



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

**USO DE TUBERÍAS DE HDPE CORRUGADO DE 3", 4", 6" Y 8" EN PILAS
DE LIXIVIACIÓN DE HASTA 100 METROS DE ALTURA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DIEGO ALONSO FLORES FERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO JORQUERA ENCINA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO PALMA HILLERNS
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:

Tigre-ADS CHILE
SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN

A pesar de ser manufacturadas a partir de un material con propiedades y características importantes para su aplicación, el uso de tuberías corrugadas de HDPE se limita hoy a pruebas de ensayo y error, no existiendo aún una normativa aplicada a su uso minero capaz de condensar todas las bases y criterios de diseño necesario para su correcto desempeño.

El objetivo general de este trabajo es estudiar el límite de aplicación de tuberías corrugadas de HDPE de 3, 4, 6 y 8 [in] en pilas de lixiviación estáticas de sobre 100 [m]. Para esto, se plantean los siguientes objetivos específicos: Definir criterios de diseño mediante el estudio del estado de arte y bibliografía actual respecto al uso de tuberías de HDPE en aplicaciones mineras, obtener límites de carga y/o deformación tras analizar los resultados de pruebas mecánicas de compresión a realizar en laboratorio mediante máquina universal de ensayos y determinar la altura máxima posible de la pila para cada tubería estudiada en base a los límites obtenidos al analizar los ensayos.

A fin de lograr cumplir estos objetivos, la metodología planteada consiste en lo que detallan los objetivos específicos. Se comienza finalizando el estudio de antecedentes actuales al mismo tiempo que se comienzan los ensayos de compresión. Posteriormente se analizan los resultados obtenidos a fin de poder señalar el punto máximo de funcionamiento de las tuberías según sus límites de servicio (fallas por deflexión, compresión o pandeo) y disponer de esta información para la actualización de la normativa en torno a este punto.

Para llevar a cabo el presente trabajo de titulación serán necesarios recursos como máquina de compresión universal, muestras de ensayo de tuberías corrugadas de HDPE y los implementos necesarios para ejecutar las pruebas, siendo estos recursos facilitados por la empresa Tigre-ADS Chile. Una vez realizadas las mediciones y ensayos necesarios se determinan los resultados. Estos muestran que para un límite de deformación de un 5 %, las cargas vivas transmitidas únicamente por el camión deforman esta cantidad la tubería, por lo que no podría ser utilizada para estas aplicaciones. Sin embargo, las pruebas muestran resultados favorables a mayores deformaciones, llegando a un 70 % sin afectar al límite de servicio del tubo. Así, se utiliza el nuevo límite de deformación planteado correspondiente a un 40 %.

Con este límite de 40 % es posible determinar que las alturas permitidas serán mayores a 100 [m] para las tuberías de 3", 4z 6". Sin embargo, los ensayos de compresión realizados muestran que las curvas de deformación y esfuerzos reales en el caso de las tuberías de 3.^{es} siempre mayor a la esperada, sin embargo para las tuberías de 4", 6z 8", al pasar un 32 % de deformación tienen un límite menor en la realidad, bajo el cuál no logran llegar al límite propuesto de 100 [m] de altura, siendo finalmente la tubería de 3"la única tubería que lograría soportar pilas de hasta este punto.

Estudios futuros podrían comprobar que en condiciones menos favorables la tubería aún es capaz de superar este 40 % de deformación límite, pudiendo ser considerados los otros diámetros estudiados para su uso en pilas de lixiviación de alturas mayores a 100 [m].

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Antecedentes Básicos	1
1.2.1. HDPE	1
1.2.2. Estado de Arte Actual	2
1.2.3. Aplicación a estudiar en pilas de lixiviación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Alcances	3
2. Antecedentes	4
2.1. Tuberías Corrugadas	4
2.2. Criterios de diseño	4
2.2.1. Propiedades de la Sección	4
2.2.2. Propiedades del Material	4
2.2.3. Condiciones de Instalación	5
2.2.4. Cargas	5
2.3. Procedimiento para Diseño de Tuberías	7
2.3.1. Esfuerzo Normal de Pared	7
2.3.2. Pandeo	9
2.3.3. Deformación por compresión	10
2.3.4. Deformación por flexión	10
2.3.5. Deformación combinada	11
2.4. Límite de Servicio en Tuberías Corrugadas	12
2.5. Consideraciones	13
2.6. Datos a utilizar	14
2.6.1. Datos tuberías	14
2.6.2. Propiedades HDPE	14
2.6.3. Peso unitario roca y material de relleno	14
2.6.4. Módulo de elasticidad material de relleno	14
3. Metodología y Carta Gantt	15
3.1. Metodología	15
3.2. Carta Gantt	16
3.3. Recursos	17
4. Resultados y Análisis	18

4.1.	Factores de carga viva y muerta	18
4.2.	Área efectiva	18
4.3.	Resultados con deformación límite de 5%	21
4.3.1.	Resultados esfuerzos normales combinados a corto y largo plazo . . .	21
4.3.2.	Cálculo fuerza crítica de Pandeo	26
4.3.3.	Resultados deformación límite	26
4.4.	Resultados de ensayos de compresión	28
4.5.	Resultados con deformación límite de 40%	31
4.5.1.	Resultados esfuerzos normales combinados a corto y largo plazo . . .	31
4.5.2.	Resultados deformación límite	37
4.5.3.	Comparación para deformación por esfuerzos teóricos y resultados ex- perimentales	40
5.	Conclusiones y trabajos futuros	44
	Bibliografía	45

Índice de Tablas

2.1.	Datos de tuberías según diámetro[1]	14
2.2.	Propiedades HDPE con 5 % de deformación límite[1]	14
2.3.	Peso unitario roca y material de relleno[9][10]	14
2.4.	Módulo de elasticidad aproximado de grava compactada[11]	14
4.1.	Factores de carga[7]	18
4.2.	Promedio y desviación porcentual para el largo de los elementos del perfil . . .	18
4.3.	Promedio y desviación porcentual para el ancho de los elementos del perfil . .	19
4.4.	Área efectiva según el diámetro	19
4.5.	Módulo confinado de suelo a utilizar para cada diámetro	19
4.6.	Esfuerzos por carga viva y factor de arqueamiento vertical	20
4.7.	Esfuerzos críticos a corto y largo plazo según diámetro de la tubería con defor- mación admisible de 5 %	21
4.8.	Altura máxima de la pila debido a esfuerzos críticos	25
4.9.	Fuerza crítica de pandeo	26
4.10.	Propiedades HDPE con deformaciones mayores a 10 %[12]	31
4.11.	Esfuerzos críticos a corto y largo plazo según diámetro de la tubería con defor- mación admisible de 40 %	32
4.12.	Altura máxima de la pila debido a esfuerzos críticos para deformaciones de 40 %	37
4.13.	Altura máxima de la pila debido a deformación límite	40
4.14.	Altura máxima de la pila debido a deformación límite considerando resultados de ensayos	43

Índice de Ilustraciones

1.1.	Esquema pila lixiviación estática	2
2.1.	Detalle perfil idealizado [1]	9
2.2.	Mecanismos de falla tuberías flexibles	12
3.1.	Propuesta de Carta Gantt	16
4.1.	Esfuerzos por carga muerta según altura de la pila y diámetro de la tubería . .	20
4.2.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 3[in]	21
4.3.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 3[in]	22
4.4.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 4[in]	22
4.5.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 4[in]	23
4.6.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 6[in]	23
4.7.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 6[in]	24
4.8.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 8[in]	24
4.9.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 8[in]	25
4.10.	Deformación en tubería de 3 [in] según altura de la pila	26
4.11.	Deformación en tubería de 4 [in] según altura de la pila	27
4.12.	Deformación en tubería de 6 [in] según altura de la pila	27
4.13.	Deformación en tubería de 8 [in] según altura de la pila	28
4.14.	Prueba a tubería 3 [in]	29
4.15.	Prueba a tubería 4 [in]	29
4.16.	Prueba a tubería 6 [in]	29
4.17.	Prueba a tubería 8 [in]	29
4.18.	Resultados ensayos al 70 % tubería 3 [in]	30
4.19.	Resultados ensayos al 70 % tubería 4 [in]	30
4.20.	Resultados ensayos al 70 % tubería 6 [in]	30
4.21.	Resultados ensayos al 70 % tubería 8[in]	30
4.22.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 3[in] para deformaciones mayores a 10 %	32
4.23.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 3[in] para deformaciones mayores a 10 %	33
4.24.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 4[in] para deformaciones mayores a 10 %	34
4.25.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 4[in] para deformaciones mayores a 10 %	34
4.26.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 6[in] para deformaciones mayores a 10 %	35
4.27.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 6[in] para deformaciones mayores a 10 %	35

4.28.	Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 8[in] para deformaciones mayores a 10 %	36
4.29.	Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 8[in] para deformaciones mayores a 10 %	36
4.30.	Deformación en tubería de 3 [in] según altura de la pila	38
4.31.	Deformación en tubería de 4 [in] según altura de la pila	38
4.32.	Deformación en tubería de 6 [in] según altura de la pila	39
4.33.	Deformación en tubería de 8 [in] según altura de la pila	39
4.34.	Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 3[in] .	41
4.35.	Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 4[in] .	41
4.36.	Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 6[in] .	42
4.37.	Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 8[in] .	42

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Las normas de diseño actuales respecto al uso de tuberías corrugadas de HDPE se limitan a normas de producto y especificaciones de diseño para su uso en carreteras, reduciendo de esta forma su uso de manera general ya que para su aplicación en otros ámbitos se deben someter a pruebas de ensayo y error según el ámbito en que se encuentran, significando costos y tiempos adicionales para un proyecto.

Considerando que el HDPE tiene propiedades altamente relevantes para la ingeniería y minería, en particular para su aplicación en tuberías corrugadas, tales como gran resistencia mecánica, química y flexibilidad, se hace necesario contar con una norma de diseño para su aplicación en minería que englobe las bases y criterios necesarios para asegurar que estas estarán operando correctamente durante los plazos requerido.

1.2. Antecedentes Básicos

1.2.1. 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, baja densidad, flexibilidad, facilidad para su manufactura mediante inyección o extrusión y la posibilidad de ser reciclado, siendo así un material idóneo para una amplia gama de 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.

[5]

1.2.2. Estado de Arte Actual

Actualmente, el uso de tuberías corrugadas de HDPE se encuentra limitado a la experiencia y pruebas de ensayo y error. En la actualidad solo existen normas de producto y las Especificaciones de Diseño de Puentes AASHTO LRFD, donde se definen las bases de diseño únicamente para condiciones de uso carretero, donde se exige un máximo de deformación del 5%. Sin embargo, diversos estudios señalan que las tuberías corrugadas de HDPE podrían soportar hasta un 40% de deformación sin romperse estas o las uniones, haciendo necesario contar con una norma general de diseño que englobe las bases y criterios con los que realizar los cálculos necesarios para así poder asegurar su operación sin fallas durante la vida útil de un proyecto. [14]

1.2.3. Aplicación a estudiar en pilas de lixiviación

En pilas de lixiviación las tuberías corrugadas de HDPE pueden ser utilizadas para distintos propósitos, como pueden ser: recolección del mineral, aireación de la pila o sistemas de drenaje. Dentro de estos, aquellas que se verán sometidas a mayores y más dinámicos esfuerzos serán las tuberías usadas para la recolección, en particular en pilas estáticas, donde se ha llegado a plantear y ejecutar por empresas mineras proyectos con pilas de altura mayor a los 100[m].

Para la ejecución del proceso de recolección, como es posible ver en la figura 1.1, se dispone en primer lugar una geomembrana de HDPE, LDPE o hasta PVC dependiendo de la solución ácida utilizada para el proceso de lixiviación. Esta geomembrana tiene la función de evitar que esta solución escurra hacia los suelos de fundación. Sobre esta geomembrana serán dispuestas las tuberías corrugadas de HDPE para la recolección, las cuales serán cubiertas posteriormente con un material de relleno (cover) para dar mayor durabilidad a la tubería y que también puede actuar como filtro o material drenante. Sobre esta capa de cover será finalmente dispuesto el material pétreo a lixiviar mediante el sistema de riego. [15][16]

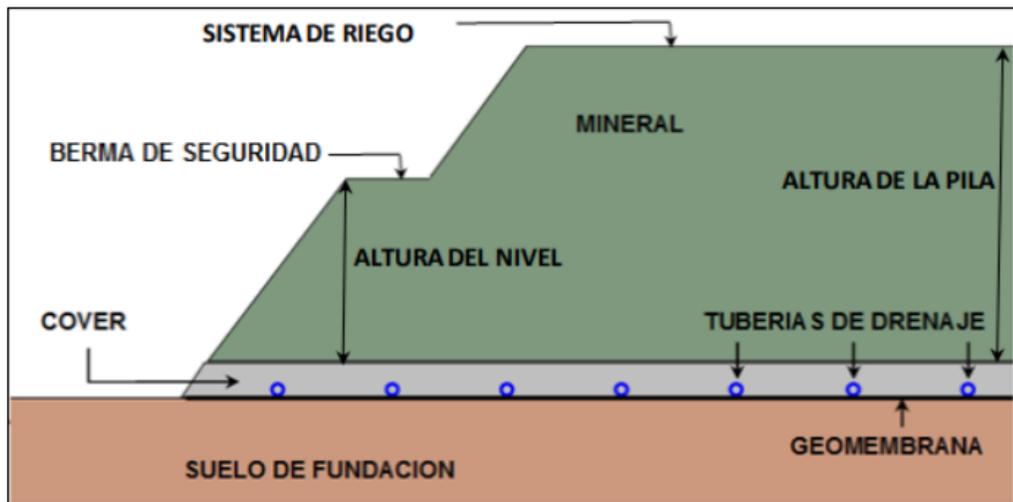


Figura 1.1: Esquema pila lixiviación estática

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es estudiar el límite para el uso en recolección de material de tuberías corrugadas de HDPE de 3, 4, 6 y 8 [in] en pilas de lixiviación estáticas de 100 [m] de altura

1.3.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos planteados para este trabajo son:

1. Definir criterios de diseño mediante el estudio del estado de arte y bibliografía actual respecto al uso de tuberías de HDPE en aplicaciones mineras.
2. Obtener límites de carga y/o deformación tras analizar los resultados de pruebas mecánicas de compresión a realizar en laboratorio mediante máquina universal de ensayos.
3. Determinar altura máxima posible de la pila para cada tubería estudiada en base a los límites obtenidos al analizar los ensayos.

