayor valor de acuerdo al código ASME B.31.11. Cabe recordar que la acción sísmica no se considera para el machón de anclaje, ya que este elemento restringe en el sentido longitudinal y la fuerza son mucho mayores.

Tabla 5.4 - Reacciones de todos los machones del sistema de cañería con guías equidistantes.

Nodo	REACCIONES [tonf]							Volumen [m3]	Peso [tonf]
	SUS	EXP	OPE	OCC	HYD	Controla	Máximo		
M1 (machón)	265	270	464	268	292	OPE	464	48	115
M2 (machón)	244	249	507	247	270	OPE	507	48	115
M3 (machón)	139	139	143	142	141	OPE	143	13	31

Total [m3]	109
------------	-----

En la tabla 5.5 se muestra un presupuesto estimativo considerando sólo el hormigón a utilizar para la implementación de los soportes tipo machón de anclaje. Cabe destacar, que no se considera los costos asociados al movimiento de tierra, transporte, entre otros. Recordando también que este es sólo un trayecto de 2,5 [km] de los aproximadamente 140 [km] del total.

Tabla 5.5 – Presupuesto estimativo para soporte tipo machón de anclaje.

PRESUPUESTO					
ITEM	DESCRIPCIONES	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	TOTAL
	Mano de obra				
	Hormigón H30(90)	m3	109	UF 0,57	UF 62
	Materiales				
	Hormigón H30(90)	m3	109	UF 3,07	UF 335

TOTAL COSTO DIRECTO UF 397

Por lo tanto, el volumen de hormigón a considerar para la implementación de soportes en la línea de cañería con guías equidistantes cuyo trayecto es igual a 2,5 [km] de los aproximadamente 140 [km] del total, corresponde a 206,3 [m³] lo que se traduce a un costo total directo igual a UF 751.

6 Conclusiones

Análisis de flexibilidad

Desde el punto de vista de la modelación, es necesario considerar un análisis no lineal puesto que la fuerza que genera el roce no es elástica y no hace que la cañería vuelva a su posición inicial una vez ocurrido el desplazamiento. Otro de los efectos no lineales significativos para los cálculos realizados es el efecto de segundo orden, el cual se refleja principalmente al tener una carga axial considerable y un leve cambio de dirección, como se puede apreciar en la figura 3.8. Esto genera una variación de los esfuerzos y un aumento alrededor del 30 [%] de las deformaciones laterales de la cañería.

Al comparar todas las configuraciones propuestas para el sistema de línea de cañería y al reemplazar los elementos que restringen la deformación como los soportes por elementos que concentran la deformación en zonas específicas tales como las juntas de expansión, los desplazamientos laterales disminuyen considerablemente alcanzando una variación de hasta un 70% como es para el caso de carga operacional (OPE), se muestra un resumen en la tabla 6.1. Además, los desplazamientos máximos utilizando juntas de expansión se encuentran muy por debajo de los límites propuestos (45 [cm]).

Tabla 6.1 – Comparación de desplazamientos.

Caso	Guías equidistantes	Junta de expansión	Diferencia
SUS	16 [cm]	5 [cm]	-69%
EXP	16 [cm]	6 [cm]	-63%
OPE	44 [cm]	13 [cm]	-70%
OCC	27 [cm]	16 [cm]	-41%
HYD	17 [cm]	6 [cm]	-65%

Para el caso de las tensiones de diseño al comparar la configuración de guías equidistantes con las juntas de expansión para el sistema de línea de cañería, las tensiones disminuyen considerablemente alcanzando una variación de hasta un 64% como es para el caso de carga térmico (EXP), se muestra un resumen para todas las combinaciones de carga en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 – Comparación de razón de tensiones ($\tau_{m\acute{a}x}/\tau_{adm}$).

Caso	Guías equidistantes	Junta de expansión	Diferencia
SUS	0,54	0,39	-28%
EXP	0,25	0,09	-64%
OPE	0,98	0,40	-59%
OCC	0,57	0,39	-32%
HYD	0,61	0,42	-31%

De acuerdo a este trabajo se puede observar que para este sistema de línea de cañería con estas características, la implementación de juntas de expansión tiene un mejor desempeño frente al de guías equidistantes acorde a las variables consideradas como lo son los desplazamientos y las tensiones, permitiendo una posible disminución en el espesor de la cañería puesto que son menores las tensiones de trabajo. Además, al no requerir el uso de soportes genera un ahorro en obras civiles junto a una probable disminución en el tiempo de instalación de la cañería.

