



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE TUBERÍAS DE HDPE CORRUGADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO

BASTIÁN IGLESIAS CABRERA

PROFESOR GUÍA:  
MANUEL JORQUERA ENCINA

PROFESOR CO-GUÍA:  
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

MIEMBROS COMISIÓN:  
ALI AKBARIFAKHRABADI  
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES

SANTIAGO DE CHILE  
2024

# Resumen

Hoy, el uso de tuberías corrugadas de HDPE se limita a la experiencia y pruebas de ensayo y error, dado que de momento no existe una norma de diseño que englobe las bases y criterios de diseño usados para realizar los cálculos necesarios que aseguren que las tuberías cumplan con las características necesarias para mantenerse en operación durante la vida útil del proyecto. Así, la metodología del trabajo de título consistirá en actualizar el estado del arte del uso del material (normas, reglamentos, pappers, informes técnicos, etc.) y evaluar diversos diseños con elementos finitos.

En general existen algunas normas de uso y diseño tales como Especificaciones de Diseño de Puentes AASHTO LRFD, capítulo 12 “Estructuras Enterradas”, se definen los aspectos buscados para la aplicación de este material, pero para otros usos.

Este estudio complementa una memoria previa realizada por Diego Flores: “Uso de tuberías de HDPE corrugado de 3”, 4”, 6” y 8”, estudio en el que se busca estudiar límites de aplicación de tuberías realizando y analizando ensayos de compresión. En contraste con su trabajo, en este, se busca diseñar un modelo de elementos finitos para una tubería de HDPE corrugado de 4” de diámetro que pueda ser utilizado como segunda referencia en la definición de límites de servicio de tuberías. Para lograr este objetivo se deberá actualizar el estado del arte del uso del material, determinar esfuerzos normales y tensiones de pandeo además de generar la pieza en 3D que describa un tramo de la tubería a diseñar.

Para desarrollar la metodología será necesario principalmente el uso de un software que permita el diseño con elementos finitos (SolidWorks/Fusion360), utilizando un mallado basado en la curvatura de alta definición (tetraedro cuadrático) variando espesor de corruga (0.5mm a 1mm), tipo de cover y altura de pila de lixiviación (100 a 350 metros).

Finalmente se lograron el diseño del segmento de cañería con sus diversas variaciones, aunque las dimensiones del mallado final no fueron suficientes para describir correctamente el espesor de la tubería para lo cual se propone un software más especializado llamado Cande con el fin de obtener campos de esfuerzos.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivo general . . . . .	1
1.3. Objetivos específicos . . . . .	1
<b>2. Antecedentes.</b>	<b>2</b>
2.1. HDPE . . . . .	2
2.2. Tuberías corrugadas . . . . .	2
2.3. Criterios de diseño . . . . .	2
2.3.1. Propiedades de la sección . . . . .	2
2.3.2. Propiedades del material . . . . .	2
2.3.3. Condiciones de instalación . . . . .	3
2.3.4. Cargas . . . . .	3
2.4. Procedimiento para diseño de tuberías . . . . .	5
2.4.1. Esfuerzo Normal de Pared . . . . .	5
2.4.2. Pandeo . . . . .	7
2.4.3. Deformación por compresión . . . . .	8
2.4.4. Deformación por flexión . . . . .	8
2.4.5. Deformación combinada . . . . .	9
2.5. Límites de Servicio en tuberías corrugadas . . . . .	10
<b>3. Metodología</b>	<b>11</b>
<b>4. Modelo general</b>	<b>11</b>
4.1. Dimensionamiento . . . . .	11
4.2. Perfil corruga . . . . .	12
4.3. Mallado . . . . .	15
4.4. Sujeciones . . . . .	16
4.4.1. Empotrado . . . . .	16
4.4.2. Rodillo . . . . .	16
4.4.3. Módulo de Winkler . . . . .	16
4.5. Modelamiento Cargas . . . . .	17
4.6. Cargas laterales . . . . .	22
<b>5. Utilización de Cande</b>	<b>25</b>
<b>6. Conclusión</b>	<b>26</b>
<b>7. Carta Gantt</b>	<b>27</b>

## Índice de Figuras

1.	Detalle de perfil idealizado [3] . . . . .	7
2.	Mecanismos de fallas en tuberías flexibles. . . . .	10
3.	Unión tipo Bel-Bel con garra. . . . .	12
4.	Creación del modelo inicial . . . . .	12
5.	Variación de espesores de corruga . . . . .	13
6.	Variaciones de distancia entre corrugas de espesor:0,6mm . . . . .	14
7.	Creación de mallado del modelo . . . . .	15
8.	Parámetros de mallado de diseño base . . . . .	15
9.	Sujeción de empotramiento. . . . .	16
10.	Cargas verticales uniformes. . . . .	16
11.	Representación de deformación terreno con lecho de resortes (Módulo de Winkler) . . . . .	16
12.	Valores de constantes de rigidez en función del suelo. . . . .	17
13.	Disposición lecho resortes, $k=25Ncm^3$ . . . . .	17
14.	Consideración esfuerzo efectivo, columna de suelo saturado sin filtraciones . . . . .	18
15.	Tabla de pesos unitarios de suelos . . . . .	20
16.	Cargas uniformes verticales . . . . .	20
17.	Cargas laterales en cañerías enterradas . . . . .	22
18.	Cargas laterales en cañerías enterradas . . . . .	23
19.	Detalle elementos BEAM Y QUAD que conforman la pared de una de las tuberías y el relleno respectivamente. . . . .	25
20.	Esfuerzos verticales en el suelo. . . . .	26
21.	Carta Gantt inicial para el trabajo de título . . . . .	27

## Índice de Tablas

1.	Información técnica del producto . . . . .	11
2.	Esfuerzos y cargas aplicadas por tierras húmedas sueltas a distintas alturas de pila . . . . .	21
3.	Esfuerzos y cargas aplicadas por arena artificial compacta a distintas alturas de pila . . . . .	21
4.	Esfuerzos y cargas aplicadas por tierras seca compacta a distintas alturas de pila . . . . .	21
5.	Esfuerzos y cargas aplicadas por tierras mojadas compactas a distintas alturas de pila . . . . .	22
6.	Esfuerzos y cargas laterales a distintas alturas de pila para cobertura de grano fino . . . . .	24
7.	Esfuerzos y cargas laterales a distintas alturas de pila para cobertura de grano medio . . . . .	24
8.	Esfuerzos y cargas laterales a distintas alturas de pila para cobertura de grano grueso . . . . .	25

# 1. Introducción

A continuación, se presenta el informe de trabajo de título: "Modelo en elementos finitos de tuberías de HDPE corrugado".

## 1.1. Motivación

Considerando que el HDPE tiene propiedades que la hace muy relevantes para la ingeniería y minería, tales como su gran resistencia mecánica, química y flexibilidad, conlleva a su utilización en diversas estructuras, entre ellas a su aplicación en tuberías corrugadas, puesto que estas cañerías forman parte de una amplia infraestructura en la minería, es de gran importancia un modelo viable que logre describir sus reacciones físicas sin necesidad de realizar ensayos mecánicos. En la actualidad la selección de cañerías corrugadas para procesos de lixiviación ha sido realizada por prueba y error sin muchos fundamentos o criterios de diseño que permitan respaldar esta selección, es por eso que se realiza este trabajo para poder representar en una matriz de elementos finitos el escenario de trabajo de estas cañerías. Los alcances del diseño se ceñirán al trabajo previamente realizado por Diego flores en su trabajo 'Uso de tuberías de HDPE corrugado de 3", 4", 6" Y 8' en pilas de lixiviación de hasta 100 metros de altura', actualizando el estado del arte del mismo.

## 1.2. Objetivo general

Diseñar en elementos finitos Tuberías de HDPE corrugado de 4" de diámetro variando algunas condiciones (área efectiva de corruga, distancia entre corrugas, alturas de cover, tipo cover)

## 1.3. Objetivos específicos

- Actualizar el estado del arte del uso del material.
- Determinar esfuerzos normales y tensiones de pandeo
- Determinar deformaciones por flexión, compresión y combinada
- Generar pieza 3d que describa al tramo de tubería a diseñar.