1.4. Alcances

Los alcances de este trabajo abarcan desde el estudio del estado de arte y normativa actual respecto al uso de las tuberías de HDPE corrugado con diámetros de 3", 4", 6z 8" hasta el estudio de su posible uso como tuberías de recolección en pilas de lixiviación estáticas de alturas mayores o iguales a 100[m], esto con la finalidad de obtener valores límites para su uso en este tipo de aplicación y así contar con la información necesaria en este ámbito para crear una norma al respecto. Fuera de este trabajo quedan las consideraciones para cualquier otro tipo de aplicación diferente a la minería en pilas de lixiviación estática o uso en aireación o sistemas de drenaje, así como también los detalles del proceso de manufactura de las tuberías corrugadas e incluyendo la determinación de las propiedades del material, las que se obtendrán de la bibliografía estudiada. Finalmente, la redacción final de la norma también queda fuera de los alcances de este trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Tuberías Corrugadas

Dependiendo de su desempeño, es posible clasificar el comportamiento de una tubería como flexible (tuberías corrugadas) o rígido (tubería lisa). En particular una tubería corrugada debe ser capaz de moverse y deflectarse sin sufrir daños significativos para así ser capaz de 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, ya que para esta aplicación es necesario un material de relleno, el tipo de material a utilizar para esto y 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.

[1]

2.2. 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.

2.2.1. 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).

2.2.2. 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. Esto ocurre debido a la relajación de esfuerzos, propiedad de los materiales viscoelásticos que señala una disminución en la tensión para un elemento que se mantiene flexionado en una misma po-

sición. 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.

2.2.3. 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 se obtiene como 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'), 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.

2.2.4. 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 ferreas 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:

$$P_{sp} = \frac{(\gamma_s)(H + 0.11 \frac{OD}{12})}{144} \quad (2.1)$$

Donde:

- H : profundidad de instalación [ft]
- γ_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:

$$VAF = 0.76 - 0.71 \frac{S_h - 1.17}{S_h + 2.92} \quad (2.2)$$

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:

$$W_{sp} = P_{sp} \cdot VAF \quad (2.3)$$

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:

$$P_W = \frac{\gamma_W(H_W)}{144} \quad (2.4)$$

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]

2.3. Procedimiento para Diseño de Tuberías

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 según la complejidad de la situación.

Si bien es reconocido que las unidades utilizadas para el cálculo de esfuerzos son pascales en el sistema internacional, y psi en el sistema anglosajón (lb/in^2), en este caso las unidades para el esfuerzo estarán mostradas inicialmente en lb/in y luego en los resultados como kg/m . Esto se debe a que el área de las tuberías está representada como área de sección por pulgada, en unidades de in/in^2 , así, se recomienda trabajar con estas unidades ya que facilitan el manejo de datos durante el proceso de cálculos. [1]

2.3.1. 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: [1]

$$T_L = T_{cp} + T_{lp} = (F_{cv}P_lC_l\frac{OD}{2}) + (F_{ct}W_{sp} + F_{ca}P_W)(\frac{OD}{2}) \quad (2.5)$$

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 [refcamion]
- 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 por las ecuaciones: [1]

$$T_{trac} = (F_y A) F_{trac} \quad (2.6)$$

$$T_{comp} = (F_y A_{eff}) F_{comp} \quad (2.7)$$

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_{trac} : factor de carga tracción
- F_{comp} : factor de carga compresión

Siendo el área efectiva de pared referida en la ecuación 2.8 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 cual representa al perfil real simplificado mediante el uso de rectas (figura 2.1). 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: [1]

$$A_{eff} = A - \frac{\sum(1 - \rho_i)w_i t_i}{\omega} \quad (2.8)$$

Donde:

- A : área de pared por unidad de largo [in^2/in]
- w_i : largo individual de cada elemento del perfil [in]
- t_i : espesor individual de cada elemento del perfil [in]
- ω : paso del perfil (distancia entre valles) [in]

El valor representado por ρ_i es el factor de ancho efectivo, determinado por la ecuación:

$$\rho_i = \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda_i}}{\lambda_i} \leq 1 \quad (2.9)$$

Aquí, λ_i representa el factor de esbeltez, y está dado por:

$$\lambda_i = \frac{w_i}{t_i} \sqrt{\frac{\epsilon}{k}} > 0.673 \quad (2.10)$$

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

- ϵ : límite en la deformación del material [in/in]

Finalmente el límite de deformación del material ϵ está dado por: [1]

$$\epsilon = \frac{T_L}{AE} \quad (2.11)$$

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 2.1 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]

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

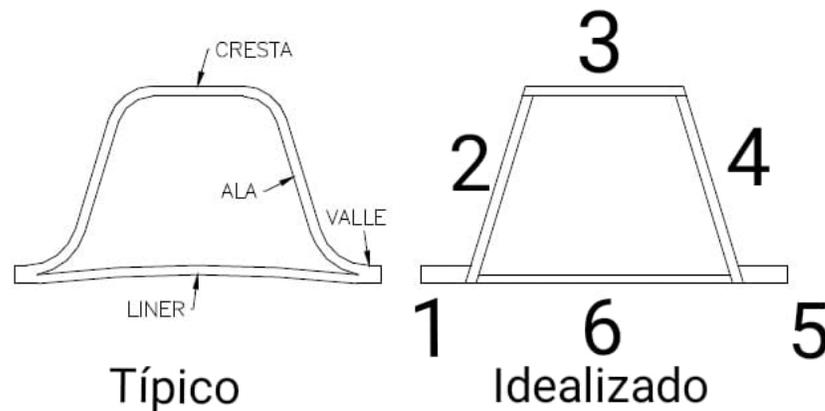


Figura 2.1: Detalle perfil idealizado [1]

2.3.2. Pandeo

La posibilidad de pandeo en la pared de la tubería queda determinada por la condiciones de suelo y las propiedades del perfil de la tubería. La tensión crítica de pandeo así queda dada por la ecuación: [1]

$$f_{cr} = 9.24 \frac{R}{A_{eff}} \sqrt{B'(H) R_w(h_g) M_s \frac{EI}{0.149R^3}} \quad (2.12)$$

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]
- $B' = \frac{1}{1+4e^{-0.065H}}$: 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. [1]

2.3.3. 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: [1]

$$\epsilon_{comp} = \frac{T_{lp}}{A_{eff} E_{50}} + \frac{T_{cp}}{A_{eff} E} \quad (2.13)$$

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]

2.3.4. 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: [1]

$$\Delta = \Delta_c ID - \frac{\epsilon_{comp}(ID + 2c)}{F_{ct}} \quad (2.14)$$

Donde:

- Δ : deflexión del tubo [in]
- Δ_c : deflexión límite inducida [in]
- ID : diámetro interno de la tubería [in]
- ϵ_{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: [1]

$$\epsilon_{flex} = 1.5 D_f \left(\frac{c_x}{R} \right) \left(\frac{\Delta}{ID + 2c} \right) \quad (2.15)$$

Donde:

- D_f : factor de forma
- Δ : 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]

2.3.5. 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: [1]

$$\epsilon_{comb} = \epsilon_{flex} + \epsilon_{comp} \frac{1.5}{F_{ct}} \quad (2.16)$$

Donde:

- ϵ_{flex} : deformación unitaria por flexión [in/in]
- ϵ_{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: [1]

$$\epsilon_{crcomp} = \frac{F_{def}F_y}{E_{50}} \quad (2.17)$$

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: [1]

$$\epsilon_{ctrac} = \epsilon_{flex} \frac{1.5}{F_{ct}} \quad (2.18)$$

Donde:

- ϵ_{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: [1]

$$\epsilon_{ctrac} = 1.5\epsilon_{ctrac} \quad (2.19)$$

Donde:

- ϵ_{ctrac} : deformación unitaria por tracción [in/in]

2.4. Límite 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 2.1. [2]

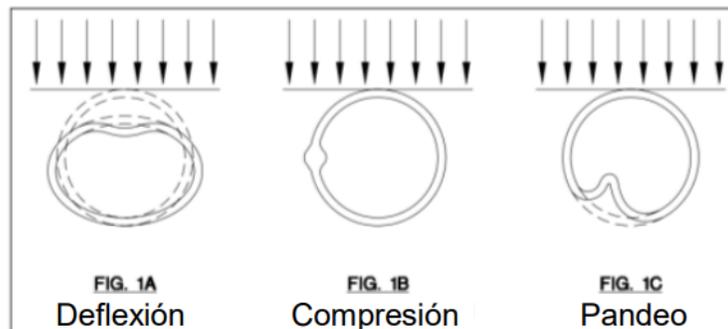


Figura 2.2: Mecanismos de falla tuberías flexibles

2.5. Consideraciones

Para el desarrollo del presente trabajo se considerarán los siguientes puntos:

- La profundidad mínima recomendada para instalar tuberías corrugadas, por norma, es de al menos un metro. Sin embargo, debido al gran peso de los camiones que transportan la roca, el material de relleno para la zanja a utilizar corresponderá únicamente a grava compactada al menos en un 95 %, ya que esto permite que las tuberías tengan una mejor respuesta a los impactos por carga viva, y tendrá una profundidad mínima de 4.9[m] para disminuir el factor de impacto. [6] [7]
- El máximo esfuerzo de compresión no se ha logrado determinar de manera concluyente, por lo que se utilizarán los valores determinados para el máximo esfuerzo de tracción ya que este siempre es menor, obteniéndose resultados más conservadores. [1]
- No se considerarán cargas de agua ni presión hidrostática.
- Si bien las tuberías usadas en este tipo de lixiviación suelen tener un diámetro interno de 4 a 6 [in], en este caso se realizarán pruebas también a tuberías de 3 y 8 [in] para estudiar su comportamiento en estas aplicaciones.
- Los manuales de la empresa Tigre-ADS cuentan con resistencia a la tracción del HDPE para deformaciones de hasta un 5 %, para el resto de los cálculos con mayor deformaciónn será utilizado el valor de la ficha técnica de Duraflex y Corporación Emacín, los cuales cuentan con valores para la resistencia a la compresión para deformaciones de un 10 %. [12]
- En condiciones de instalación estandar y sin presión interna ejerciéndose sobre la tubería, los esfuerzos normales siempre serán de compresión. Esfuerzos normales de tracción son iguales a 0. [1]
- Los esfuerzos máximos y módulo de elasticidad a largo plazo están pensados para ciclos de 50 a 75 años, sin embargo en esta clase de pilas de lixiviación los ciclos de trabajo están entre 2 y 25 años, mucho menores a los considerados. Así, se considerarán las propiedades para largo plazo altamente conservadoras al momento de realizar los análisis de resultados. [8]
- Debido a que los diámetros de las tuberías son diseñados en pulgadas, y los manuales presentan las ecuaciones de diseño utilizando el sistema anglosajón de unidades, los cálculos presentados inicialmente se harán tomando en cuenta estas unidades y no aquellas del sistema internacional. No obstante, los resultados finales serán presentados en ambos sistemas de unidades.

2.6. Datos a utilizar

2.6.1. Datos tuberías

Tabla 2.1: Datos de tuberías según diámetro[1]

ID [in]	OD [in]	Rigidez [psi]	A [in^2/in]	c [in]	cx [in]	I [in^4/in]	Paso [in]
3	3.63	50	0.073	0.109	0.200	0.0099	2.167
4	4.71	50	0.097	0.127	0.229	0.0014	1.583
6	6.98	50	0.141	0.190	0.300	0.0037	1.500
8	9.43	50	0.189	0.252	0.461	0.0097	1.040

2.6.2. Propiedades HDPE

Para 5 % de deformación máximo:

Tabla 2.2: Propiedades HDPE con 5 % de deformación límite[1]

Corto Plazo		Largo Plazo (50 años)	
Fy_i [psi]	3000	Fy_{50} [psi]	900
E_i [psi]	110000	E_{50} [psi]	22000

2.6.3. Peso unitario roca y material de relleno

Tabla 2.3: Peso unitario roca y material de relleno[9][10]

Densidad [lb/ft^3]	
Roca	168.6
Relleno	140

2.6.4. Módulo de elasticidad material de relleno

Tabla 2.4: Módulo de elasticidad aproximado de grava compactada[11]

E [psi]	10000
---------	-------

Capítulo 3

Metodología y Carta Gantt

En esta sección se mencionaran y describirán los pasos a seguir para cumplir los objetivos planteados anteriormente.