Dado que el sistema con juntas de expansión controla muy bien los desplazamientos operacionales y al no existir soportes es válido el modelo de un grado de libertad para la evaluación del desplazamiento sísmico. Además, para este caso el sismo no representa un aumento de solicitaciones, ya que no se da ningún esfuerzo producto de la acción sísmica al comportarse como un elemento extremadamente flexible. Por último esta metodología presenta otra ventaja, de que el tiempo de diseño puede ser más corto al usar modelos más simples.

Cabe destacar que pueden existir otras variables importantes relacionadas a las juntas de expansión que pueden generar condiciones adversas en comparación a la configuración usual con soportes equidistantes. Estos pueden ser problemas asociados a la mantención, reparación, duración, seguridad ante daños productos de terceros, entre otros.

Se desconoce si el procedimiento realizado de incorporar juntas de expansión en zonas estratégicas, donde la cañería tiende a concentrar las deformaciones, es el comúnmente utilizado en proyectos en otros países. Sin embargo, con esta metodología se pueden conocer las posibles zonas de fallas ante una eventual sobrecarga del sistema por presión y/o temperatura. Lo cual dada la mecánica de este sistema va a ocurrir siempre en las juntas de expansión, lugar donde se concentran los esfuerzos y deformaciones máximas como se puede apreciar en la figura 3.23.

Cabe destacar, que esta metodología utilizada de colocar una junta de expansión en una zona de concentración de deformación, se ha extraído en este caso de las estrategias sismorresistente en estructuras, donde se busca concentrar las deformaciones en zonas preestablecidas para controlar el daño, como se muestra en la figura 3.22.

Análisis sísmico

La forma de abordar el análisis sísmico presenta una gran complejidad, ya que no existe una modalidad única para enfrentar el problema. Cabe destacar que el problema sísmico aunque esté presente en distintas disciplinas de la ingeniería como la mecánica u otras. Es recomendable que sea abordado por un ingeniero civil especializado en diseño sismorresistente. Esto último queda de manifiesto en el siguiente párrafo.

En el presente trabajo de título, se comparan los resultados de la acción sísmica realizada ante un análisis estático y un análisis tiempo historia acorde a lo estipulado en la NCh2369. Cabe destacar que para un ingeniero no especialista en el área sismorresistente, la metodología de fuerzas estáticas aparentemente podría ser la opción más simple y racional de utilizar. Sin embargo, para un sistema de línea de cañería con guías equidistantes considerando un largo entre guías igual a 250 [m], los resultados de las solicitaciones obtenidas mediante un análisis tiempo-historia disminuyen aproximadamente hasta 60 veces en comparación al utilizar un análisis estático, como se muestra en la tabla 6.3. Por lo cual, la forma de abordar la acción sísmica no es algo sistemático y debe utilizarse el criterio ingenieril para su evaluación en cada caso.

Tabla 6.3 – Comparación de análisis estático con un tiempo historia.

Solicitación	Análisis estático	Análisis tiempo historia	Razón
Flexión	443 [tonf m]	12 [tonf m]	37 : 1
Reacción de la guía	11 [tonf]	3 [tonf]	4 : 1
Desplazamiento	647 [cm]	11 [cm]	59 : 1

En este trabajo se puede observar que para la configuración con guías equidistantes al abordar la acción sísmica con un criterio más adecuado para este caso, considerándolo como un desplazamiento del suelo en vez de fuerzas estáticas, se puede prescindir del uso de ciertos apoyos. Lo anterior, ya que las reacciones obtenidas son muy por debajo a las que entrega un análisis

estático ver tabla 5.2, lo cual puede repercutir en los costos asociados a la implementación de ellos. Para la configuración con juntas de expansión, simplemente no son necesarios.

