



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

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL USO DE TUBOS DE ACERO CORRUGADO EN TÚNELES DE RECUPERACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO MANUEL ALARCÓN ROJAS

PROFESOR GUÍA:

ELIZABETH PARRA HENRÍQUEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CLAUDIO CANTEROS GORMAZ

HORACIO PINOCHET VEJAR

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
Ingeniero Civil con Mención en Estructuras y Construcción
POR: Diego Manuel Alarcón Rojas
PROFESOR GUÍA: Elizabeth Parra Henríquez
Fecha: 8 de Mayo de 2018

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA EL USO DE TUBOS DE ACERO CORRUGADO EN TÚNELES DE RECUPERACIÓN

Uno de los desafíos de la ingeniería estructural es buscar constantemente nuevas y mejores soluciones a utilizar en los diferentes sistemas estructurales que son requeridos para el adecuado desempeño estructural durante la vida útil de los proyectos, tanto desde su diseño como durante su construcción. Uno de los parámetros que interesa abordar es facilitar y/o optimizar la construcción o instalación con el fin de disminuir el tiempo de construcción o instalación, lo cual se traduce en disminución de costos totales y podría adelantar el inicio de la puesta en marcha del proyecto. Por lo tanto, resulta relevante y beneficioso para las empresas y clientes buscar nuevos métodos y soluciones para optimizar los parámetros mencionados anteriormente.

El objetivo de este trabajo es analizar y discutir sobre la factibilidad técnica y económica respecto del diseño de túneles de recuperación utilizando tubos de acero corrugado, comparando esta alternativa con el diseño de túneles de hormigón armado que se implementa tradicionalmente, con el fin de incorporar una alternativa más eficiente para el diseño de este tipo de estructuras para ser utilizada como referencia en futuros proyectos mineros. Para lograr esto se realiza el análisis estructural del túnel de recuperación, mediante el programa de análisis de interacción suelo-estructura FLAC3D, considerando todas las cargas que afectan al túnel durante su vida útil. Se presentan los resultados del modelo entregados por el programa, tales como los esfuerzos y las deformaciones que se generan en el túnel de acero corrugado. Además, se presenta el diseño estructural del túnel, el análisis de costos y la comparación con el diseño de túnel de hormigón armado.

Los resultados del análisis realizado no permiten confirmar la factibilidad técnica de manera confiable, se requiere un análisis más detallado y específico debido a que una sección del túnel de recuperación no cumple con los requerimientos de resistencia. En cuanto a la factibilidad económica, el diseño con tubos de acero corrugado es mucho más rentable que el diseño con hormigón armado, por lo que se recomienda evaluar, técnica y económicamente, la implementación de un refuerzo en aquellas zonas donde no se cumplan los requerimientos de resistencia. Por lo tanto, el diseño de túnel de recuperación con tubo de acero corrugado sí podría representar una mejor alternativa para este tipo de estructuras, dependiendo de las características del proyecto.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, quienes siempre me entregaron su apoyo, consejos y la certeza de que siempre podía y podré contar con ellos para lo que sea. Mi hermana Francisca, mi padre Eliseo que se reintegró en los últimos años pero no menos importante, mención especial para mi madre Cecilia que me ayudó y acompañó más que nadie durante este largo proceso universitario, tú lo sabes. Gracias a mi abuela Lucy Messen, por motivarme y apoyarme siempre, y por estar en este momento, aunque siempre decías que no ibas a alcanzar. Muchas gracias por todo Ohana.

Cómo olvidar a mis amigos Yerko Calquin, Alberto Martínez y Gonzalo Sandoval, con quienes compartí experiencias desde los primeros años en la sección 6. Con Yerko tuve la oportunidad de aprender mucho, viajamos, compartimos muchos momentos y forjamos una relación muy cercana a lo largo de estos 7 años. Gracias a mis compañeros civiles, Alberto y su futura señora esposa Javiera Godachevich, gracias por esas tardes de estudio, los almuerzos, partidos de fútbol y las tardes de no estudio, principalmente estas últimas. A mi amigo de la vida, el tata yaya Felipe Marchant, gracias por no dejar que el hecho de estar en distintas universidades interfiriera en nuestra amistad, gracias por las risas, los inolvidables viajes al sur, las imitaciones, el fútbol y tantas otra cosas que hemos compartido. A todos ustedes muchas gracias por la amistad y los momentos coleccionados que sé que aún no terminan.