3.1. Metodología

1. **Recopilación de antecedentes:** Al comenzar con el desarrollo del trabajo de título, se finaliza la recopilación de los antecedentes necesarios para el estudio planteado.
2. **Redacción criterios generales de diseño y actualización estado de arte:** Tras condensar el análisis de antecedentes recopilados para el uso de tuberías corrugadas de HDPE, se procede a redactar un informe pertinente a los criterios generales de diseño para su aplicación, a fin de actualizar el estado de arte del material.
3. **Realización de ensayos de compresión:** Mediante el uso de una máquina universal de ensayos se realizan pruebas de compresión a muestras de ensayo. Inicialmente se realizarán pruebas mediante el método ASTM D2412, el cual constituye un ensayo de compresión en el cual las tuberías son aplastadas por una máquina universal de ensayos y llevadas hasta un 40 % de deformación en 3 posiciones diferentes: 0°, 45° y 90°. En caso de que las tuberías logren pasar estas pruebas sin fallas, se realizarán pruebas para mayores deformaciones con el fin de buscar cual es el punto máximo de deformación previo a la falla. [13]
4. **Toma de medidas para determinar A_{eff} :** Para poder determinar correctamente el área efectiva donde se ejercerá la fuerza sobre la tubería es necesario tomar medidas mediante el uso de herramientas de precisión a un gran número de muestras. En este caso, se utiliza un micrómetro digital de alta precisión con el cuál se miden los largos y anchos de cada uno de los perfiles de la corruga para un pie de tubería. Este proceso se repetirá con cada una de las corrugas en un pie de tubería con 30 diferentes muestras para cada uno de los diámetros a estudiar para así poder obtener un promedio estimado y una desviación estandar, que de ser suficientemente pequeña mostrará que las mediciones son confiables y podrán utilizarse para realizar los cálculos siguientes.
5. **Obtención de resultados:** Una vez obtenidos los límites para la deformación de las tuberías mediante los ensayos de compresión y los valores para el área efectiva para las tuberías de cada diámetro, es posible determinar los valores para los esfuerzos de compresión y deformación de la tubería según la altura de la pila de lixiviación. En

primer lugar se determinarán estos resultados considerando el límite de deformación de un 5 % para así corroborar si es el límite de deformación el que limita su uso o si bien es más relevante el valor de los esfuerzos de compresión. De ser la máxima deformación establecida el limitante de su uso seguro en pilas de mayores alturas, se obtendrán resultados para distintos valores de deformación máxima admisible según los resultados obtenidos mediante las pruebas de compresión.

6. **Análisis de resultados:** Se analizan los resultados obtenidos mediante las pruebas de compresión con el fin de verificar y establecer los límites de carga y/o deformación de las tuberías corrugadas de hdpe. Tras los análisis, se dispondrá a establecer los límites de altura de pila para cada una de las tuberías estudiadas, pudiendo así actualizar el estado de arte respecto a su uso en este tipo de aplicaciones mineras.
7. **Redacción Informe Final/Defensa:** Finalmente, se considera 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.

3.2. Carta Gantt

La ejecución de estas tareas en el tiempo queda representada en la propuesta de Carta Gantt, presentada a continuación en la figura 3.1:

n°	Tarea/Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	#	15	Ex1	Ex2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
1	Recopilación antecedentes	■	■	■	■	■																	
2	Redacción criterios generales de diseño					■	■	■	■														
3	Realización ensayos compresión											■	■	■	■								
4	Toma de medidas para Aff												■	■	■								
5	Obtención de resultados														■	■	■	■					
6	Análisis de resultados																■	■	■	■			
7	Redacción informe y preparación defensa																						

Figura 3.1: Propuesta de Carta Gantt

3.3. Recursos

A fin de ejecutar las tareas descritas anteriormente, serán necesarios los siguientes recursos:

- **Máquina de Ensayo Universal:** Máquina necesaria para llevar a cabo los ensayos de compresión del material. El lugar para el ensayo, así como la máquina, serán facilitados por Tigre-ADS Chile.
- **Muestras para Ensayo:** Para la realización de los ensayos serán necesarias muestras de tuberías corrugadas de HDPE. Estas serán otorgadas por Tigre-ADS Chile, empresa productora de tuberías corrugadas de HDPE. En este caso, se dispondrá de 30 muestras por cada diámetro de tubería para realizar tanto los ensayos de compresión como la toma de medidas para el cálculo de área efectiva.
- **Equipamiento:** El equipamiento requerido para los ensayos será dispuesto en su totalidad por Tigre-ADS Chile. Este considera instrumentos necesarios para las mediciones y elementos de seguridad, tales como:
 - Micrómetro digital de precisión
 - Pie de metro digital
- **Elementos de protección personal:**
 - Casco protector
 - Audifonos
 - Anteojos protectores
 - Guantes
 - Chaleco reflectante

Capítulo 4

Resultados y Análisis

4.1. Factores de carga viva y muerta

Los factores de carga viva y muerta a utilizar serán los mostrados a continuación en la tabla 4.1

Tabla 4.1: Factores de carga[7]

F_{cv}	1.95
F_{ct}	1

4.2. Área efectiva

A continuación, la tabla 4.2 muestra los promedios y desviación estandar para el largo de cada una de las partes del perfil idealizado de la tubería (figura 2.1).

Tabla 4.2: Promedio y desviación porcentual para el largo de los elementos del perfil

ID [in]	1	2	3	4	5	6	
3	promedio [in]	0.092	0.225	0.291	0.233	0.092	0.292
	desviación %	1.1	2.3	1.3	1.5	0.9	2.8
4	promedio [in]	0.112	0.286	0.375	0.282	0.112	0.443
	desviación %	3.2	2.8	1.0	2.1	3.2	1.7
6	promedio [in]	0.116	0.406	0.392	0.431	0.116	0.430
	desviación %	1.1	0.5	0.5	0.6	1.1	0.7
8	promedio [in]	0.157	0.438	0.459	0.489	0.157	0.451
	desviación %	1.4	1.7	3.6	1.1	1.6	1.9

Luego, la tabla 4.3 muestra los promedios y desviación estandar para el ancho de cada una de las partes del perfil idealizado de la tubería (figura 2.1).

Tabla 4.3: Promedio y desviación porcentual para el ancho de los elementos del perfil

ID [in]		1	2	3	4	5	6
3	promedio [in]	0.0447	0.0425	0.0387	0.0455	0.0456	0.0322
	desviación %	4.9	4.8	4.6	4.1	4.7	3.4
4	promedio [in]	0.0028	0.0006	0.0006	0.0011	0.0029	0.0029
	desviación %	4.1	3.2	3.0	4.0	4.2	3.3
6	promedio [in]	0.0682	0.0475	0.0350	0.0477	0.0671	0.0221
	desviación %	4.9	2.1	4.8	4.1	4.8	4.2
8	promedio [in]	0.0795	0.05222	0.0439	0.0590	0.0796	0.0520
	desviación %	1.4	4.7	3.7	1.1	1.6	1.8

Como es posible notar en las tablas 4.2 y 4.3, la desviación estandar está casi en su totalidad bajo el 5% respecto al promedio, por lo tanto los valores serán considerados aptos para realizar los cálculos pertinentes al área efectiva.

A continuación, la tabla 4.4 muestra los valores del área efectiva a utilizar para las tuberías de cada diámetro estudiado:

Tabla 4.4: Área efectiva según el diámetro

ID [in]	$A_{eff}[in^2/in]$	$A_{eff}[cm^2/cm]$
3	0.0638	0.162
4	0.0702	0.178
6	0.0938	0.238
8	0.1184	0.300

Para determinar el módulo secante de suelo asociado a cada diámetro de tubería es necesario determinar la carga geostática del suelo asociada al material de relleno (ecuacion 2.1). Así, la tabla 4.5 muestra valor de M_s en cada caso para la profundida de relleno sugerida de 16 [ft], el cual se extrapola de los valores presentados en el manual de la empresa Tigre-Ads. [1]

Tabla 4.5: Módulo confinado de suelo a utilizar para cada diámetro

ID [in]	P_{sp} [psi]	P_{sp} [MPa]	M_s [psi]	M_s [MPa]
3	15.588	0.1075	4938	34.05
4	15.649	0.1079	4945	34.10
6	15.669	0.1080	4946	34.10
8	15.691	0.1082	4950	34.13

A continuación, la tabla 4.6 muestra los resultados para los esfuerzos provocados por la carga viva transmitida a las tuberías de distinto diámetro, además del valor para el factor de arqueamiento vertical, necesario para realizar el cálculo de los esfuerzos provocados por las cargas muertas asociadas la pila de lixiviación.

Tabla 4.6: Esfuerzos por carga viva y factor de arqueamiento vertical

ID [in]	T_{cp} [lb/in]	T_{cp} [kg/m]	VAF
3	38.442	2.153	0.260
4	49.879	2.793	0.261
6	73.918	4.120	0.256
8	99.864	5.592	0.256

Así, es posible observar en las figura 4.1 como aumentan los esfuerzos normales a las paredes de las tuberías según el diámetro de cada una y la altura de la pila.

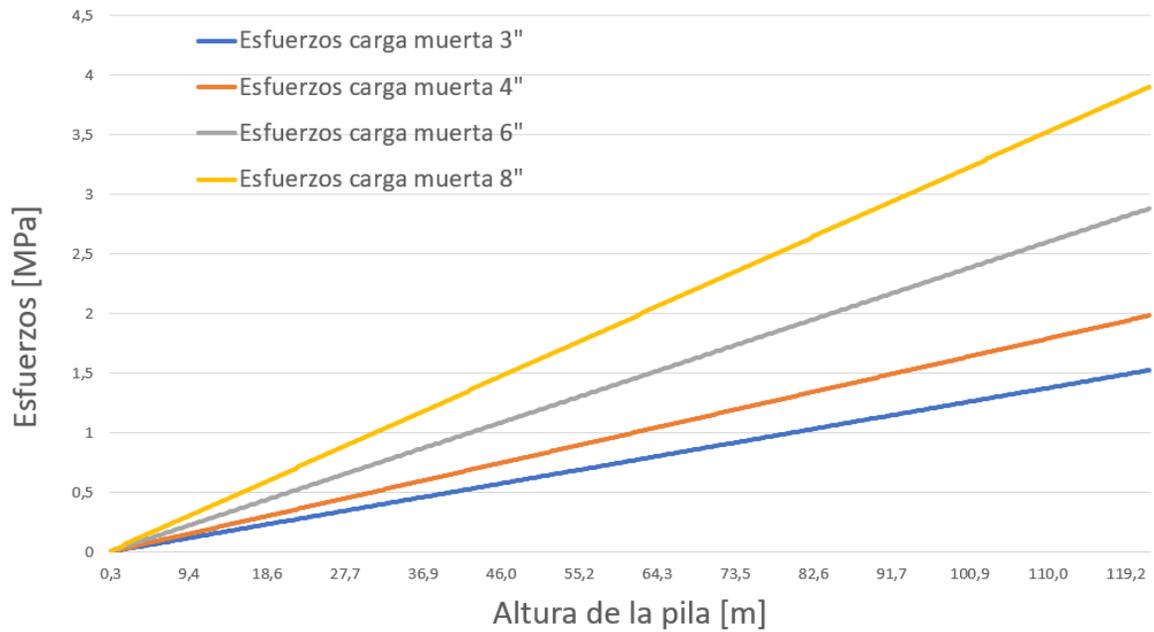


Figura 4.1: Esfuerzos por carga muerta según altura de la pila y diámetro de la tubería

4.3. Resultados con deformación límite de 5%

4.3.1. Resultados esfuerzos normales combinados a corto y largo plazo

A continuación, las figuras 4.2 a 4.9 muestran los esfuerzos normales combinados para cada tubería en función de los pies de altura de la pila, considerando tanto las cargas vivas como muertas, en comparación a los esfuerzos críticos a corto y largo plazo para esta deformación límite, presentados en la tabla 4.7 y calculados mediante la ecuación 2.7.

Tabla 4.7: Esfuerzos críticos a corto y largo plazo según diámetro de la tubería con deformación admisible de 5%

ID	Esfuerzo normal crítico[psi]		Esfuerzo normal crítico [MPa]
3	Corto plazo	191.33	1.319
	Largo plazo	57.40	0.396
4	Corto plazo	210.17	1.449
	Largo plazo	63.21	0.436
6	Corto plazo	283.58	1.955
	Largo plazo	84.46	0.582
8	Corto plazo	355.29	2.500
	Largo plazo	106.59	0.735

Tubería 3[in]

La figura 4.2 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo.