El desplazamiento máximo corresponde a la mayor distancia medida desde el eje de la cañería hasta el punto más alejado de ella. Por otra parte el deslizamiento definido así en este trabajo de título, corresponde al recorrido de la cañería en un intervalo corto de tiempo producido generalmente de una fuerte aceleración horizontal. De los resultados de desplazamiento en el tiempo figuras 4.15 a la 4.18, se puede observar que el desplazamiento de la cañería se encuentra directamente relacionado con las aceleraciones horizontales del suelo. Sin embargo, los deslizamientos de la cañería ocurren siempre en el instante de las máximas aceleraciones horizontales del suelo (PGA_H).

Se puede notar de la tabla 4.2, que el efecto de la aceleración vertical entrega una diferencia porcentual importante de los desplazamientos para los registros de Llole y Concepción. Sin embargo, para el registro de Constitución y Angol no existe alteración significativa de sus desplazamientos. En consecuencia, el porcentaje de variación puede ser relevante, pero no así su magnitud. Para este caso en particular se podría recomendar despreciar el efecto del sismo vertical, incluso con registros de gran PGA_v , como es el caso de Llole, donde se esperaba que el efecto fuese mayor debido a que su PGA_v es igual a $0,67g$. Por otro lado, el registro de Angol presenta un PGA_H de $0,93g$ y sin embargo no se aprecia un gran desplazamiento como podría esperarse. Esto puede darse debido a que la duración de dicha aceleración es en un instante muy corto de tiempo y la cañería no alcanza a seguirla.

Puesto que el deslizamiento puede ser más relevante en el diseño que el desplazamiento puede ser una buena metodología considerar el mayor de ambos. Esto se muestra en la figura 6.1 (a), donde el registro de Constitución presenta un desplazamiento igual a 15 [cm] , el cual es mayor que su desplazamiento igual a 11 [cm] . Por otro lado, para el caso de Concepción su desplazamiento es igual a 2 [cm] , el cual es menor a su desplazamiento de 3 [cm] , como se muestra en la figura 6.1 (b). Finalmente, depende de donde se encuentra la cañería en el momento del PGA_H y esto último puede ser muy arbitrario, incluso para sismos de similares características.

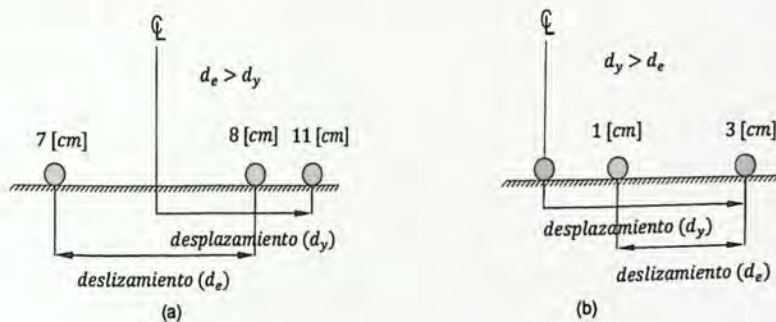


Figura 6.1 – Esquemización de desplazamiento y deslizamiento a) caso Constitución b) Caso Concepción.

Si bien el desplazamiento en el extremo de la cañería del modelo de varios grados de libertad debiera coincidir con el desplazamiento del modelo de un grado de libertad, no necesariamente cumple para largos menores a 150 metros entre guías, puesto que se encuentran dentro del rango de amplificación dinámica regidos principalmente por el segundo modo de vibrar. Los resultados al utilizar pequeños espaciamientos entre guías, provocan que el sistema se comporte como un sistema elástico, donde la frecuencia del sismo es similar a la frecuencia natural de

vibración de la cañería, aumentando los desplazamientos y la reacción en el soporte. No obstante, la separación usual entre guías en los proyectos de este tipo son del orden de 200 [m] a 500 [m] y en consecuencia al considerar mayores distancias entre guías las frecuencias tienden a disminuir alejándose de una posible amplificación dinámica. Dicho lo anterior y de acuerdo a lo visto en el presente trabajo de título, es posible mencionar que el modelo de un grado de libertad es suficiente para estimar el desplazamiento de un sistema de línea de cañerías apoyado directamente sobre terreno.