## **2. Antecedentes.**

### **2.1. HDPE**

El HDPE (polietileno de alta densidad) es un polímero termoplástico que posee importantes propiedades y características, tales como resistencia mecánica a altas y bajas temperaturas, resistencia química y a la corrosión, ligereza, flexibilidad, facilidad para su manufactura mediante inyección o extrusión y la posibilidad de ser reciclado, haciendo de él un material idóneo para múltiples propósitos. En particular su uso en tuberías corrugadas permite que puedan transmitir la carga hacia el suelo circundante y transportar casi todo tipo de material, siendo así estas tuberías usadas ampliamente en aplicaciones gravitacionales como sistemas de alcantarillado, drenajes, aireación y lixiviación de pilas, etc. [1] [2]

### **2.2. Tuberías corrugadas**

Dependiendo del desempeño que tienen, es posible clasificar el comportamiento de una tubería como flexible (tuberías corrugadas) o rígido (tubería lisa). Particularmente las tuberías corrugadas deben ser capaz de moverse y deflectarse sin sufrir daños significativos de manera que puedan transmitir la carga puesta sobre ella a la superficie que la circunda. De esta forma, un correcto desempeño de la tubería no dependerá solo de sus características, sino también del material de relleno a utilizar y de una instalación adecuada de las tuberías. Así, para un correcto estudio de su comportamiento será necesario tener en cuenta aspectos como la capacidad de soporte del sello de fundación, la instalación o no de la tubería en una zanja, el tipo de cover a utilizar, los niveles freáticos y la consolidación y asentamiento de los rellenos. [3]

### **2.3. Criterios de diseño**

Al momento de diseñar tuberías termoplásticas es necesario tener en consideración al menos los siguientes 4 aspectos: Propiedades de la sección de la tubería, propiedades del material, condiciones de instalación y las cargas sobre la tubería.

#### **2.3.1. Propiedades de la sección**

Conocer el perfil de un elemento estructural es muy relevante a la hora de establecer los criterios de diseño ya que será un indicador de su desempeño. Estas propiedades incluyen el área de una sección de pared de una unidad longitudinal ( $A_s$ ), el momento de inercia del perfil de la pared ( $I$ ) y la distancia desde el diámetro interior hasta el eje neutro ( $c$ ).

#### **2.3.2. Propiedades del material**

Al ser un material viscoelástico, es necesario tomar algunas consideraciones en cuenta respecto al uso de HDPE. Al ser sometido a fuerzas constantes, las curvas de tensión/deformación muestran una disminución en la resistencia del material con el tiempo. Diversos ensayos muestran que el material no se debilita, sin embargo, estos no logran reconocer la relajación de esfuerzo, propiedad

de los materiales viscoelásticos que señala una disminución en la tensión para un elemento que se mantiene flexionado en una misma posición. Esto implica que es necesario considerar que las propiedades del material (como su módulo de elasticidad o su resistencia a la tracción) pueden cambiar en el largo plazo tras ser sometido a una posición de flexión durante un tiempo suficiente.

### **2.3.3. Condiciones de instalación**

El comportamiento final de la tubería no dependerá solo de las propiedades de esta, sino de su interacción con el resto del suelo. Esto implica que el relleno a utilizar en su estructura debe tener las condiciones estructurales y de drenaje para la aplicación deseada, y deben tenerse en cuenta el tipo de material a utilizar, el nivel de compactación, las dimensiones de la envolvente y las condiciones del suelo nativo en que se dispondrán las tuberías.

Para un correcto análisis, es necesario considerar propiedades como el factor de forma y la resistencia del relleno. El factor de forma es una función de la rigidez de la tubería, el tipo de material de relleno y su nivel de compactación. Por otro lado, la resistencia del relleno puede ser descrita mediante el módulo de reacción de suelo ( $E' / \nu$ ), el cual es un valor empírico promovido por US Bureau of Reclamation, o bien por el módulo secante confinado del suelo ( $M_s$ ), propiedad medida en laboratorio que está dada por el cociente entre el incremento de la presión efectiva vertical en un cierto intervalo de la curva edométrica y la deformación vertical unitaria correspondiente.

Los materiales para rellenos se dividen en clases, las que se presentan a continuación:

- Clase I: Roca triturada.
- Clase II: Suelos limpios de grano grueso.
- Clase III: Suelos de grano grueso con finos o suelos inorgánicos de grano fino.
- Clase IV: Suelos inorgánicos de grano fino que requieren una evaluación geotécnica y aprobación de ingeniero calificado.
- Clase V: Suelos inorgánicos de grano fino, suelos orgánicos o altamente orgánicos.

### **2.3.4. Cargas**

Las cargas pueden categorizarse como cargas vivas y cargas muertas. Las cargas vivas son aquellas que varían en el tiempo, siendo las cargas por vehículos, vías férreas o aeronaves las más consideradas. En este caso, se tomarán en cuenta únicamente camiones CAT 797 con un peso al estar lleno de 624[ton], el cual considerando un factor de carga viva de 1.95 (elevado por su gran tamaño) nos entrega una carga viva transferida a la tubería de 0.146 [Mpa], equivalente a 21.18 [psi].

Por otro lado, las cargas muertas son cargas que permanecen constantes, y por lo general la única a considerar será la del suelo, aunque pueden incorporarse cargas por aguas subterráneas, sobrecargas o fundaciones. Para determinar la carga del suelo, puede considerarse el cálculo de carga arqueada del suelo ( $W_{sp}$ ), la cual considera que las columnas de suelo adyacentes soportan parte de la carga de la columna de suelo inmediatamente sobre la tubería.

Para el cálculo de  $W_{sp}$  es necesario determinar la carga geostática del suelo ( $P_{sp}$ ), la cual está dada por:

$$P_{sp} = \frac{(\gamma_s)(H + 0.11 \frac{OD}{12})}{144} \quad (1)$$

Donde:

- H :Profundidad de instalación [ft]
- $\gamma_s$  :peso unitario del suelo [ $lb/ft^3$ ]
- OD :Diámetro externo de la tubería [in]

Luego debe determinarse el factor de arqueamiento vertical (VAF), el cuál considera el soporte de las columnas adyacentes y está descrito por:

$$VAF = 0.76 - 0.71 \frac{S_h - 1.17}{S_h + 2.92} \quad (2)$$

Donde:

- $S_h = \frac{M_s}{EA}$  :factor de rigidez anular
- $M_s$  :módulo secante confinado del suelo restringido [psi]
- $R = \frac{ID}{2} + c$  :Radio efectivo de la tubería
- ID :Radio interior [in]
- c :Distancia de diámetro interno al eje neutro [in]
- E :Módulo de elasticidad [psi]
- A : Área de sección [ $in^2/in$ ]

Una vez determinadas la carga geostática y el factor de arqueamiento vertical, la carga arqueada del suelo se determina como:

$$W_{sp} = P_{sp} \cdot VAF \quad (3)$$

Para el caso de cargas hidrostáticas, estas solo se consideran si se encuentran sobre la línea media de la tubería. La presión hidrostática así está dada por la ecuación:

$$P_w = \frac{\gamma_w(H_w)}{144} \quad (4)$$

Donde:

- $\gamma_w = 62.4 [lb/m^3]$  :Peso unitario del agua
- $H_s$  :Altura de napa de agua desde línea media del tubo [ft]

## 2.4. Procedimiento para diseño de tuberías

### 2.4.1. Esfuerzo Normal de Pared

Este esfuerzo está dado por todas las cargas sobre la tubería, incluyendo cargas vivas y muertas, en corto y largo plazo. Es importante que las resistencias críticas a tracción y compresión de la tubería sean superiores al esfuerzo normal de pared, el cual viene dado por la ecuación:

$$T_L = T_{cp} + T_{lp} = (F_{cv}P_l C_l \frac{OD}{2}) + (F_{ct}W_{sp} + F_{ca}P_w)(\frac{OD}{2}) \quad (5)$$

Donde:

- $T_{lp}$  : Esfuerzo normal a largo plazo[lb/in]
- $T_{cp}$  : Esfuerzo normal a corto plazo[lb/in]
- $F_{cv}$  : Factor de carga viva
- $F_{ct}$  : Factor de carga, carga tierra
- $F_{ca}$  : Factor de carga, carga agua
- $P_l$  :Carga viva transferida a la tubería[Psi]
- $C_l = \min(\frac{L_w}{OD}, 1.0) = 1$  : coeficiente de distribución carga viva
- $W_{sp}$  : Carga arqueada del suelo
- $P_w$  : Presión hidrostática en la línea media [psi]
- $OD$  : Diámetro exterior [in]

Luego las resistencias críticas de tracción y compresión al esfuerzo normal son definidas respectivamente como:

$$T_{trac} = (F_y A) F_{trac} \quad (6)$$

$$T_{comp} = (F_y A_{eff}) F_{comp} \quad (7)$$

Donde:

- $F_y$  : Resistencia mecánica a la tracción en corto o largo plazo [psi]
- $A$  : Área de pared [ $in^2/in$ ]
- $A_{eff}$  : Área efectiva de pared [ $in^2/in$ ]
- $F_{tracc}$  : Factor de carga tracción

Siendo el área efectiva de pared referida en la ecuación 8 el área real bajo una determinada fuerza de compresión en la pared de la tubería. Para el cálculo de esta área se supone un perfil idealizado de la tubería el cuál representa al perfil real simplificado mediante el uso de rectas (figura. Para el cálculo del área efectiva será necesario realizar mediciones para determinar el espesor y ancho de los elementos que conforman la tubería.