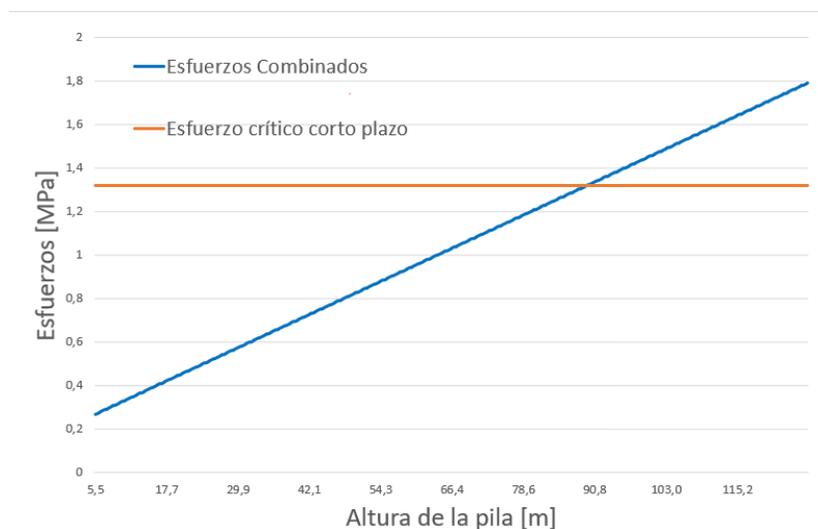


Figura 4.2: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 3[in]

La figura 4.3 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo.



Figura 4.3: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 3[in]

Tubería 4[in]

La figura 4.4 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo.

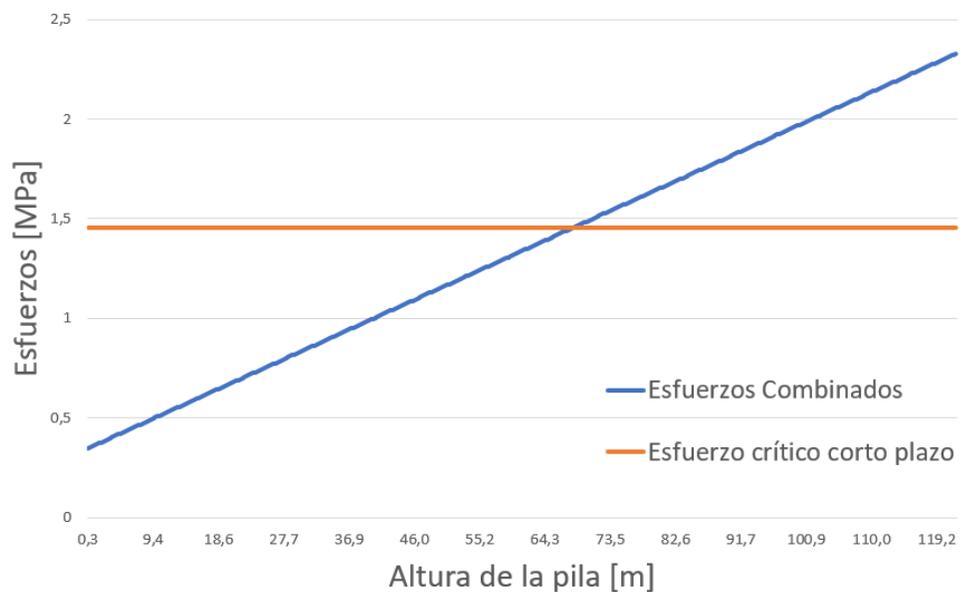


Figura 4.4: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 4[in]

La figura 4.5 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo.

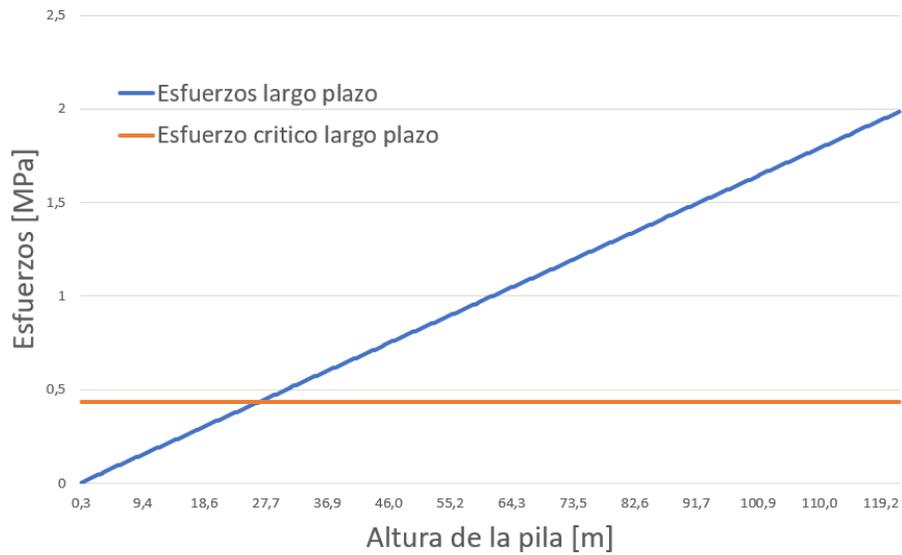


Figura 4.5: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 4[in]

Tubería 6[in]

La figura 4.6 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo.

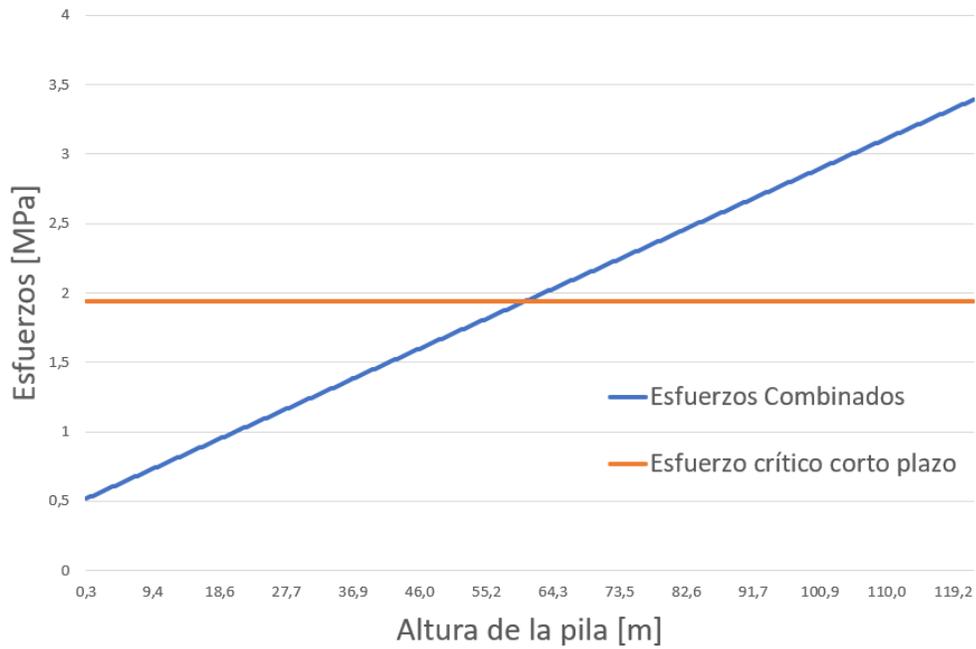


Figura 4.6: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 6[in]

La figura 4.7 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo.

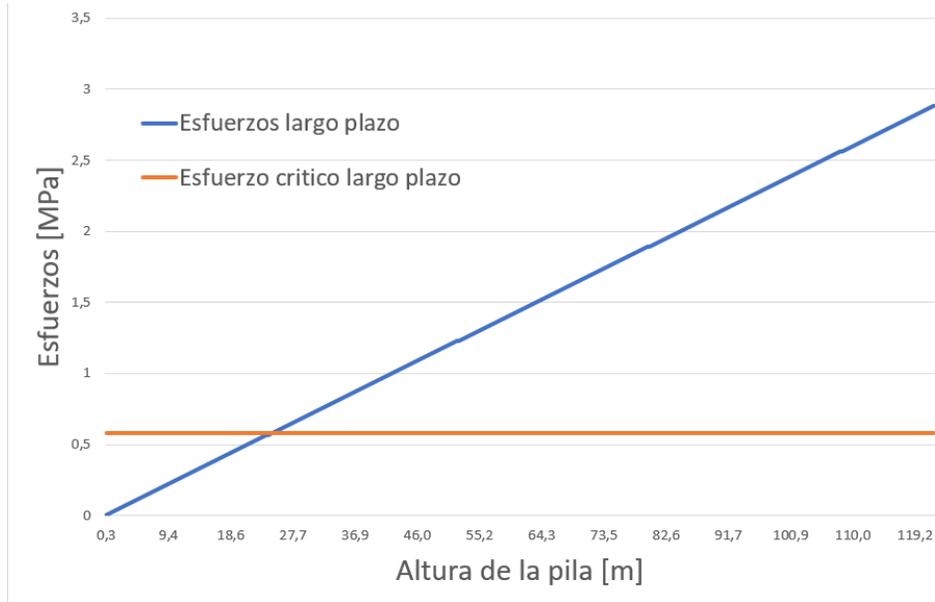


Figura 4.7: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 6[in]

Tubería 8[in]

La figura 4.8 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo.

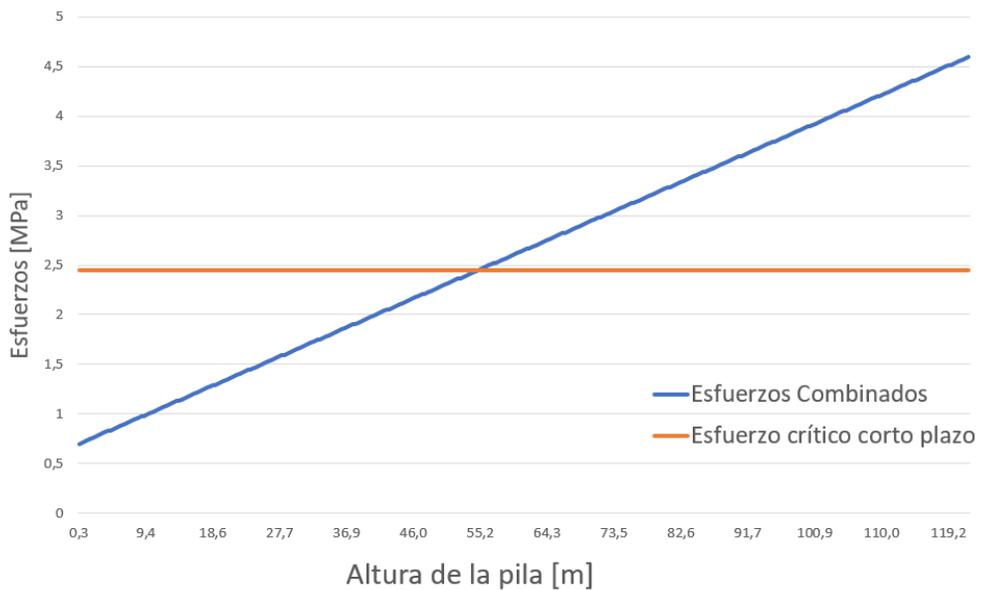


Figura 4.8: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 8[in]

La figura 4.9 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo.

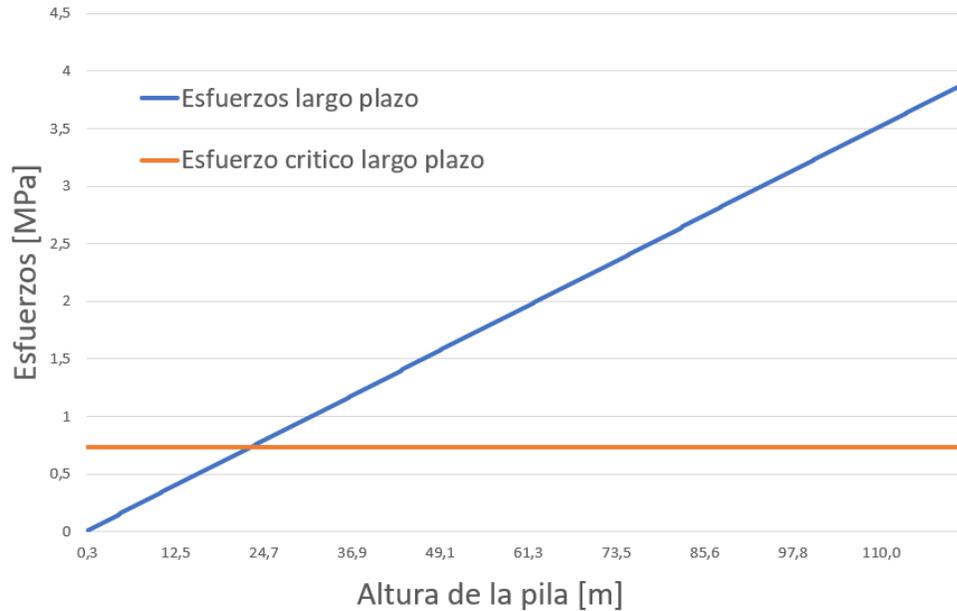


Figura 4.9: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 8[in]

Es posible apreciar en las figuras 4.2 a 4.9 que en el corto plazo las tuberías logran soportar una gran cantidad de pies de altura para la pila de lixiviación, particularmente las tuberías de 4 y 6 [in], las cuales son las más utilizadas para estos procesos. Por otro lado, para los registros a largo plazo es posible notar que la altura de la pila no es demasiado grande, rondando los 80 [ft] en cada caso, sin embargo, como se mencionó en las consideraciones, el valor crítico considera un ciclo de envejecimiento de 50 a 75 años, mientras que en este caso es considerado de 2 a 25, por lo que estos esfuerzos críticos serán desestimados de momento y recalculados utilizando un esfuerzo crítico mayor, acorde al ciclo de tiempo considerado.