Muchas gracias a Valentina Lepe por su alegría, cariño y apoyo, que si bien llegó a mi vida hace un par de años solamente, hemos construido una linda relación, hemos aprendido mucho del otro y ha sido parte importante desde entonces en este proceso y en mi vida.

Por último, gracias a quienes permitieron que este trabajo de título fuera posible: mis profesores. Aprendí mucho trabajando con ustedes, especialmente de Elizabeth y Horacio, quienes me guiaron a través de su experiencia durante todo el proceso con la mejor disposición.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
2. Antecedentes	4
2.1 Introducción general	4
2.2 Túneles de recuperación y diseño tradicional	4
2.3 Diseño de túneles de recuperación	5
2.4 Perfil de presiones bajo una pila de acoplamiento	5
2.5 Análisis sísmico de estructuras enterradas	12
2.6 Diseño estructural de túneles con tubo de acero corrugado	13
2.6.1 Estados límites de diseño	13
2.6.2 Combinaciones de carga	13
2.6.3 Factores de resistencia del material	16
2.6.4 Proceso de diseño: Estructuras suelo-metal	16
3. Objetivos	26
3.1 Objetivo general	26
3.2 Objetivos específicos	26
4. Metodología de trabajo	27
4.1 Estudio del comportamiento del terreno	27
4.2 Desarrollo del modelo del túnel de recuperación	27
4.3 Diseño de la propuesta	29
4.4 Análisis comparativo con el diseño de hormigón armado	29
5. Modelación de la estructura	30
5.1 Introducción	30
5.2 Bases de la modelación	31
5.2.1 Sistema de unidades	31

5.2.2	Descripción del túnel	32
5.2.3	Acero corrugado	33
5.2.4	Propiedades del terreno	37
5.2.5	Propiedades de la pila	39
5.2.6	Cargas solicitantes	39
5.2.7	Combinación de carga.....	41
5.3	Modelo en FLAC3D.....	41
5.3.1	Construcción del modelo	41
5.3.2	Procedimiento de análisis.....	44
5.3.3	Cargas solicitantes	50
5.3.4	Metodología de mediciones.....	54
6.	Resultados.....	57
6.1	Esfuerzos del túnel sin bocas de alimentación.....	57
6.2	Cargas sísmicas.....	65
6.3	Esfuerzos del túnel con bocas de alimentación	67
6.4	Deformación admisible.....	80
6.4.1	Deformación vertical	80
6.4.2	Deformación horizontal.....	87
7.	Diseño estructural.....	95
7.1	Introducción general.....	95
7.2	Parámetros de diseño	96
7.2.1	Altura de recubrimiento de suelo	96
7.2.2	Resistencia del tubo a compresión	96
7.2.3	Resistencia del tubo durante la construcción	96
7.2.4	Resistencia del tubo para corrugaciones profundas	96

7.2.5	Resistencia de las conexiones	97
7.2.6	Radio de curvatura	97
7.3	Diseño estructural túnel sin bocas de alimentación	98
7.3.1	Altura de recubrimiento de suelo	98
7.3.2	Resistencia del tubo a compresión	99
7.3.3	Resistencia del tubo durante la construcción	102
7.3.4	Resistencia del tubo para corrugaciones profundas	106
7.3.5	Resistencia de las conexiones	111
7.3.6	Radio de curvatura	112
7.4	Análisis sísmico.....	113
7.4.1	Resistencia del tubo a compresión.....	113
7.4.2	Resistencia del tubo para corrugaciones profundas.....	117
7.4.3	Resistencia de las conexiones	122
7.5	Refuerzo túnel con bocas de alimentación.....	123
7.6	Análisis de costos.....	124
8.	Comentarios y conclusiones	131
8.1	Estudio de las cargas estáticas y dinámicas	131
8.2	Comparación de resultados con diseño de hormigón armado	132
8.3	Análisis de la propuesta	132
8.4	Consideraciones a tener en cuenta.....	136
	Bibliografía	137
	Anexo A. Cálculo momento plástico M_P	139
	A1. Cálculo de momento plástico M_P tubo de acero corrugado 152x51 mm de 7 mm de espesor	139
	A2. Cálculo de momento plástico M_P tubo de acero corrugado 381x140 mm de 8 mm de espesor	140