Así, el área de pared efectiva podrá calcularse como:

$$A_{eff} = A - \frac{\sum(1 - \rho_i)\omega_i t_i}{\omega} \quad (8)$$

Donde:

- $A$  : Área de pared por unidad de largo [ $in^2/in$ ]
- $\omega_i$  : Largo individual de cada elemento del perfil [in]
- $t_i$  : Espesor individual de cada elemento del perfil [in]
- $\omega$  : Paso del perfil (distancia entre valles) [in]

El valor representado por  $\rho_i$  es el factor de ancho efectivo, determinado por la ecuación:

$$\rho_i = \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda_i}}{\lambda_i} \leq 1 \quad (9)$$

Aquí,  $\lambda_i$  representa el factor de esbeltez, y está dado por:

$$\lambda_i = \frac{w_i}{t_i} \sqrt{\frac{\varepsilon}{k}} > 0.673 \quad (10)$$

Donde:

- $w_i$  : Largo individual de cada elemento del perfil [in]
- $t_i$  : Espesor individual de cada elemento del perfil [in]
- $k$  : Coeficiente de apoyo de extremos, igual a 4.0 en elementos apoyados en ambos extremos
- $\varepsilon$  : Límite en la deformación del material [in/in]

Por último el límite de deformación del material  $\varepsilon$  está dado por:

$$\varepsilon = \frac{T_L}{AE} \quad (11)$$

Donde:

- $T_L$  : Esfuerzo normal sobre el tubo [lb/in]
- $A$  : Área de pared [ $in^2/in$ ]

- $E$  : Módulo de elasticidad del material (a corto y largo plazo) [psi]

A continuación, la figura 1 muestra una comparación del perfil típico de una corruga y la composición del perfil idealizado. En esta se señalan con números cada una de las partes que serán medidas para determinar el valor del área efectiva, que corresponden a:

- 1 : Valle izquierdo
- 2 : Ala izquierda
- 3 : Cresta
- 4 : Ala derecha
- 5 : Valle derecho
- 6 : Liner

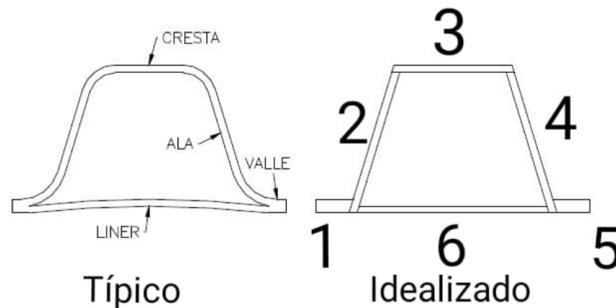


Figura 1: Detalle de perfil idealizado [3]

## 2.4.2. Pandeo

La posibilidad de pandeo en la pared de la tubería queda determinada por las condiciones de suelo y las propiedades del perfil de la tubería. La tensión crítica de pandeo así queda dada por la ecuación:

$$f_{cr} = 9.24 \frac{R}{A_{eff}} \sqrt{B'(H)R_w(h_g)M_s \frac{EI}{0.149R^3}} \quad (12)$$

Donde:

- $R$  : Radio efectivo tubería [in]
- $A_{eff}$  : Área efectiva [ $in^2/in$ ]
- $M_s$  : Módulo secante confinado del suelo [psi].
- $E$  : Módulo de elasticidad a cort y largo plazo [psi]
- $I$  : Momento de inercia [ $in^4/in$ ].

- $R_w = 1 - \frac{0.33h_g}{H}$  :Factor de flotación en el agua
- $H$  :Profundidad de enterrado del tubo ft.
- $h_g$  :Altura de la napa de agua subterránea sobre corona del tubo [ft].
- $B' = \frac{1}{1+e^{-0.065H}}$  :Factor de distribución de tensión no uniforme.

Es importante señalar que si  $f_{cr}$  es menor al límite de tracción  $F_y$ , este último debe reemplazarse por la tensión crítica al pandeo al momento de realizar cálculos para las resistencias críticas de tracción y compresión.

### 2.4.3. Deformación por compresión

Para el cálculo de la deformación por compresión se tomará en cuenta en particular el hecho de ser un material viscoelástico, lo que obliga a considerar cargas tanto en corto como en el largo plazo. Así, un mejor valor la deformación por compresión estará dado por:

$$\epsilon_{comp} = \frac{T_{lp}}{A_{eff}E_{50}} + \frac{T_{cp}}{A_{eff}E} \quad (13)$$

Donde:

- $T_{lp}$  :Esfuerzo normal de pared en largo plazo [lb/in]
- $T_{cp}$  :Esfuerzo normal de pared en corto plazo [lb/in]
- $E_{50}$  :Módulo de elasticidad en largo plazo [psi]
- $E_{cp}$  :Módulo de elasticidad [psi]

### 2.4.4. Deformación por flexión

El método para determinar la deformación por flexión se basa en una relación empírica entre deflexión (reducción del diámetro vertical) por condición de carga y deformación unitaria. Para esto, se introduce un límite para la deformación según la deflexión. Si bien este límite en el caso de tuberías enterradas se considera del 5%, para el desarrollo del trabajo se determinará un límite más adecuado en torno a la capacidad de deformación máxima del material. Así, la deflexión de la tubería por flexión está dada por la expresión:

$$\Delta = \Delta_c ID - \frac{\epsilon_{comp}(ID + 2c)}{F_{ct}} \quad (14)$$

Donde:

- $\Delta$  : Deflexión del tubo [in]
- $\Delta_c$  : Deflexión límite inducida [in]
- $ID$  : Diámetro interno de la tubería [in]

- $\epsilon_{comp}$  : Deformación unitaria por compresión [in]
- $c$  : Distancia desde el diámetro al eje neutro [in]
- $F_{ct}$  : Factor de carga viva, carga tierra

Finalmente, la deformación debido a la flexión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{flex} = 1.5D_f\left(\frac{c_x}{R}\right)\left(\frac{\Delta}{ID + 2c}\right) \quad (15)$$

Donde:

- $D_f$  : Factor de forma
- $\Delta$  : Deflexión [in]
- $R = \frac{ID}{2} + c$  : Radio efectivo tubería [in]
- $ID$  : Diámetro interior [in]
- $c_x$  : Distancia entre eje neutro y fibra extrema de la tubería [in]
- $c$  : Distancia desde el diámetro interior al eje neutro [in]

#### 2.4.5. Deformación combinada

Finalmente, si la deformación de la tubería para compresión y flexión cumple con las condiciones necesarias, es necesario confirmar que la deformación combinada por los esfuerzos de compresión (o tracción) y flexión no sobrepasa los límites impuestos. Así, la deformación combinada debida a compresión se origina de la expresión:

$$\epsilon_{comp} = \epsilon_{flex} + \epsilon_{comp} \frac{1.5}{F_{ct}} \quad (16)$$

Donde:

- $\epsilon_{flex}$  : Deformación unitaria por flexión [in/in]
- $\epsilon_{comp}$  : Deformación unitaria por compresión [in/in]
- $F_{ct}$  : Factor de carga, carga tierra.

Luego, el valor límite para la deformación combinada por compresión está dada por:

$$\epsilon_{crlcomp} = \frac{F_{def}F_y}{E_{50}} \quad (17)$$

Donde:

- $F_y$  : Resistencia a la tracción en el largo plazo [psi]

- $E_{50}$  : Módulo de elasticidad en el largo plazo [psi]
- $F_{def}$  : Factor de esfuerzos crítico = 1.5

Por otro lado, la deformación combinada debido a la tracción está dada por:

$$\epsilon_{ctrac} = \epsilon_{flex} \frac{1.5}{F_{ct}} \quad (18)$$

Donde:

- $\epsilon_{flex}$  : Deformación unitaria por flexión [in/in]
- $F_{ct}$  : Factor de carga, carga tierra

Finalmente, el límite en la deformación combinada debido a tracción es dado por:

$$\epsilon_{ctrac} = 1.5\epsilon_{ctrac} \quad (19)$$

Donde:

- $\epsilon_{ctrac}$  : Deformación unitaria por tracción [in/in]

## 2.5. Límites de Servicio en tuberías corrugadas

Cómo se estudió previamente, los límites de servicio de las tuberías de HDPE corrugado están dados por los mecanismos de falla debidos a deflexión excesiva, la fluencia de las paredes del tubo debido a la compresión o el pandeo, como puede observarse en la figura 2.[4]

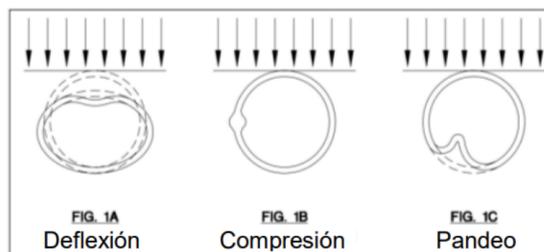


Figura 2: Mecanismos de fallas en tuberías flexibles.