Así, la tabla 4.8 muestra el límite en la altura de la pila por esfuerzos para las tuberías de cada uno de los diámetros estudiados.

Tabla 4.8: Altura máxima de la pila debido a esfuerzos críticos

ID [in]	Altura máxima [ft]	Altura máxima [m]
3	276	84.12
4	223	77.42
6	198	60.34
8	180	54.86

En base a esto puede notarse que considerando únicamente la limitación por esfuerzos normales con un límite de deformación del 5 %, ninguna de las tuberías estudiadas es capaz de llegar a una altura máxima mayor o igual a los 100 [m]. Sin embargo, de esta es posible notar que la altura aumenta de manera importante al disminuir el diámetro de las tuberías, pudiendo esperar que las tuberías de 3" sean las que tengan un mejor desempeño en esta aplicación.

4.3.2. Cálculo fuerza crítica de Pandeo

La fuerza crítica de pandeo debe ser mayor al esfuerzo límite considerado, de otra forma, debe tomarse en cuenta la fuerza crítica de pandeo para los cálculos. La tabla 4.9 a continuación muestra la fuerza crítica de pandeo para cada una de las dimensiones de tubería estudiadas.

Tabla 4.9: Fuerza crítica de pandeo

ID [in]	f_{cr} [psi]	f_{cr} [MPa]
3	689252.166	4752.2
4	204856,546	1412.4
6	203543,213	1403.4
8	226292,106	1560.3

Es posible notar que esta fuerza supera con creces los límites establecidos, por lo tanto el pandeo no debiese ser un problema en la situación estudiada.

4.3.3. Resultados deformación límite

Finalmente, con los datos obtenidos se procede a calcular la deformación combinada en el material en función de la altura de la pila de lixiviación y compararla al límite actual establecido de 5%. Las figuras 4.10 a 4.13 muestran la deformación porcentual según la altura de la pila para cada diámetro de tubería estudiado.

Tubería 3[in]

La figura 4.10 muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila.

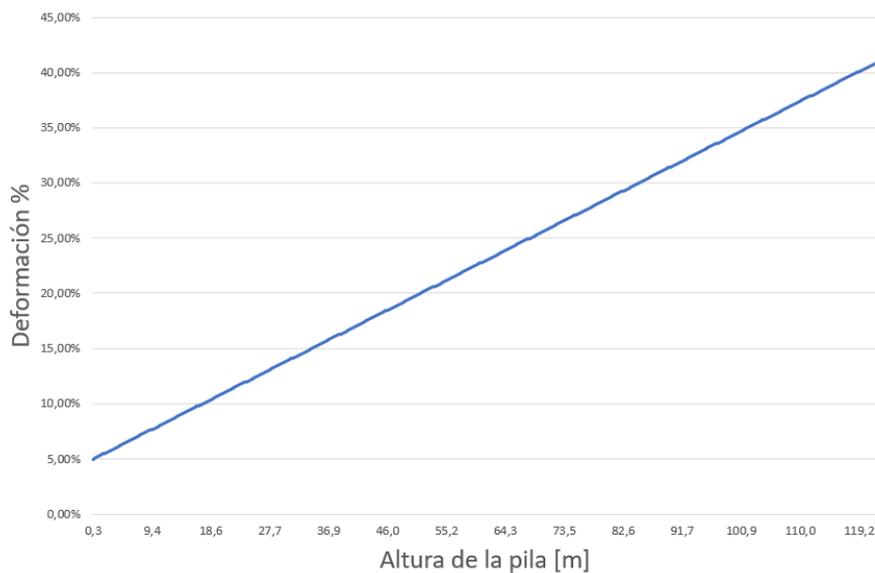


Figura 4.10: Deformación en tubería de 3 [in] según altura de la pila

Tubería 4[in]

La figura 4.11 a continuación muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila.

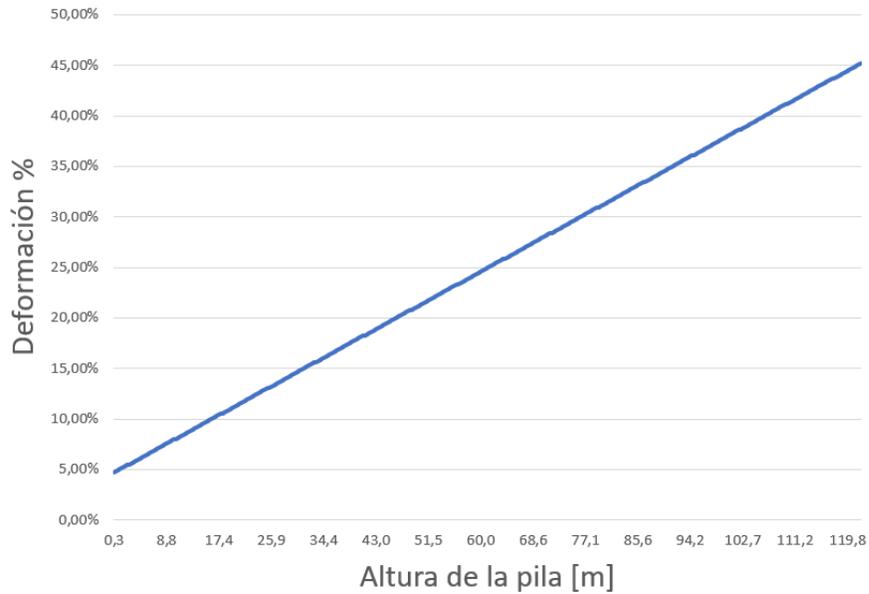


Figura 4.11: Deformación en tubería de 4 [in] según altura de la pila

Tubería 6[in]

La figura 4.12 a continuación muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila.

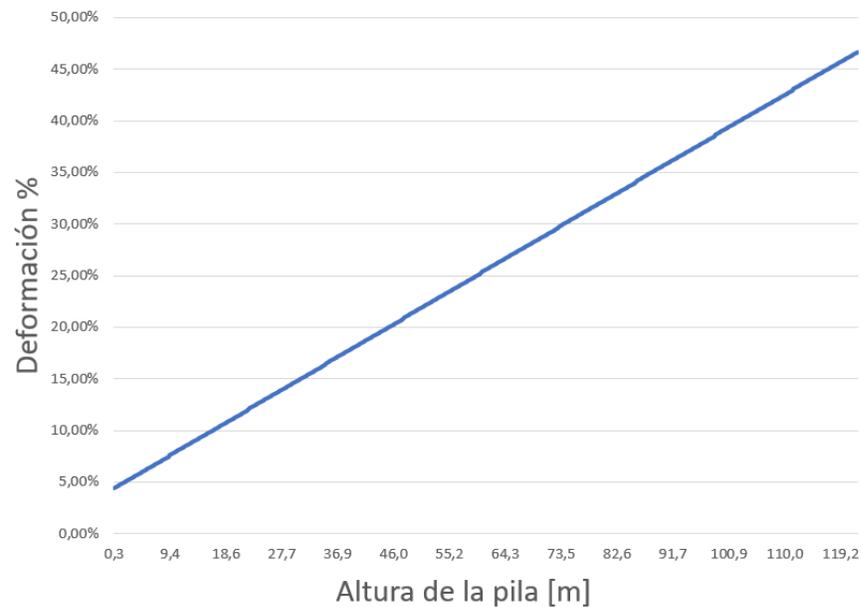


Figura 4.12: Deformación en tubería de 6 [in] según altura de la pila

Tubería 8[in]

La figura 4.13 a continuación muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila.

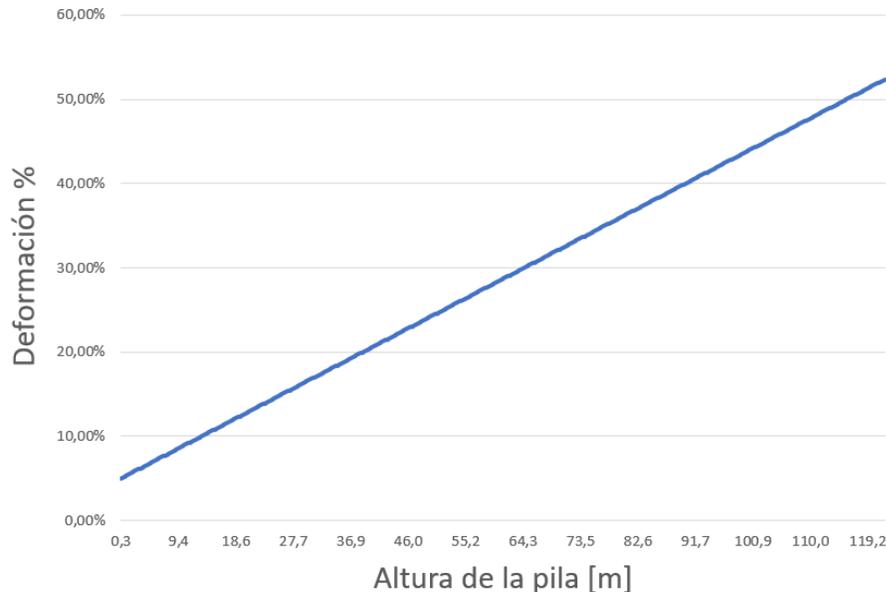


Figura 4.13: Deformación en tubería de 8 [in] según altura de la pila

En base a los resultados mostrados en las figuras 4.10 a 4.13 es posible notar que las tuberías se encuentran en su límite de deformación de 5% desde antes de que la roca comience a apilarse sobre ellas debido a la carga viva ejercida por los camiones de carga. Esto quiere decir que, teniendo esta limitación, la tubería no podría usarse de manera segura en aplicaciones en pilas de lixiviación de este tipo.

4.4. Resultados de ensayos de compresión

Los ensayos de compresión realizados, correspondientes en primer lugar a ensayos mediante el método ASTM D2412, mostraron resultados completamente favorables. En primera instancia, bajo el método mencionado se procede a deformar las tuberías hasta un límite de 40% en las diferentes posiciones, donde la carga aplicada por la máquina será considerada a corto plazo, utilizando las propiedades correspondientes al caso al momento de interpretar y comparar los resultados. Al realizar los ensayos, todas las mediciones realizadas para cada una de las 30 muestras lograron llegar al límite de 40% sin presentar ninguna de las fallas señaladas en los límites de servicio.[13]

Con estos resultados favorables, se realizan ensayos puramente de compresión, cambiando los límites de deformación de la máquina universal hasta un 70%. A continuación, las figuras 4.14 a 4.17 muestran fotografías del proceso de compresión; luego, las figuras 4.18 a 4.21 muestran a las tuberías posterior a ser sometidas a una deformación del 70%.



Figura 4.14: Prueba a tubería 3 [in]



Figura 4.15: Prueba a tubería 4 [in]



Figura 4.16: Prueba a tubería 6 [in]

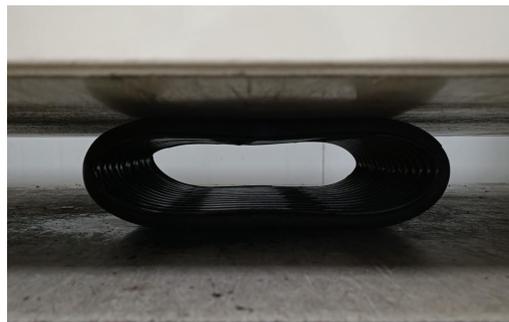


Figura 4.17: Prueba a tubería 8 [in]



Figura 4.18: Resultados ensayos al 70 % tubería 3 [in]



Figura 4.19: Resultados ensayos al 70 % tubería 4 [in]



Figura 4.20: Resultados ensayos al 70 % tubería 6 [in]



Figura 4.21: Resultados ensayos al 70 % tubería 8[in]

En las figuras mostradas es posible notar que no existe rastro de deformaciones plásticas por deflexión, compresión o pandeo, lo que muestra que las tuberías podrían fácilmente exeder incluso el límite de 70 % de deformación al que las pruebas fueron realizadas.

Sin embargo, ya que estas pruebas fueron realizadas al interior de un laboratorio en las condiciones óptimas para su ejecución, se considerará simplemente que las tuberías cumplen con el límite de deformación postulado para este trabajo, que corresponde a un 40 %.