Anexo B. Equipo de compactación.....	141
Anexo C. Resultados modelo FLAC3D	142
C1. Diagramas de máximos esfuerzos	142
C2. Diagramas de esfuerzos durante la construcción del túnel. Dirección transversal	146
Anexo D. Código modelo FLAC3D	152
D1. Modelo completo túnel de recuperación.....	152
D2. Colocación y compactación capas de relleno estructural 1 a 5	155
D3. Colocación y compactación capas de relleno estructural 6 a 10	158
D4. Colocación y compactación capas de relleno estructural 11 a 15	160
D5. Colocación y compactación capas de relleno estructural 16 a 20	162
D6. Colocación y compactación capas de relleno estructural 21 a 27 (Altura mínima de recubrimiento)	165
D7. Inclusión pila de acopio	167
D8. Inclusión bocas de alimentación.....	167

Índice de tablas

Tabla 5-1. Sistema de unidades parámetros mecánicos.....	31
Tabla 5-2. Sistema de unidades propiedades elemento estructural.....	31
Tabla 5-3. Propiedades acero corrugado para corrugación 152x51 mm, 381x140 mm y 400x150 mm. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007).....	33
Tabla 5-4. Valores de constantes elásticas para los perfiles de corrugación del acero 152x51 mm y 381x140 mm	37
Tabla 5-5. Propiedades del suelo de fundación	37
Tabla 5-6. Propiedades de la pila de acoplamiento.....	39
Tabla 6-1. Máximos esfuerzos para cada zona. Perfil de corrugación 152x51 mm	57
Tabla 6-2. Máximos esfuerzos para cada zona. Perfil de corrugación 381x140 mm	57
Tabla 6-3. Esfuerzos generados durante la construcción del túnel. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	60
Tabla 6-4. Esfuerzos generados durante la construcción del túnel. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	60
Tabla 6-5. Esfuerzos en zonas críticas con pila de acopio. Perfil de corrugación 152x51mm.....	65
Tabla 6-6. Esfuerzos en zonas críticas con pila de acopio. Perfil de corrugación 381x140mm.....	65
Tabla 6-7. Cargas sísmicas para cada zona a partir de los esfuerzos máximos. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	66
Tabla 6-8. Cargas sísmicas para cada zona a partir de los esfuerzos máximos. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	66
Tabla 6-9. Cargas sísmicas durante la construcción. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	66
Tabla 6-10. Cargas sísmicas durante la construcción. Perfil de corrugación 381x140 mm	66
Tabla 6-11. Cargas sísmicas a partir de esfuerzos en puntos críticos con pila de acopio. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	67
Tabla 6-12. Cargas sísmicas a partir de esfuerzos en puntos críticos con pila de acopio. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	67

Tabla 6-13. Esfuerzo axial N_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm	68
Tabla 6-14. Esfuerzo axial N_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	69
Tabla 6-15. Esfuerzo de momento M_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm	70
Tabla 6-16. Esfuerzo de momento M_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	71
Tabla 6-17. Esfuerzo de momento Q_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm	72
Tabla 6-18. Esfuerzo de momento Q_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	73
Tabla 6-19. Esfuerzo axial N_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm	74
Tabla 6-20. Esfuerzo axial N_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	75
Tabla 6-21. Esfuerzo de momento M_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm	76
Tabla 6-22. Esfuerzo de momento M_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	77
Tabla 6-23. Esfuerzo de momento Q_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm	78
Tabla 6-24. Esfuerzo de momento Q_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	79
Tabla 7-1. Cantidad y costo de cada material para diseño de túnel con hormigón armado	124
Tabla 7-2. Cantidad y costo de cada material para diseño de túnel con tubo de acero corrugado	124
Tabla 7-3. Costo hormigón armado. Diseño de túnel con hormigón armado	125
Tabla 7-4. Costo relleno estructural. Diseño de túnel con hormigón armado	125
Tabla 7-5. Costo total diseño de túnel de recuperación con hormigón armado.....	126
Tabla 7-6. Costo tubo de acero corrugado	127

Tabla 7-7. Costo vigas de refuerzo	127
Tabla 7-8. Costo estructura metálica.....	128
Tabla 7-9. Costo relleno estructural	128
Tabla 7-10. Costo arena.....	129
Tabla 7-11. Costo relleno interior	129
Tabla 7-12. Costo total diseño túnel de recuperación con tubos de acero corrugado..	130
Tabla 7-13. Comparación de diseños para túnel de recuperación	130
Tabla 8-1. Requerimientos de resistencia para el diseño del tubo de acero corrugado	133
Tabla 8-2. Deformación vertical para el diseño del tubo de acero corrugado	134
Tabla 8-3. Deformación horizontal para el diseño del tubo de acero corrugado	134
Tabla 8-4. Comparación de diseños para túnel de recuperación	135