### 3. Metodología

La metodología de diseño actual para el uso de tuberías corrugadas de HDPE se basa en calcular y evaluar el estado límite del esfuerzo normal de la pared del tubo, la carga crítica de pandeo y los límites de deformación para combinaciones de tensión y compresión. Para asegurar que los valores determinados mediante estos cálculos son seguros, es importante considerar factores de carga acordes a la situación, los cuales pueden variar a criterio del ingeniero especialista dependiendo de la complejidad de la situación.

Una vez se haya definido el diseño general de estas tuberías con sus cargas, condiciones de borde y mallado según el software, se comienza a realizar variaciones de condiciones lo que se traducirá en esfuerzos y deformaciones diferentes.

Para finalizar se procede con la redacción del Informe Final/Defensa: considerando el tiempo necesario para la redacción del informe final del trabajo de título, el cual condensa todo el trabajo mencionado anteriormente. Además de esto, se considera este tiempo también como preparación para la defensa del trabajo de título en cuestión.

### 4. Modelo general

#### 4.1. Dimensionamiento

Esta especificación aplica a tuberías corrugadas de polietileno de alta densidad con interior liso, para aplicaciones de drenaje en pilas de lixiviación. El formato especial para BHP contempla rollos de 100m, fabricadas en conformidad con el estándar ASTM F667 que permite la utilización de resina reciclada. Para el modelado en elementos finitos se consideró un segmento unitario de 1m de largo y  $0,1 m^2$  de área proyectada por el manto.[5]

Tabla 1: Información técnica del producto

Largo	Diámetro interno(nominal)	Diámetro promedio externo	espesor de la pared interior	Rigidez del tubo
1m	100 mm (4")	119 mm	0.6 mm	345 kPa
Largo unitario a evaluar	interior del liner	4,688 pulgadas considerando altura de la cresta de corruga	Tanto de cresta como de alas laterales	Rigidez mínima a 5% de deformación

En las uniones de cañería se utiliza una unión tipo BEL que es una pieza espacial fabricada en Polietileno de Alta Densidad (HDPE), la cual no fue considerada en el modelo de elementos finitos puesto que al ser una pieza de instalación externa funciona como refuerzo de esta cañería aumentando la resistencia a los esfuerzos y descartándola como punto de interés.



Figura 3: Unión tipo Bel-Bel con garra.

## 4.2. Perfil corruga

Para el diseño de un tramo unitario de cañería a evaluar se realiza una simplificación del perfil de la corruga (fig 4) igualando las dimensiones de la cresta y el liner del perfil típico idealizado, presente en la figura 1, simplificando el aporte de cargas verticales en ambas alas y transfiriéndolas a ambos valles. De esta manera se minimizan la cantidad de superficies en las cuales es aplicada las cargas del modelo. Una vez definido el perfil de la corruga se aplica una matriz lineal hasta alcanzar el largo unitario de cañería y finalmente se realiza una extrusión por revolución para generar la cañería de 4 pulgadas.

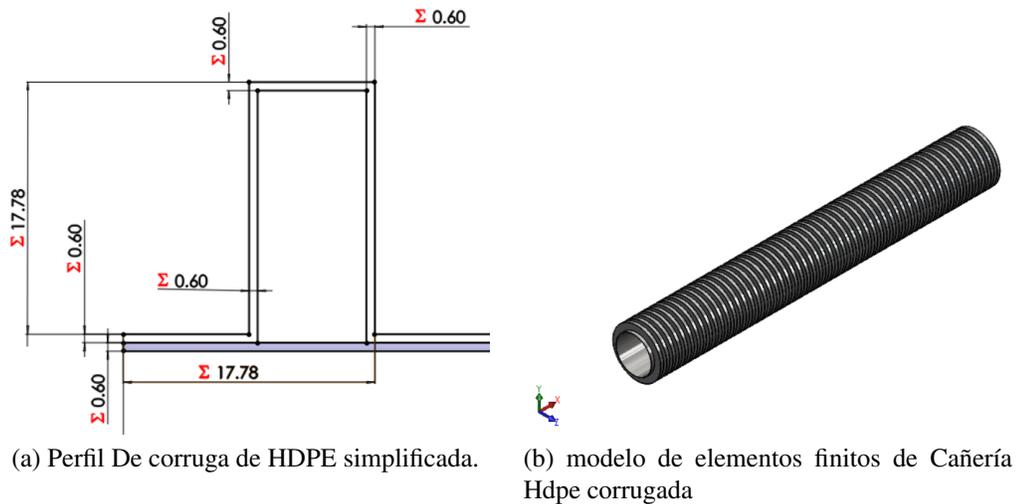
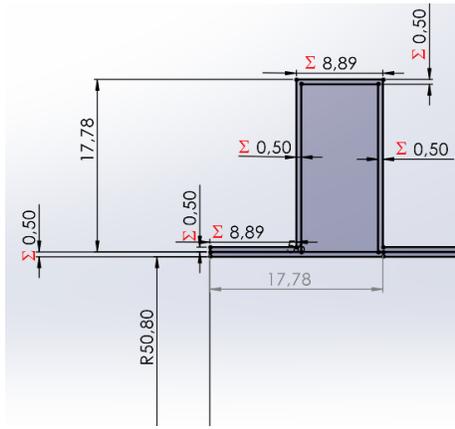
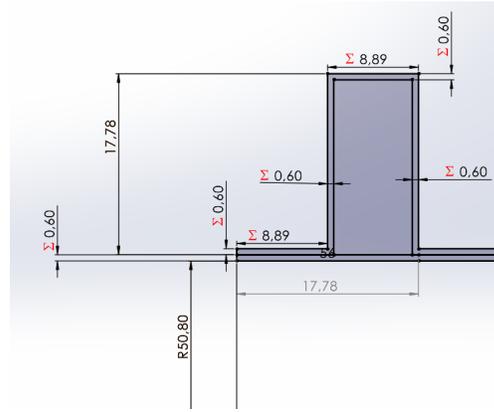


Figura 4: Creación del modelo inicial

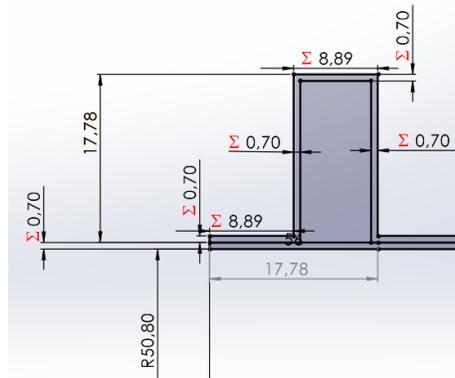
Una vez definido el perfil de corruga base se parametrizan las dimensiones de la corruga de manera que se puedan variar tanto el espesor de corruga como la distancia de paso de esta corruga.



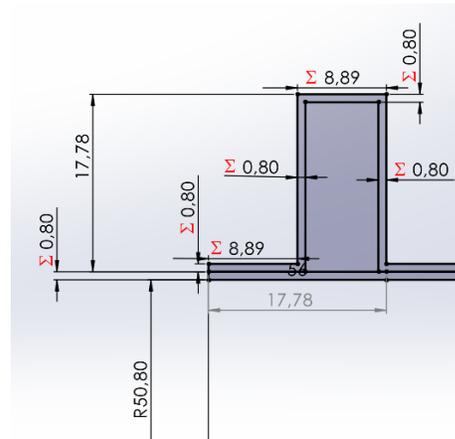
(a) Perfil De corruga de HDPE simplificada, espesor 0,5mm.