4.5. Resultados con deformación límite de 40 %

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la máxima altura de la pila en función de los esfuerzos normales sobre la tubería y la deformación en esta. Para la realización de estos cálculos, se tomarán en cuenta ajustes respecto a las propiedades del material utilizadas anteriormente, ya que estas propiedades fueron determinadas para el material con una deformación máxima de 5 %, por lo tanto no responden a las condiciones planteadas para este caso. Adicionalmente, ya que la bibliografía no cuenta con información para las propiedades del material con un 40 % de deformación, serán utilizados los datos existentes para un mayor porcentaje de deformación, que es un 10 %. Las nuevas propiedades a utilizar se muestran a continuación en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Propiedades HDPE con deformaciones mayores a 10 % [12]

Corto Plazo		Largo Plazo (50 años)	
Fy'_i [psi]	4600	Fy'_{50} [psi]	1380
E'_i [psi]	100000	E'_{50} [psi]	20000

4.5.1. Resultados esfuerzos normales combinados a corto y largo plazo

A continuación, las figuras 4.22 a 4.29 muestran la comparación de los esfuerzos según la altura de la pila trabajada y el esfuerzo de pared crítico tanto a corto como a largo plazo, mostrados en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Esfuerzos críticos a corto y largo plazo según diámetro de la tubería con deformación admisible de 40 %

ID		Esfuerzo normal crítico[psi]	Esfuerzo normal crítico [MPa]
3	Corto plazo	293.38	2.023
	Largo plazo	88.01	0.607
4	Corto plazo	323.08	2.228
	Largo plazo	93.92	0.648
6	Corto plazo	431.69	2.976
	Largo plazo	129.50	0.893
8	Corto plazo	544.78	3.756
	Largo plazo	163.43	1.127

Tubería 3[in]

La figura 4.22 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo para deformaciones mayores a 10 %.

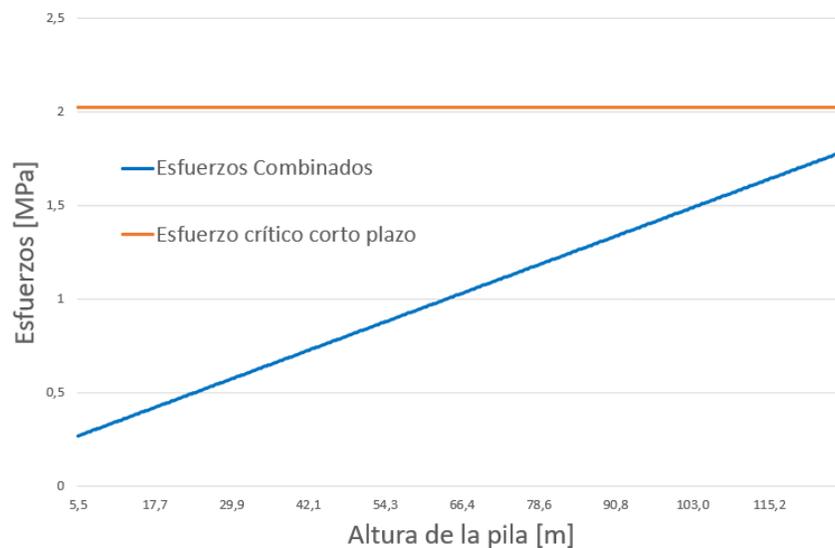


Figura 4.22: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 3[in] para deformaciones mayores a 10 %

La figura 4.23 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo para deformaciones mayores a 10 %.



Figura 4.23: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 3[in] para deformaciones mayores a 10 %

Tubería 4[in]

La figura 4.24 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo para deformaciones mayores a 10 %.



Figura 4.24: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 4[in] para deformaciones mayores a 10 %

La figura 4.25 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo para deformaciones mayores a 10 %.

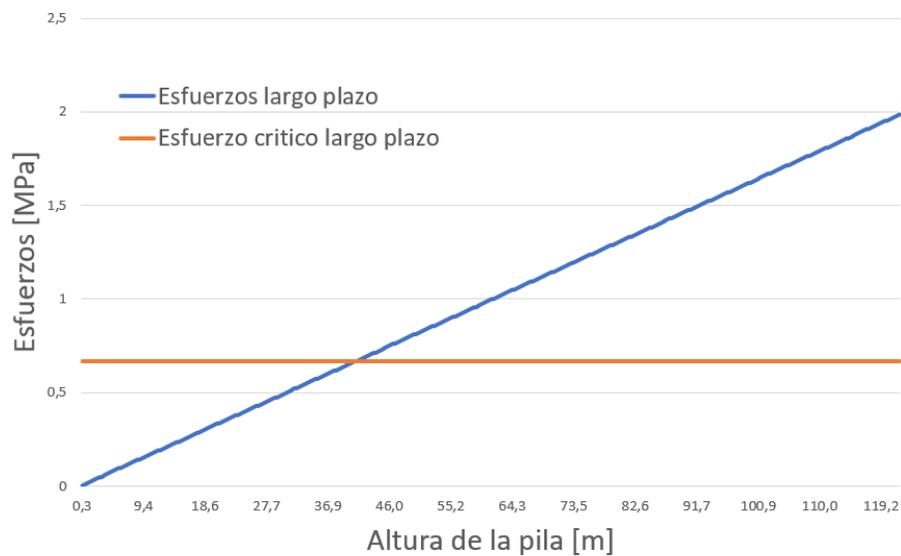


Figura 4.25: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 4[in] para deformaciones mayores a 10 %

Tubería 6[in]

La figura 4.26 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo para deformaciones mayores a 10 %.

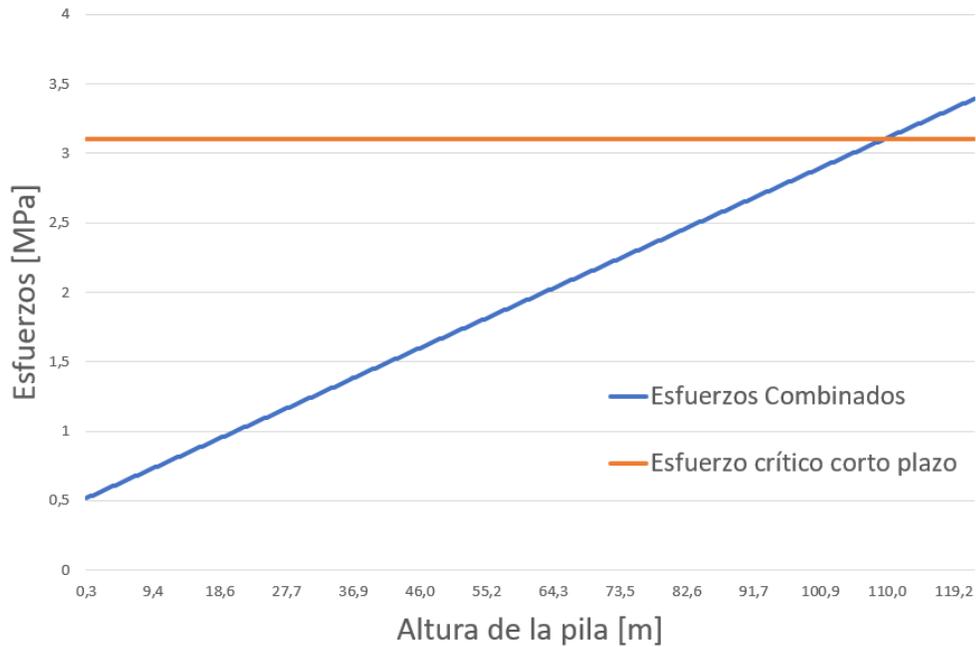


Figura 4.26: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 6[in] para deformaciones mayores a 10 %

La figura 4.27 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo para deformaciones mayores a 10 %.

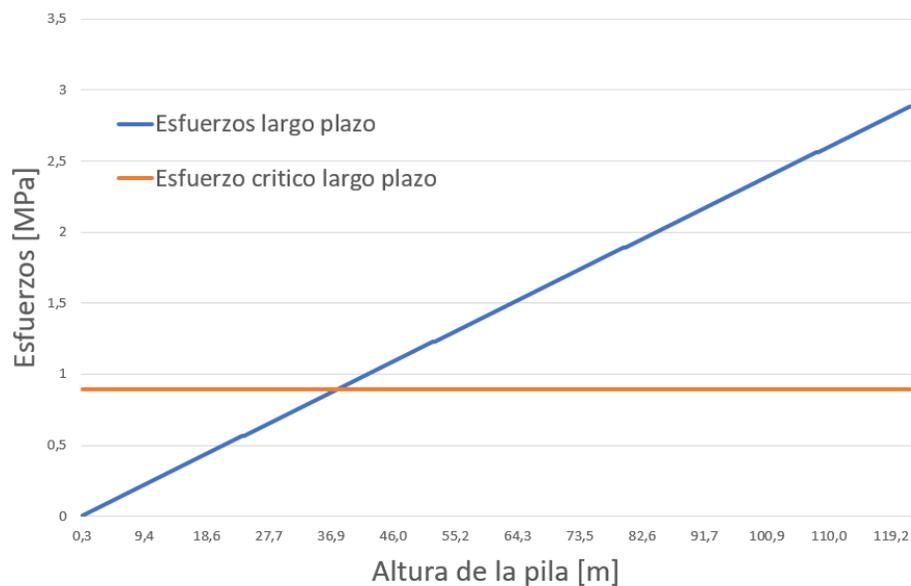


Figura 4.27: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 6[in] para deformaciones mayores a 10 %

Tubería 8[in]

La figura 4.28 a continuación muestra los esfuerzos normales combinados comparados con el esfuerzo crítico a corto plazo para deformaciones mayores a 10 %.

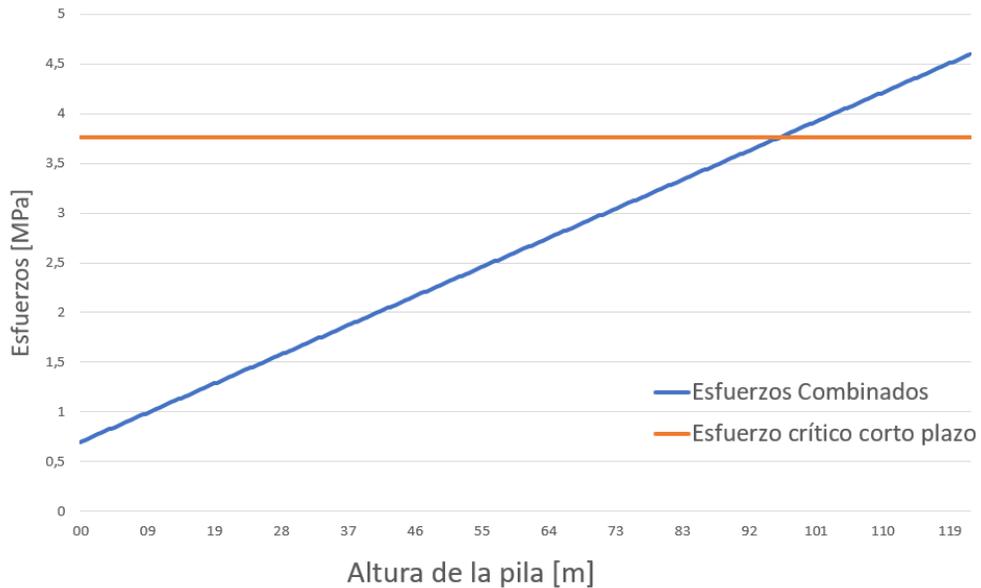


Figura 4.28: Esfuerzos combinados y crítico en corto plazo tubería de 8[in] para deformaciones mayores a 10 %

La figura 4.29 a continuación muestra los esfuerzos a largo plazo comparados con el esfuerzo crítico a largo plazo para deformaciones mayores a 10 %.

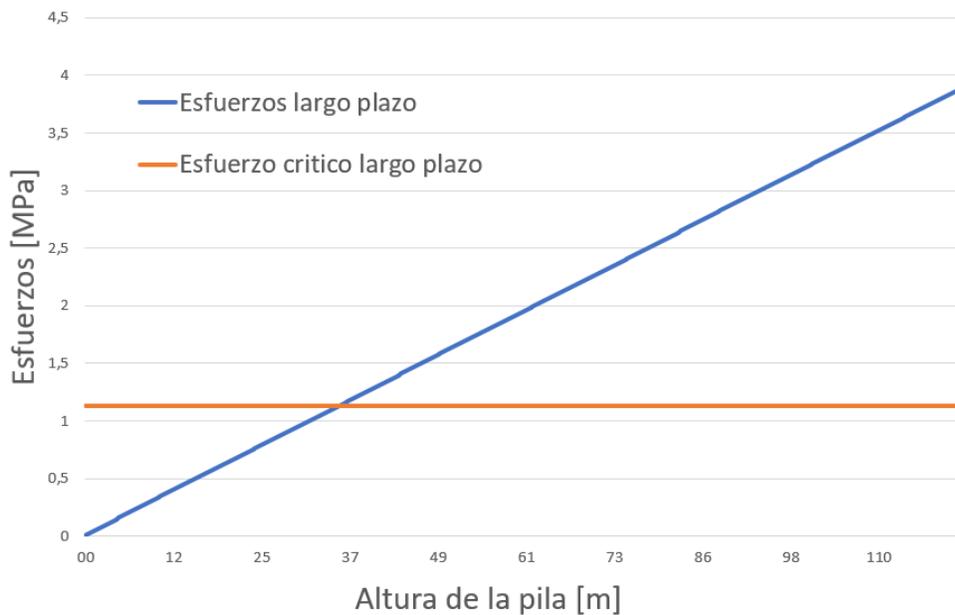


Figura 4.29: Esfuerzo a largo plazo y esfuerzo crítico a largo plazo tubería de 8[in] para deformaciones mayores a 10 %

Nuevamente, a pesar de que se amplificó el máximo esfuerzo en el largo plazo ponderándolo por la misma tasa de cambio que el esfuerzo límite a corto plazo al aumentar el límite de deformación, este muestra que en ciclos demasiado largos la tubería no sería capaz de resistir grandes cargas. Considerando que el máximo esfuerzo de 4800 fue determinado para una deformación de un 10 %, aumentando considerablemente el esfuerzo límite con una deformación de 5 %, se tomará en consideración que este es un factor suficientemente conservador para las deformaciones de 40 % utilizadas. De esta forma, los límites por acción de esfuerzos estarán dados por los esfuerzos a corto plazo.