Finalmente, se desprende de los resultados que el caso de combinación de carga operacional (OPE) es la que controla al poseer las mayores sollicitaciones de esfuerzos, reacciones y desplazamientos. A excepción del desplazamiento máximo utilizando juntas de expansión cuyo valor es igual a 13 [cm] frente al desplazamiento del caso ocasional (OCC) igual a 16 [cm]. Por lo cual, se podría mencionar que la acción sísmica en general no tiene gran relevancia para este tipo de proyectos de cañerías apoyadas directamente sobre terreno con grandes presiones. Por último, el desplazamiento sísmico de la cañería es muy pequeño en comparación a los desplazamientos debidos a la presión y/o temperatura.

7 Bibliografía

1. "NCh 2369 Of. 2003, Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales". Instituto Nacional de Normalización (INN), 2003.
2. "ASME.B31.11 – 2002, Slurry Transportation Piping Systems". The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2002.
3. *Mechanics of Materials*. R.C. Hibbeler, 2011.
4. Estudio de Mecánica de Suelos. Proyecto Central Termoeléctrica ciudad de Mejillones, región de Antofagasta, 1992.
5. "Foundation Analysis and Design". Bowles, Joseph E., 1996.
6. Límites de carga según eje de rodado. Dirección de Vialidad (DV), Gobierno de Chile.
7. Manual online Pigs. Girard Industries.
8. Registros del Terremoto del Maule Mw=8.8 27 de febrero de 2010. Universidad de Chile. Boroschek, R., Soto, P. & Leon, R., 2010.
9. API Specification for Line Pipe 5L. American Petroleum Institute, 2012
10. Curso de Cañerías Industriales (piping). Goltzman, Fernando, 2003.
11. *Piping Handbook*, Séptima Edición. McGraw-Hill. Mohinder L. Nayyar, 2000.
12. *Design of Piping Systems*, M.W.Kellogg Company, 2009.
13. *Microstructural Characteristics of Different Commercially Available API 5L X65 Steels*. Fragiél, R. Schouwenaarf, R. Guardián and R. Pérez, 2004.
14. ASME Code for Process Piping, B31.3, 2002. The American Society of Mechanical Engineers, 2002.
15. *Mechanics and Strength of Materials*. Da Silva, Vitor Dias. Springer, Berlin, 2006.
16. *Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention*. Arthur J.McEvily, Jirapong Kasivitanuay, 2013.
17. "ASME.B31.4 – 2006, Liquid Transportation Systems for Hydrocarbons, Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia and Alcohols". The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2006.
18. "ASME.B31.8 – 2003, Gas Transmission and Distribution Piping System". The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2003
19. "ASME.B31.1 – 2001, Power Piping". The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2001.
20. Quick Check on Piping Flexibility. L. C. Pang, PE. Pang Engineering, Houston, Texas.
21. Friction Coefficient Measurements for Casing While Drilling with Steel and Composite Tubulars. Steven Leijnse, 2010.
22. *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, Bonifacio Fernández L., 1999.
23. *Derechos, Extracciones y Tasas Unitarias de Consumo de Agua del Sector Minero Regiones Centro-Norte de Chile*. Proust Consultores, 2008.
24. *Uso Eficiente de Aguas en la Industria Minera y Buenas Prácticas*. Subsecretaría de economía, Consejo nacional de producción limpia, 2002.
25. *Estudio de Tecnologías Eficientes - Uso del Agua en Minería*. Juan Rayo Ingeniería S.A., 2001.
26. *Gran Minería y Desarrollo Sustentable, Acciones y Reflexiones*. Consejo Minero A.G., 2002.
27. *Compendio de la Minería Chilena*, EDITEC Ltda., 2012.
28. *Consumo de agua en la minería del cobre*. Comisión Chilena del Cobre, 2012.
29. *Agua Fuente de Vida*. Miguel Auge, 2007.
30. *Reporte Anual Consejo Minero*. Consejo de Competencias Mineras, 2013.
31. *Proyección del Consumo de Energía Eléctrica de la Minería del Cobre en Chile al 2025*. Comisión Chilena del Cobre, 2013.
32. *El rol del cobre para que Chile alcance el pleno desarrollo*. Meller Patricio, 2011.
33. *Dinámica Estructural Teoría y Cálculo*. Paz, Mario. 2009.
34. *Gestión del recurso hídrico y la minería en Chile*. Comisión Chilena del Cobre, 2009.
35. *Situación Minera en Chile Perspectivas, desarrollo y su incidencia en la formación de ingenieros de clase mundial*. González Santiago, 2013.