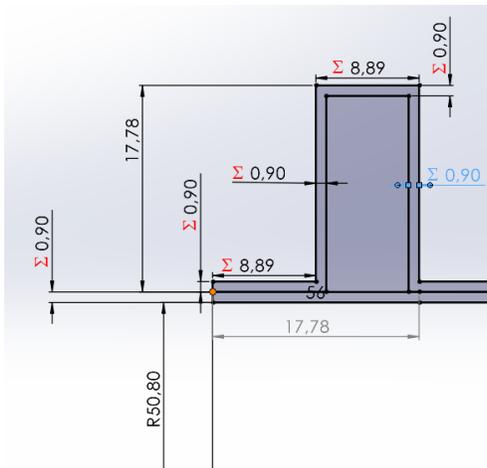
(b) Perfil De corruga de HDPE simplificada, espesor 0,6mm.



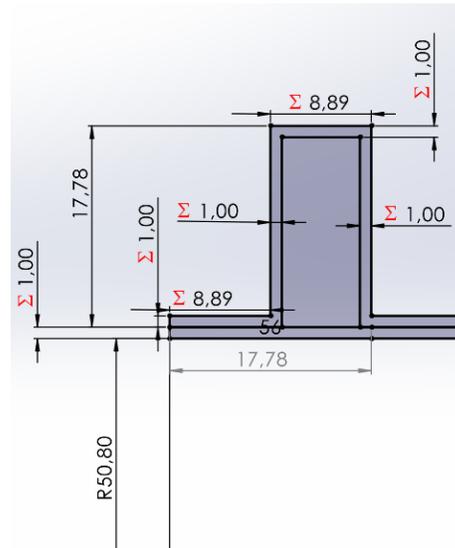
(c) Perfil De corruga de HDPE simplificada, espesor 0,7mm.



(d) Perfil De corruga de HDPE simplificada, espesor 0,8mm.

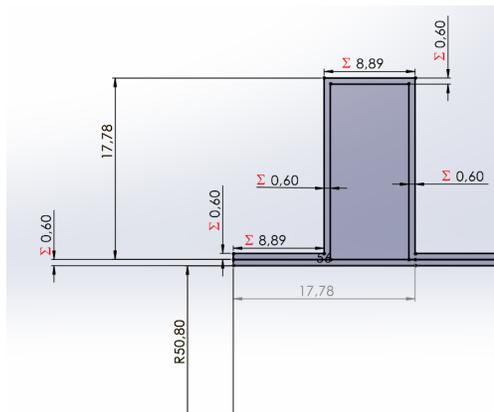


(e) Perfil De corruga de HDPE simplificada, espesor 0,9mm.

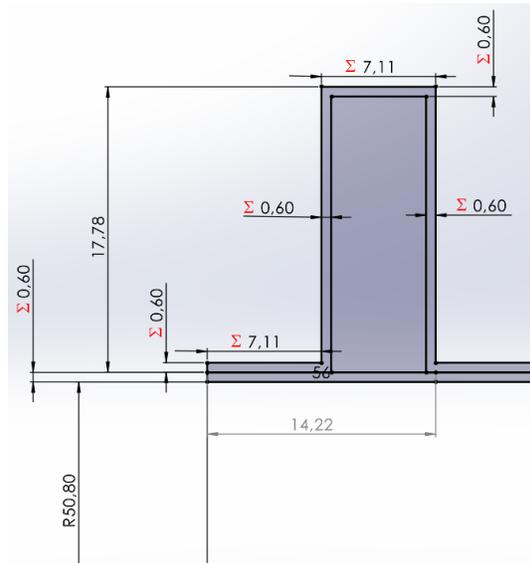


(f) Perfil De corruga de HDPE simplificada, espesor 1mm.

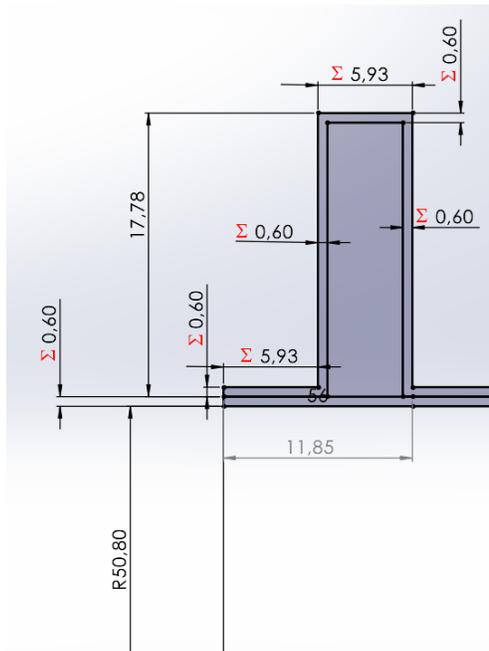
Figura 5: Variación de espesores de corruga



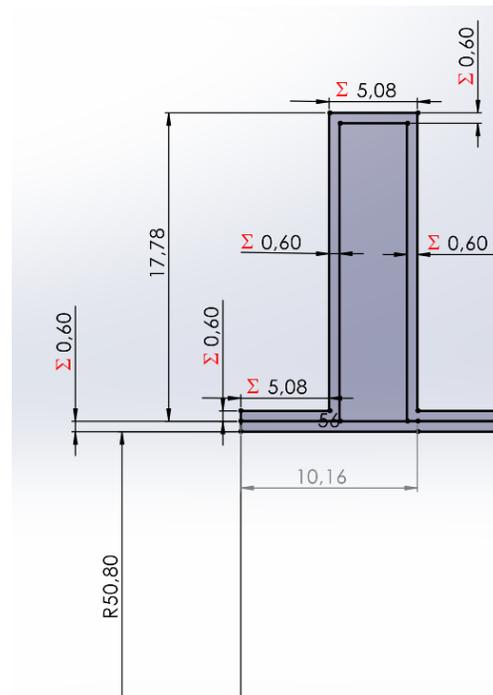
(a) Perfil De corruga de HDPE simplificada distancia original: 17,78 mm.



(b) Perfil De corruga de HDPE simplificada distancia modificada: 14,22 mm.



(c) Perfil De corruga de HDPE simplificada distancia modificada: 11,85,22 mm.



(d) Perfil De corruga de HDPE simplificada distancia modificada: 10,16 mm.

Figura 6: Variaciones de distancia entre corrugas de espesor:0,6mm

### 4.3. Mallado

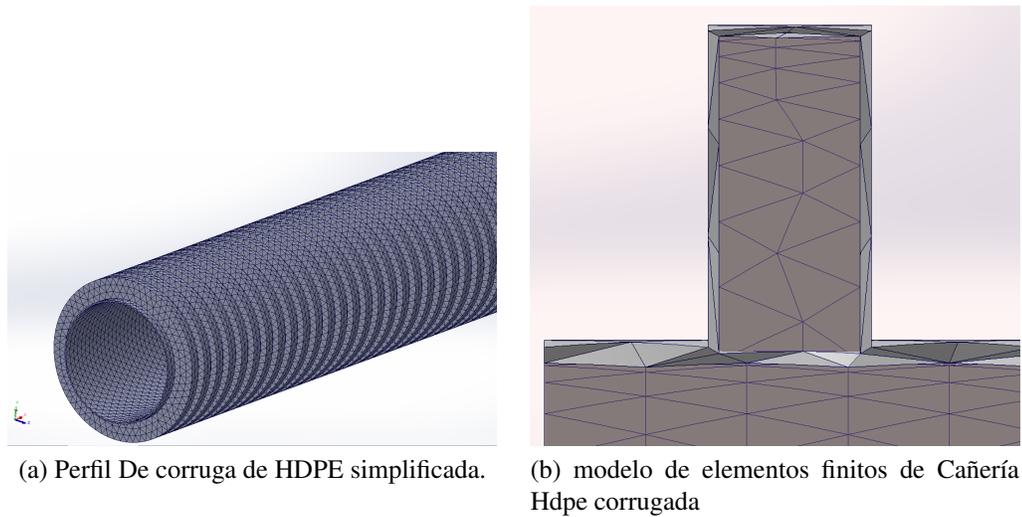


Figura 7: Creación de mallado del modelo

Con el objetivo de simplificar el comportamiento del modelo se considera una condición de pequeñas deformaciones de tal manera que se asume una linealidad entre la deformación y la carga aplicada. Además, se formula el modelo bajo un análisis lineal; Ya que se supone una relación lineal entre esfuerzo y deformación, se consideran pequeñas deformaciones y se asume un caso de cargas estáticas (sin efecto de cargas vivas).

En segundo lugar, el material de la tubería corresponde a un polímero de alta densidad catalogado como plástico-PE alta densidad el cual presenta un módulo elástico de  $1070 \text{ N/mm}^2$  y módulo de Poisson de 0,4101 se considera la tubería como una sola pieza sólida de este material.