Luego, la tabla 4.12 muestra el límite en la altura de la pila por esfuerzos para las tuberías de cada uno de los diámetros estudiados para una deformación admisible de un 40 %.

Tabla 4.12: Altura máxima de la pila debido a esfuerzos críticos para deformaciones de 40 %

ID [in]	Altura máxima [ft]	Altura máxima [m]
3	440	134.10
4	399	121.61
6	360	109.72
8	314	95.70

Los valores de la tabla 4.12 muestran que cuando la deformación admisible es de un 40 % (considerando propiedades para una deformación límite de al menos un 10 %) las tuberías de 3", 4" y 6" son capaces de soportar el peso de una pila de lixiviación de más de 100 [m] de altura. Por otro lado, las tuberías de 8" muestran no ser capaces de llegar al límite buscado, sin embargo, quedan solo un 4.3 % por debajo, lo que indica que de todas formas son capaces de resistir grandes esfuerzos.

4.5.2. Resultados deformación límite

Por último, con los datos obtenidos se procede a calcular la deformación combinada en el material en función de la altura de la pila de lixiviación y compararla al nuevo límite establecido de 40 %. Las figuras 4.30 a 4.33 muestran la deformación porcentual según la altura de la pila para cada diámetro de tubería estudiado.

Tubería 3[in]

La figura 4.30 a continuación muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila para la tubería de 3 [in].

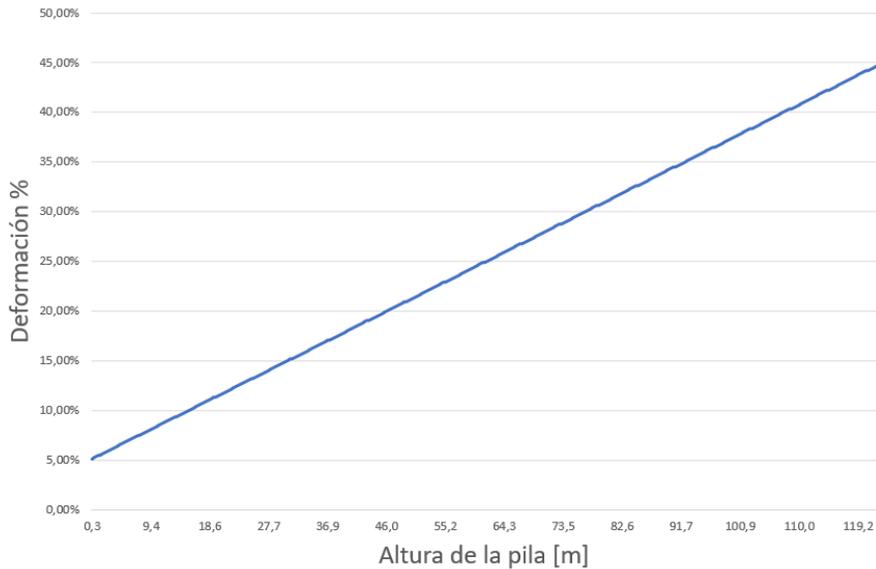


Figura 4.30: Deformación en tubería de 3 [in] según altura de la pila

Tubería 4[in]

La figura 4.31 a continuación muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila para la tubería de 4 [in].

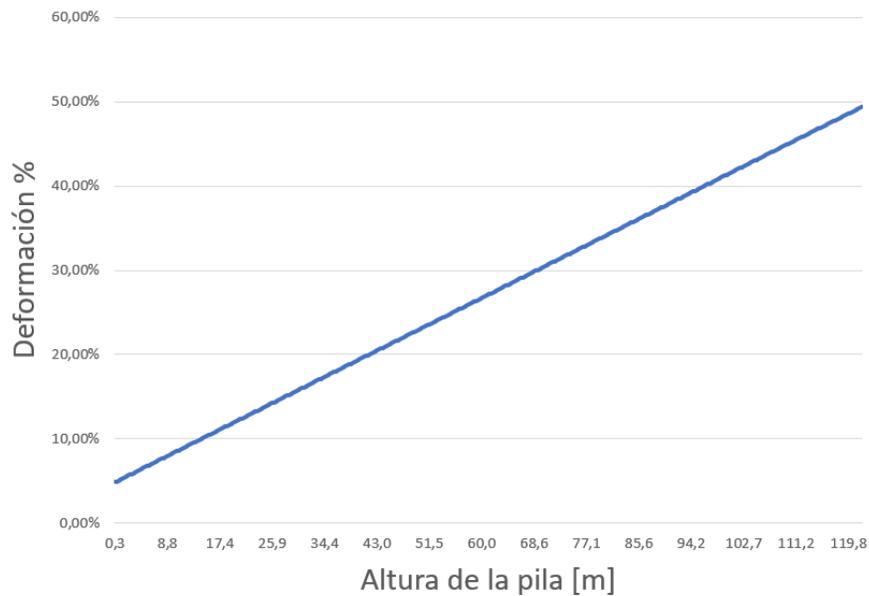


Figura 4.31: Deformación en tubería de 4 [in] según altura de la pila

Tubería 6[in]

La figura 4.32 a continuación muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila para la tubería de 6 [in].

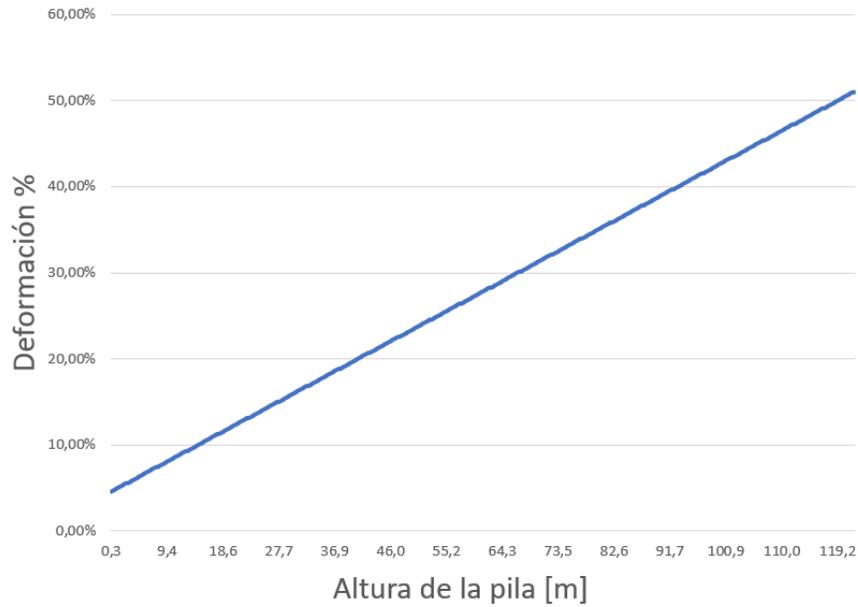


Figura 4.32: Deformación en tubería de 6 [in] según altura de la pila

Tubería 8[in]

La figura 4.33 a continuación muestra la deformación combinada en función de la altura de la pila para la tubería de 8 [in].

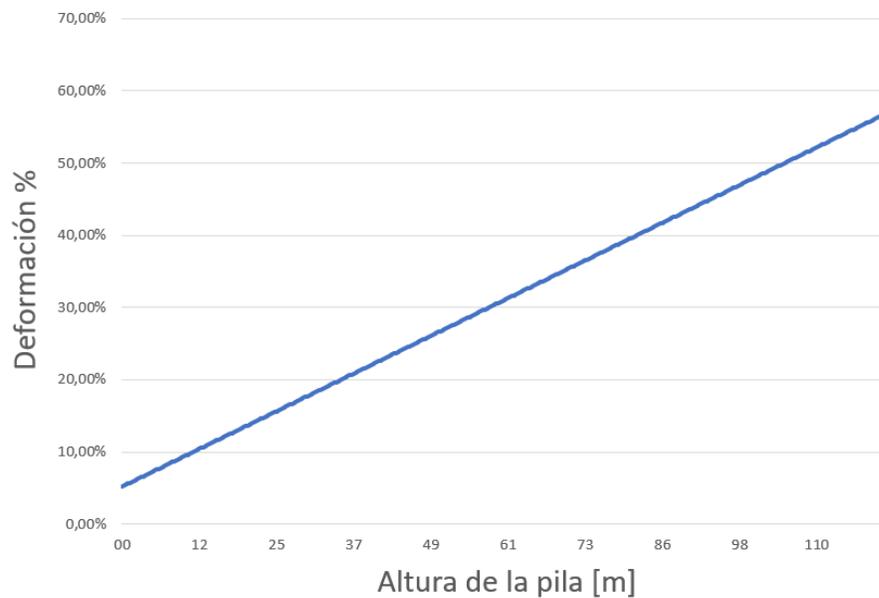


Figura 4.33: Deformación en tubería de 8 [in] según altura de la pila

Finalmente, la altura límite de la pila para cada dimensión de tubería estudiada considerando una deformación admisible del 40 % se muestra a continuación en la tabla 4.13.

Tabla 4.13: Altura máxima de la pila debido a deformación límite

ID [in]	Altura máxima [ft]	Altura máxima [m]
3	353	107.59
4	316	96.31
6	305	92.96
8	267	81.38

Esta vez, podemos notar en los resultados obtenidos que aún con un límite de deformación de 40 %, sigue siendo este punto respecto a los esfuerzos normales lo que limita el tamaño de las pilas de lixiviación sobre cada perfil de tubería. Aún así, es posible ver que para tuberías de 3 [in] si logra superarse el límite de 100 metros de altura buscado, mientras que tanto las tuberías de 4 como las de 6 [in] están bastante cerca del valor deseado.

4.5.3. Comparación para deformación por esfuerzos teóricos y resultados experimentales

En base a los ensayos de compresión realizados, es posible trazar una curva de esfuerzos según deformación para cada una de las tuberías estudiadas. Esto se realiza con la finalidad de comprobar que los cálculos teóricos realizados para determinar el límite máximo de altura para la pila, en cada caso, sean consecuentes a como se comportan las tuberías en el laboratorio.

Las figuras 4.34 hasta 4.37 muestran los gráficos comparativos para las curvas de esfuerzo respecto a la deformación para el caso teórico, determinado mediante la ecuación 2.13, y las mediciones realizadas durante los ensayos de compresión.

Tubería 3[in]

La figura 4.34 muestra los esfuerzos teóricos y medidos según la deformación de la tubería.

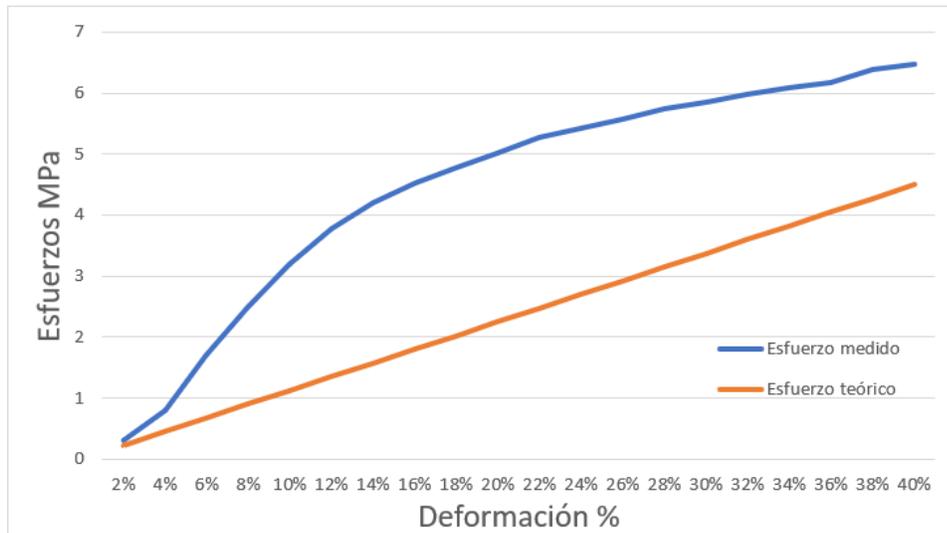


Figura 4.34: Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 3[in]

Tubería 4[in]

La figura 4.35 muestra los esfuerzos teóricos y medidos según la deformación de la tubería.