Los parámetros en el mallado fig 8 preliminar fueron escogidos bajo la opción blended curvature-based mesh con elemento de tipo tetraedro cuadrático con la intención de que no hubiesen distorsiones en en las zonas de corruga adecuando los tamaños máximo y mínimo al valor más pequeño permitido por el software Solidworks.

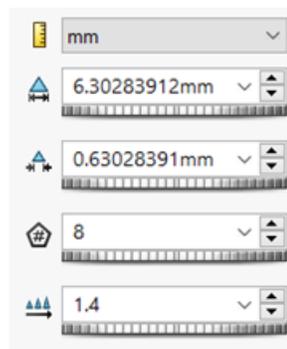


Figura 8: Parámetros de mallado de diseño base

## 4.4. Sujeciones

### 4.4.1. Empotrado

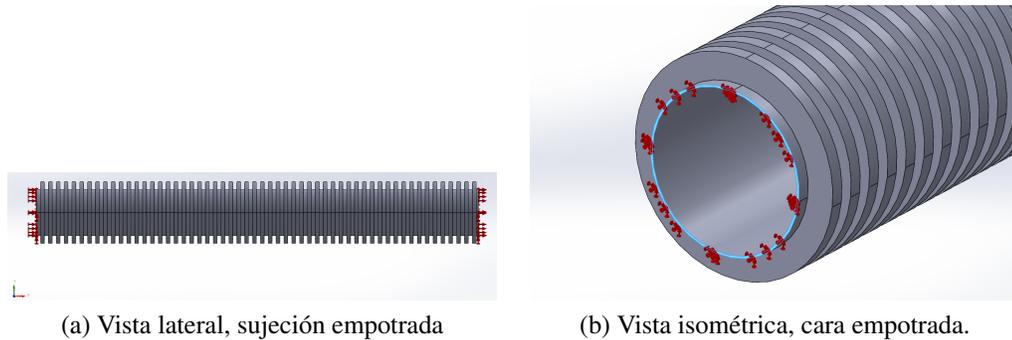


Figura 9: Sujeción de empotramiento.

### 4.4.2. Rodillo

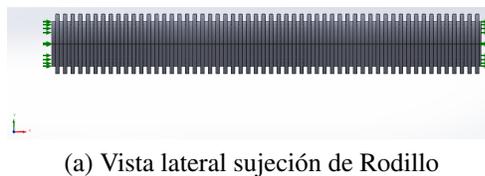


Figura 10: Cargas verticales uniformes.

### 4.4.3. Módulo de Winkler

Según el módulo de Winkler, el terreno se representa con una cama de resortes dispuestos de forma que sólo reaccione ante esfuerzos directos a lo largo del eje, asumiendo un comportamiento elástico lineal.

Estos resortes son considerados independientes unos de otros, lo que quiere decir que, aplicando una fuerza en un punto del terreno, solo el punto cargado producirá el asiento, mientras que en la práctica el terreno muestra un tipo de continuidad por la cual, además del área cargada el área circundante también presenta un tipo de asiento, representado como la zona en verde en la figura a continuación.

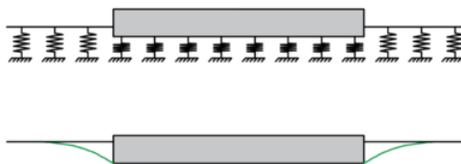


Figura 11: Representación de deformación terreno con lecho de resortes (Módulo de Winkler)

Los resortes tienen una rigidez  $k$ , llamada también coeficiente de balasto o módulo de Winkler. Esta constante no es, una propiedad intrínseca del terreno, sino que también dependerá de la forma y dimensiones de la cimentación, de la distribución de las cargas, de la composición física del suelo y como se conforman sus estratos. Alternativamente, el valor de rigidez  $k$  puede ser definido en referencia a pruebas de carga sobre placas, para lo cual se considera una placa estándar de base cuadrada o circular de radio igual a 30 cm. A este valor calculado se puede hablar de un módulo de Winkler que depende solo de las características del terreno de cimentación y del cual sus valores típicos para los tipos de terreno pueden ser tabulados como se ve a continuación en la figura 12:

Consistencia	Compacta ( $C_U=50 \div 100$ kPa)	Muy compacta ( $C_U=100 \div 200$ kPa)	Dura ( $C_U > 200$ kPa)
Campo	18÷35	35÷70	> 70
valor sugerido	25	50	100

Figura 12: Valores de constantes de rigidez en función del suelo.

Se considera que en las pilas de lixiviación pese a que tienen que permitir la percolación también es necesario crear una ligera compactación de manera que no se generen caminos preferenciales del fluido percolado es por esto que se considera de consistencia compacta o de valor de rigidez  $k=25N/cm^3$ .

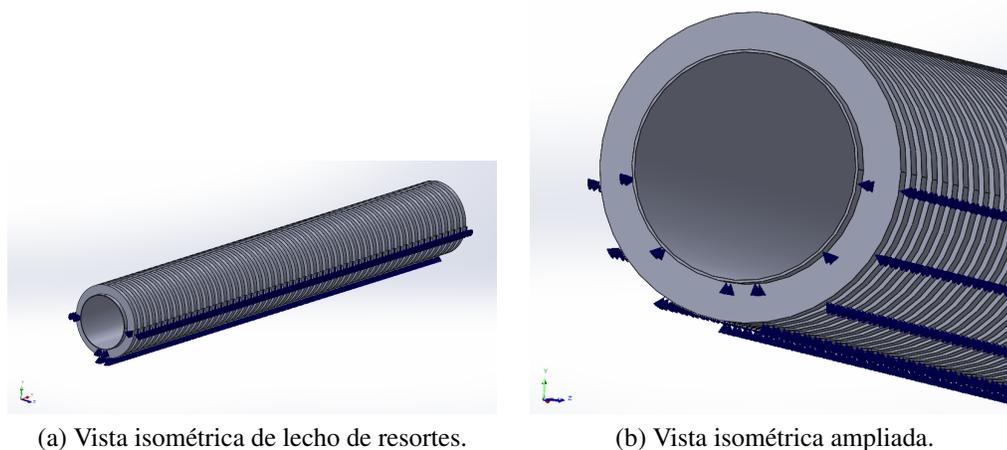


Figura 13: Disposición lecho resortes,  $k=25Ncm^3$

## 4.5. Modelamiento Cargas

En la figura a continuación muestra una columna de masa de suelo saturado y sin filtraciones de agua en distintas direcciones. El esfuerzo total en el plano de la zona A,  $\sigma$ , es obtenida tanto a partir de la unidad de peso saturada del suelo y la unidad de peso de agua por encima de ella. En este caso[6]:

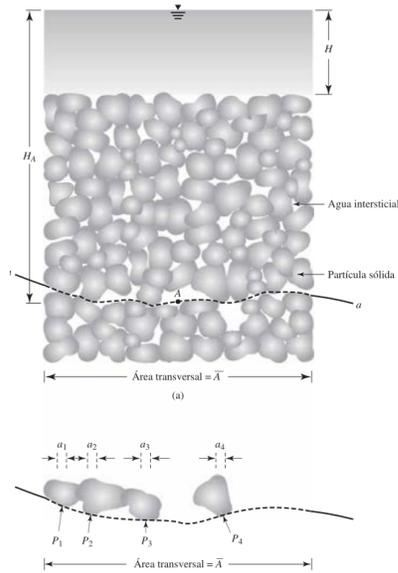


Figura 14: Consideración esfuerzo efectivo, columna de suelo saturado sin filtraciones

$$\sigma = H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat} \quad (20)$$

donde

- $\gamma_w$  = peso unitario del agua
- $\gamma_{sat}$  = peso unitario saturado del suelo.
- $H$  = Altura del nivel freático determinada desde la zona superior de la columna de suelo
- $H_A$  = Distancia entre el punto A y el nivel freático.

El esfuerzo total,  $\sigma$ , dado por la ecuación 20 se subdivide en 2 partes:

1. Una parte transportada por el agua en los intersticios vacíos. Actuando de igual intensidad en todas las direcciones.
2. la otra parte del esfuerzo total es realizado por las partículas de sólidos del suelo en sus puntos de contacto. La sumatoria de ambos componentes verticales de las fuerzas que se desarrollan en las zonas de contacto de las partículas de sólidos por unidad de área de sección transversal de la masa del suelo es llamada esfuerzo efectivo.

El concepto de esfuerzo efectivo es ilustrado en la figura anterior dibujando una línea ondulada, a-a, por el punto A que atraviesa de manera colindante con los puntos de contacto de las partículas sólidas. Si son  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  las fuerzas que actúan en los puntos de contacto de las partículas del suelo (figura 7). La sumatoria de sus componentes verticales sobre el área de sección transversal unitaria corresponde al esfuerzo efectivo,  $\sigma'$  o:

$$\sigma' = \frac{P_{1(v)} + P_{2(v)} + P_{3(v)} + \dots + P_{n(v)}}{\bar{A}} \quad (21)$$

donde  $P_{1(v)}, P_{2(v)}, P_{3(v)}, \dots, P_{n(v)}$  son las componentes verticales de  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ , respectivamente, y  $\bar{A}$  es el área de sección transversal de la masa del suelo a considerar. Una vez más, si  $a_s$  es el área de sección transversal ocupada por los contactos de sólido a sólido (es decir,  $a_s, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ ), entonces el espacio total ocupado por el agua es igual a  $(\bar{A} - a_s)$ .

De esta forma, se puede escribir

$$\sigma = \sigma' + \frac{u(\bar{A} - a_s)}{\bar{A}} = \sigma' + u(1 - a'_s) \quad (22)$$

donde

- $u = H_A \gamma_w$  = presión de agua intersticial (es decir, la presión hidrostática en A)
- $a'_s = \frac{a_s}{\bar{A}}$  = fracción de unidad de área de sección transversal de la masa de suelo ocupada por los contactos solido-sólido

El valor de  $a'_s$  es de valor despreciable debido a los rangos de presión que se encuentran para este tipo de casos. es por ello que la ecuación 20 puede ser aproximada a:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (23)$$

Donde  $u$  es también conocida como esfuerzo neutral. Sustituyendo la ecuación 20 por  $\sigma$  en la ecuación 23 se obtiene

$$\begin{aligned} \sigma' &= [H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}] - H_A\gamma_w \\ &= (H_A - H)(\gamma_{sat} - \gamma_w) \\ &= (\text{altura de la columna de suelo}) \times \gamma' \end{aligned} \quad (24)$$

Donde  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$  es el peso unitario del suelo sumergido. Por lo que es claro que el esfuerzo efectivo en cualquier punto A es independiente de la profundidad del agua, H, sobre el suelo sumergido, esto toma mayor importancia si consideramos que este suelo corresponde a una pila de lixiviación que es rociada con fluido en su superficie.

**Tabla 1: Pesos Unitarios Suelos o Esponjados de los Suelos.**

Tipos de suelos.	Peso Unitario (kg/m <sup>3</sup> )
Arcilla compactada.	1900
Arenisca compacta.	1600
Caliza blanda.	1900
Caliza dura.	2500
Marga.	2200
Serpentina.	2560
Yeso.	2300
Arcilla seca.	1700
Arcilla húmeda.	1760
Arena natural suelta.	1430
Arena natural compacta.	1620
Arena artificial suelta.	1450
Arena artificial compacta.	1650
Gravas.	1700
Tierra seca suelta.	1500
Tierra seca compacta.	1700
Tierra húmeda suelta.	1600
Tierra mojada compacta.	1800
Fango (fluido).	1750
Mármoles.	2640
Pizarra metamórfica.	2800
Granito.	2750

Figura 15: Tabla de pesos unitarios de suelos

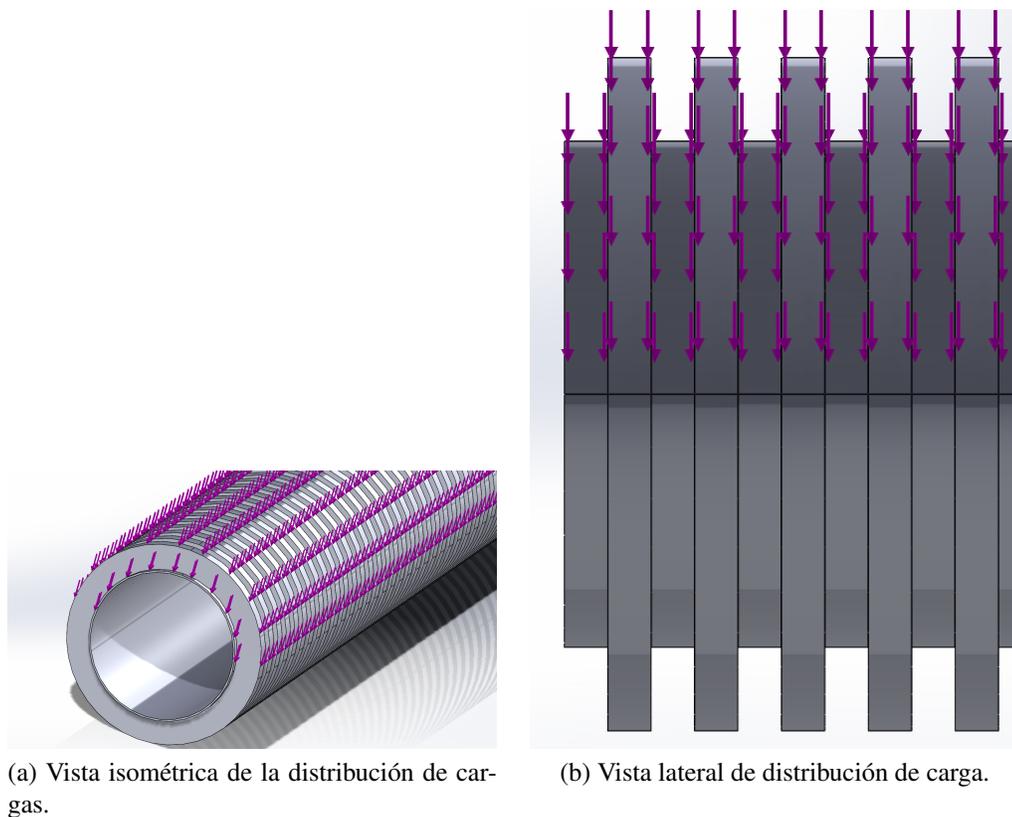


Figura 16: Cargas uniformes verticales

A continuación, se presentan los valores de esfuerzos y cargas de compresión vertical teóricos asociados a la tubería de espesor de corruga de 0,6 mm y distancia entre corruga de 17,78 mm la cual corresponde a la tubería estándar descrita en la sección 4.1.

Tabla 2: Esfuerzos y cargas aplicadas por tierras húmedas sueltas a distintas alturas de pila

Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Altura (m)	Esfuerzo compresión( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	Carga distribuida (kN)
1600	100	1571	159,6
	150	2357	239,5
	200	3142	319,3
	250	3928	399,1
	300	4714	478,9
	350	5499	558,7

Tabla 3: Esfuerzos y cargas aplicadas por arena artificial compacta a distintas alturas de pila

Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Altura (m)	Esfuerzo compresión( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	Carga distribuida (kN)
1650	100	1620	164,6
	150	2430	246,9
	200	3241	329,2
	250	4051	411,6
	300	4861	493,9
	350	5671	576,2

Tabla 4: Esfuerzos y cargas aplicadas por tierras seca compacta a distintas alturas de pila

Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Altura (m)	Esfuerzo compresión ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	Carga distribuida (kN)
1700	100	1669	169,6
	150	2504	254,4
	200	3339	339,2
	250	4174	424,0
	300	5008	508,8
	350	5843	593,6

Tabla 5: Esfuerzos y cargas aplicadas por tierras mojadas compactas a distintas alturas de pila

Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Altura (m)	Esfuerzo compresión( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	Carga distribuida (kN)
1800	100	1768	179,6
	150	2651	269,4
	200	3535	359,2
	250	4419	449,0
	300	5303	538,8
	350	6187	628,6

## 4.6. Cargas laterales

Para estimar la carga estática en un cuerpo consideramos la masa de suelo mostrada en la figura 8. La masa está limitada por una pared AB sin fricción que se extiende a una profundidad infinita. Un elemento de suelo situado a una profundidad  $z$  es sometido a presiones efectivas verticales y horizontales de  $\sigma$  y  $\sigma_h$ , respectivamente. Para este caso, ya que el suelo es seco, tenemos [7]

$$\sigma'_0 = \sigma_0$$

y

$$\sigma'_h = \sigma_h$$

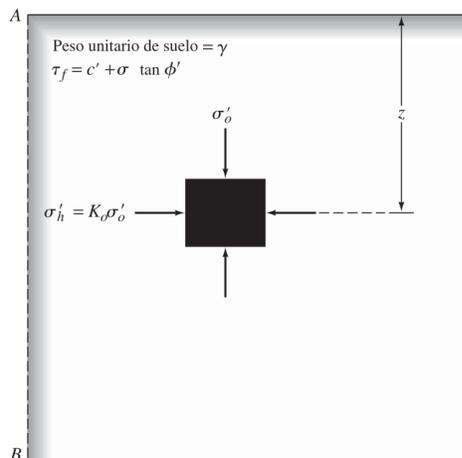


Figura 17: Cargas laterales en cañerías enterradas

Si la pared AB es estática, sin movimiento ni hacia izquierda ni hacia la derecha, la masa de suelo estará en un estado de equilibrio elástico o de deformación horizontal nula. La razón del esfuerzo horizontal efectivo a la tensión vertical se llama coeficiente de presión de tierra en reposo,  $K_0$ , o

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_0} \quad (25)$$

Ya que  $\sigma'_0 = \gamma z$ , tenemos

$$\sigma'_h = K_0(\gamma z) \quad (26)$$

Para suelos de grano grueso, el coeficiente de tierra en reposo puede ser estimado por la relación empírica (Jaky, 1944):

$$K_0 = 1 - \text{sen}\phi' \quad (27)$$

para grano fino ya consolidados, Massarsch (1979) propuso lo siguiente:

$$K_0 = 0.44 + 0.42\left[\frac{PI(\%)}{100}\right] \quad (28)$$

Donde:

PI corresponde al índice de plasticidad del suelo.