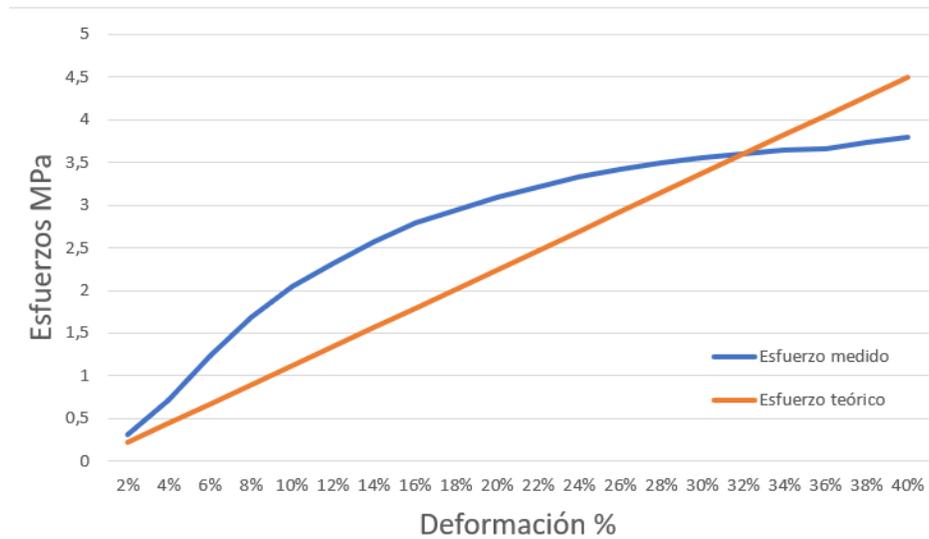


Figura 4.35: Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 4[in]

Tubería 6[in]

La figura 4.36 muestra los esfuerzos teóricos y medidos según la deformación de la tubería.

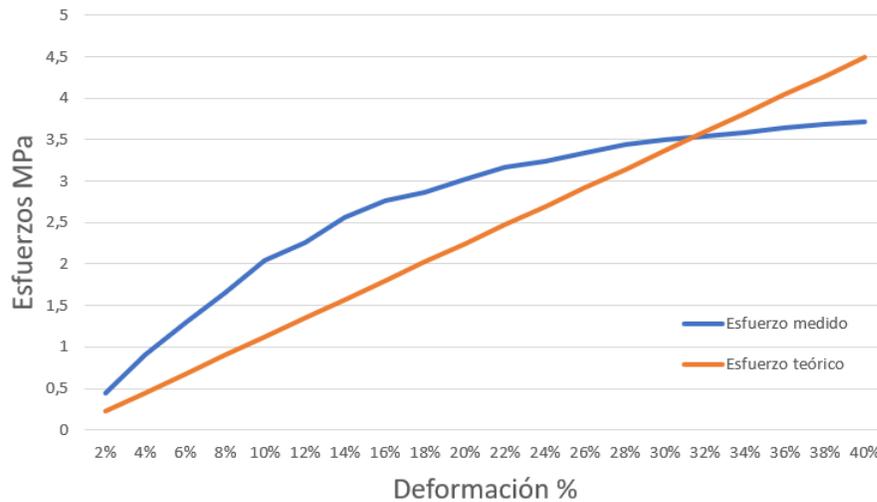


Figura 4.36: Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 6[in]

Tubería 8[in]

La figura 4.37 muestra los esfuerzos teóricos y medidos según la deformación de la tubería.

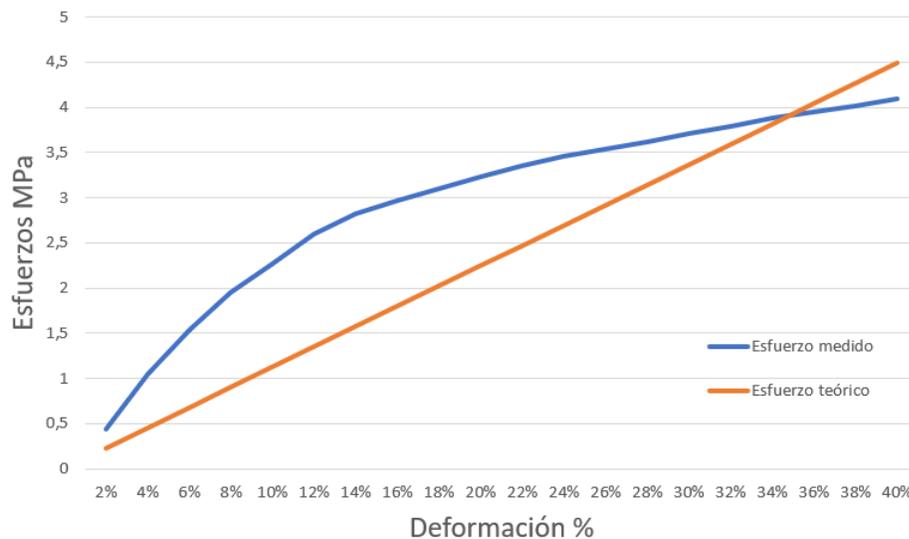


Figura 4.37: Curvas de esfuerzo teórico y medido según deformación para tuberías de 8[in]

En primer lugar es relevante señalar que en cada una de las curvas se superan los esfuerzos críticos mostrados en la tabla 4.11 y determinados mediante la ecuación 2.17 sin sufrir ningún tipo de falla asociada al límite de servicio de tuberías corrugadas. Esto implica que el valor para el máximo esfuerzo de compresión es mayor al utilizado. Sin embargo, a fin de obtener

resultados más confiables y conservadores, se tomará en cuenta simplemente que cada tubería tiene un factor de deformación F_{def} mayor al considerado anteriormente de 1.5.

De las figuras 4.34 a 4.37 es posible notar que la curva real inicial, hasta un 14 % de deformación en cada uno de los casos, tiene una pendiente mucho más elevada que la curva de esfuerzos teóricos, presentando deformaciones mucho menores a las esperadas en base a los cálculos teóricos. Sin embargo, luego de este primer segmento de la curva, es posible notar un descenso a partir del cual el comportamiento de la tubería alcanza una región de mayor plasticidad.

Es importante notar que a diferencia del resto de los casos, la curva de esfuerzos reales y teóricos según la deformación para la tubería de 3 [in] (figura 4.34) es diferente a las demás, donde al menos hasta una deformación del 40 % la deformación real será menor a la esperada teóricamente para los mismos esfuerzos.

Por otro lado, las curvas para las tuberías de 4[in], 6[in] y 8[in] tienen un descenso considerable en su curva de esfuerzos medidos, intersectando a la curva de esfuerzos teóricos a partir del un 32 % de deformación. Esto implica que para deformarse un 40 % los esfuerzos necesarios serán menores a los determinados teóricamente.

Con esto en consideración. los resultados mostrados en la tabla 4.13 serán ajustados para cada tubería, considerando el promedio de esfuerzos finales para deformar la tubería un 40 % en cada una de las mediciones hechas en los ensayos. De esta forma, la tabla 4.14 a continuación muestra la altura máxima de pila permitida para cada diferente tubería en base a la deformación esperada para los esfuerzos reales que son aplicados sobre ellas para deformarlas un 40 %.

Tabla 4.14: Altura máxima de la pila debido a deformación límite considerando resultados de ensayos

ID [in]	Deformación esperada para deformación teórica de 40 %	Altura máxima [m]
3	57.6 %*	107.59
4	33.7 %	88.02
6	33.0 %	75.31
8	36.5 %	73.52

Debido a que la tubería de 3[in] supera los esfuerzos esperados teóricamente al deformarse una 40 %, esperándose una deformación de 57,6 % para ese punto, no será considerado un reajuste en su altura máxima. De esta forma se mantendrá su punto máximo de altura dado por las deformaciones, pero teniendo en cuenta esta vez que el valor determinado es conservador respecto a la realidad, pudiendo considerarse un factor de seguridad de 1.44 para la altura máxima determinada. Así, si bien las tuberías de 3" permiten un flujo máximo de un 52 % respecto a las de 4", ya que el fluido no viaja a presión al interior de estas, no siendo necesario el doble de cantidad de tuberías de 3" para suplir el flujo, puede considerarse como una alternativa más viable en todo sentido, principalmente ya que la cantidad de material utilizada en su manufactura es la mitad del necesario para una tubería de 4". [3]

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

Como conclusiones, en primer lugar es importante señalar que se cumple el objetivo general, logrando estudiar los límites de la aplicación de las tuberías de dimensiones propuestas para su uso en pilas de lixiviación de hasta 100 [m]. Se estudió la bibliografía y estado de arte actuales, se realizaron las mediciones y ensayos esperados, se analizó el comportamiento de las tuberías para definir nuevos límites de deformación, y se comprueba si es posible aplicarlo a pilas del tamaño deseado.

Los ensayos de compresión lograron mostrar que el límite de 5 % utilizado es sumamente conservador, pudiendo llegar fácilmente a deformaciones del orden de 70 % sin superar a los límites de servicio de la tubería. Sin embargo, no se utiliza el 70 % de deformación señalado ya que esto está determinado en un laboratorio con condiciones óptimas para la medición, lo que será diferente al aplicarlo en terreno. No obstante, esta gran deformación alcanzada sin problemas muestra que de todas formas las tuberías son capaces de llegar al límite de 40 % de manera segura, permitiendo trabajar con este valor.

A pesar del límite de 40 % a utilizar, al comparar las curvas de esfuerzos reales y teóricos según la deformación, es posible notar que las tuberías de 4[in], 6[in] y 8[in] sufren mayores deformaciones con menores esfuerzos que las esperadas teóricamente a partir de un 32 % de deformación, viéndose así afectada la altura máxima de pila que se espera pueda soportar cada una de estas tuberías. Por otro lado, las tuberías de 3 [in] no se vieron afectadas de esta manera, presentando siempre deformaciones reales menores a las teóricas para los mismos esfuerzos. Así, la altura de pila permitida por las tuberías de 3[in] no solo será mayor a las demás y superior a los 100 [m], sino que tendrá además considerado un factor de seguridad adicional.

Con esto en mente, ante el poco uso de tuberías de 3 [in] para estas aplicaciones, sería correcto impulsar su implementación a futuro. Esto respaldado no solo por los resultados positivos obtenidos, sino que además, debido a su menor tamaño y a que la cantidad de material necesaria para su manufactura es menor que la del resto de las tuberías estudiadas, serán más económicas y fáciles de maniobrar.

Para trabajos futuros, se plantea estudiar el límite de servicio llevando la deformación de la tubería a mayores límites o en distintas condiciones. El estudio de estos casos podría permitir bien utilizar los valores encontrados para el esfuerzo máximo, y podrían justificar el uso seguro de las tuberías utilizadas en pilas de más de 100 [m] de altura.

Bibliografía

- [1] Tigres-ASD. (2010) *Manual de Ingeniería TIGRE-ADS, capítulo 2, Estructuras*
- [2] Di Giammarino et al. (2019). *Análisis de Tuberías Enterradas - Depósitos de Gran Altura*
- [3] Tigre-ADS (2011) *.Soluciones en Tuberías Corrugadas de PEAD. Sistemas de Tuberías*
- [4] Universidad de Barcelona. *Materiales. Polietileno de Alta Densidad*. <<http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad>>
- [5] Velez, Eddie. (2021). *Propiedades del HDPE: sus ventajas y por qué se usa para estibas plásticas*. <<https://soliplast.com/ventajas-y-beneficios/propiedades-hdpe/>>
- [6] American Society for Testing and Materials. (2000). *ASTMD2321*.
- [7] Lanzarotti, J. (2011). *Proyecto extensión pila biolixiviación minera escondida ltda: análisis y diseño de batería de tubos corrugados plásticos bajo rampa de acceso a pila(informe n°003)*.
- [8] Beckel, J. (2000). *El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile*.
- [9] Dorador, L. (2018). *Estimación de Densidad de Materiales Quebrados en Minería de Hundimiento (Block/Panel Caving)*.
- [10] Escobar, G. y Escobar, P. (2016). *GEOMECÁNICA. Universidad Nacional de Colombia*. <<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>>
- [11] Sheer Force Engineering. (2014). *ALL ABOUT MODULUS OF SUBGRADE REACTION*. <<https://sheerforceeng.com/all-about-modulus-of-subgrade-reaction/>>
- [12] Corporación Emacín. (2021). *Ficha técnica Polietileno de alta densidad - HDPE*. <<https://www.emacin.com.pe/pdf/Ficha-tecnica-Polietileno-de-alta-densidad-HDPE.pdf>>
- [13] American Society for Testing and Materials. (2002). *ASTM D2412-02*.
- [14] American Association of Highway and Transportation Officials. (2020). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
- [15] Lopez, E. (2012) *Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación*. Universidad de Chile.
- [16] Muñoz, C. *Evaluación experimental de la capacidad de drenaje de tuberías colectoras utilizadas en botaderos de ripio lixiviados*. Universidad de Talca.