La magnitud de  $K_0$  en la mayoría de los suelos oscila entre 0.5 y 1.0, quizá con los valores más altos para arcillas altamente sobre consolidadas.

La figura 9 muestra la distribución de presión de tierra en reposo en una pared con altura  $H$ . Puesto que lo que se evaluará no es una pared  $AB$  si no que una cañería a una profundidad  $H$ , el valor de interés corresponde al módulo del esfuerzo para una altura de columna  $H$  y no el área triangular de esta.

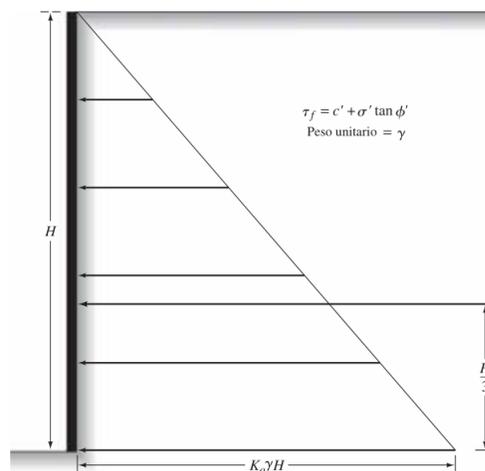
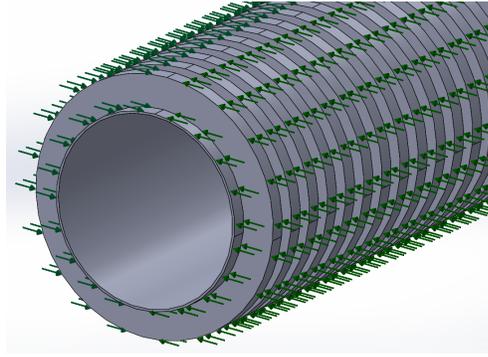


Figura 18: Cargas laterales en cañerías enterradas



(a) Vista isométrica de Esfuerzos laterales uniformes aplicados.

Tabla 6: Esfuerzos y cargas laterales a distintas alturas de pila para cobertura de grano fino

Constante de presión( $K_0$ )	Altura (m)	Esfuerzo ( $kN/m^2$ )	Carga distribuida (kN)
0,4	100	707	71,8
	150	1061	107,8
	200	1414	143,7
	250	1768	179,6
	300	2121	215,4
	350	2475	251,4

Tabla 7: Esfuerzos y cargas laterales a distintas alturas de pila para cobertura de grano medio

Constante de presión( $K_0$ )	Altura (m)	Esfuerzo ( $kN/m^2$ )	Carga distribuida (kN)
0,5	100	884	89,8
	150	1326	134,7
	200	1768	179,6
	250	2210	224,5
	300	2651	269,4
	350	3093	314,3

Tabla 8: Esfuerzos y cargas laterales a distintas alturas de pila para cobertura de grano grueso

Constante de presión( $K_0$ )	Altura (m)	Esfuerzo ( $kN/m^2$ )	Carga distribuida (kN)
0,6	100	1061	107,8
	150	1591	161,6
	200	2121	215,5
	250	2651	269,4
	300	3182	323,3
	350	3712	377,1

## 5. Utilización de Cande

Se propone la utilización del programa CANDE que es un programa de elementos finitos orientado específicamente para el análisis y diseño de estructuras enterradas que interactúan con el suelo. Como cajones, tuberías plásticas y ductos corrugados de diversos materiales. Este programa incluye una base de datos con diversos parámetros mecánicos de las secciones de la cañería, lo que permite una utilización más sencilla y expedita. Una de las ventajas de la utilización de este programa es la amplia gama de posibilidades como: Permitir modelar las etapas de aplicación de rellenos, visualización de interacción estructura-suelo (fig 19), contemplar comportamientos no lineales tanto del suelo como de la estructura, diferenciar el suelo en secciones distintas.

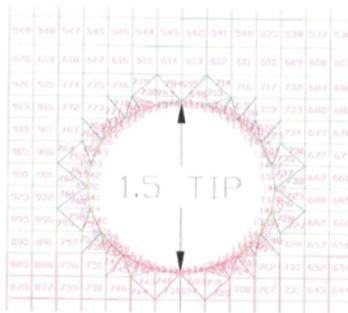


Figura 19: Detalle elementos BEAM Y QUAD que conforman la pared de una de las tuberías y el relleno respectivamente.

Además, permite visualizar los esfuerzos generados al interior de las masas de tierra que aunque no es requerimiento para el diseño de las cañerías Sirven para motivos ilustrativos (fig 20).

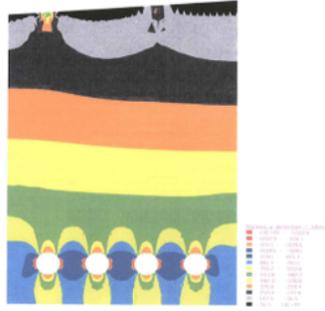


Figura 20: Esfuerzos verticales en el suelo.

## 6. Conclusión

Queda en evidencia la importancia de la composición del suelo ya sea para determinar esfuerzos verticales y laterales influyendo en sus pesos unitarios y constantes de presión respectivamente como también en la reacción de este suelo como soporte dependiendo la compacidad de este.

Si bien la pieza de cañería fue modelada y parametrizada en su completitud se pudieron apreciar las limitaciones en la utilización del solidworks, no solo en el tamaño de mallado el cual no lograba definir grosores de dimensiones acordes al espesor de la corruga (6 décimas de milímetro) sino que también en las limitantes al momento de definir la interacción de cañería suelo, para lo cual se estimo más competentes softwares como CANDE que ya ha sido utilizado en conformidad en proyectos similares con mayor libertad permitiendo incluso la simulación de viscosidad del suelo con el tiempo o la sobre consolidación de estos.

## 7. Carta Gantt

La carta Gantt preliminar se configura de la siguiente manera:

Nº	Tarea/Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	EX1	EX2
1	Recopilación de Antecedentes	■	■															
2	Diseño general tubería			■	■	■	■											
3	Variación area efectiva de la corruga							■	■									
4	Variación de distancia entre corruga									■	■							
5	Variación de altura de cover											■	■	■				
6	Variación de tipo de cover													■	■	■		
7	Preparación y presentación de informes	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

Figura 21: Carta Gantt inicial para el trabajo de título

## 8. Recursos

Como recursos no pecuniarios requerido se considera un software para diseño de elementos finitos habilitado por parte de la Facultad. Como recurso pecuniarios se considera una remuneración del tesista y se contempla la posibilidad de una salida de reconocimiento de planta.

# Bibliografía

- [1] Universidad de Barcelona. Materiales. Polietileno de Alta Densidad.  
<http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad>
- [2] Velez, Eddie. (2021). Propiedades del HDPE: sus ventajas y por qué se usa para estibas plásticas.  
<https://soliplast.com/ventajas-y-beneficios/propiedades-hdpe>
- [3] Tigres-ASD. (2010) Manual de Ingeniería TIGRE-ADS, capítulo 2, Estructuras
- [4] Di Giammarino et al. (2019). Análisis de Tuberías Enterradas - Depósitos de Gran Altura
- [5] Nota técnica ADStigre 3.107B, Especificación para Tubos Corrugados de Polietileno Interior Liso DrenPro HD
- [6] Braja M. Das, (2015), Fundamentos de Ingeniería geotécnica, Cuarta Edición.
- [7] Braja M. Das, 2012, Fundamentos de ingeniería de cimentaciones, Séptima edición.