Índice de figuras

Figura 1-1. Túnel de recuperación con 3 bocas de alimentación bajo pila de acopio de material granular	2
Figura 1-2. Vista en planta, 2 túneles de recuperación con 3 bocas de alimentación cada uno, bajo pila de acopio de material granular	2
Figura 2-1. Tabla de materiales usados y sus propiedades. Fuente: Huntley et al. (1997)	6
Figura 2-2. Perfil de presiones arena. Fuente: Huntley et al. (1997)	6
Figura 2-3. Perfil de presiones esferas de vidrio pequeñas. Fuente: Huntley et al. (1997)	6
Figura 2-4. Perfil de presiones mezcla esferas de vidrio. Fuente: Huntley et al. (1997)...	7
Figura 2-5. Cargas de llenado en pila de acoplamiento. Fuente: McBride et al. (2006) ...	8
Figura 2-6. Cargas de relleno en pilas de acoplamiento. Fuente: McBride et al. (2006)	8
Figura 2-7. Carga sobre el alimentador. Fuente: McBride et al. (2006).....	9
Figura 2-8. Perfiles de presión para 5 pruebas. Fuente: Ooi et al. (2008).....	10
Figura 2-9. Influencia de la deflexión de la base en perfil de presión. Fuente: Ooi et al. (2008).....	10
Figura 2-10. Factores de resistencia del material, Φ . Fuente: <i>Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)</i>	16
Figura 2-11. Altura de recubrimiento para estructuras suelo-metal. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)	17
Figura 2-12. Definiciones de D_h y D_v para varias formas de tubo de acero corrugado. Fuente: <i>Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)</i>	18
Figura 2-13. Clasificación del suelo para determinar el valor de E_s . Fuente: <i>Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)</i>	22
Figura 2-14. Máxima resistencia longitudinal de la conexión [kN/m]. Placa estructural apernada con corrugación 152x51 mm. Fuente: <i>Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)</i>	25
Figura 2-15. Máxima resistencia longitudinal de la conexión [kN/m]. Placa estructural apernada con corrugación 381x140 mm. Fuente: <i>Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)</i>	25

Figura 2-16. Máxima resistencia longitudinal de la conexión [kN/m]. Placa estructural apernada con corrugación 400x150 mm. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)	25
Figura 4-1. Modelo estático simplificado. Fuente: Schmitz et al. (2001)	28
Figura 5-1. Geometría de bóveda del túnel. Fuente: Elaboración propia	32
Figura 5-2. Perfiles de corrugación del acero 152x51mm, 381x140 mm y 400x150 mm. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007).....	34
Figura 5-3. Rigideces de varias placas ortotrópicas, donde $H = 2GXY + DXY$. Fuente: Ugural (1981)	36
Figura 5-4. Clasificación de suelos según la norma AASHTO	38
Figura 5-5. Modelo completo de túnel de recuperación en FLAC3D	42
Figura 5-6. Túnel de recuperación con forma de bóveda en FLAC3D	43
Figura 5-7. Sección transversal túnel de recuperación con forma de bóveda en FLAC3D	43
Figura 5-8. Modelo en FLAC3D en etapa intermedia del método constructivo con carga de compactación aplicada.....	44
Figura 5-9. Puntos de interés a estudiar durante la descarga del material granular	45
Figura 5-10. Esfuerzo de compresión en punto 1 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	46
Figura 5-11. Esfuerzo de compresión en punto 1 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	46
Figura 5-12. Esfuerzo de compresión en punto 2 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	47
Figura 5-13. Esfuerzo de compresión en punto 2 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	47
Figura 5-14. Esfuerzo de compresión en punto 3 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	48
Figura 5-15. Esfuerzo de compresión en punto 3 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	48
Figura 5-16. Esfuerzo de compresión en punto 4 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	49

Figura 5-17. Esfuerzo de compresión en punto 4 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm	49
Figura 5-18. Distribución de presiones según Boussinesq. Fuente: Schmitz et al. (2001)	52
Figura 5-19. Zonas en los bordes de las bocas de alimentación donde se podría generar un aumento de esfuerzos	55
Figura 5-20. Zonas cercanas a las bocas de alimentación donde se podría generar un aumento de los esfuerzos	56
Figura 6-1. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Perfil de corrugación 152x51 mm	58
Figura 6-2. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Perfil de corrugación 381x140 mm	58
Figura 6-3. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Perfil de corrugación 152x51 mm	59
Figura 6-4. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Perfil de corrugación 381x140 mm	59
Figura 6-5. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	61
Figura 6-6. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	62
Figura 6-7. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	62
Figura 6-8. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	63
Figura 6-9. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	63
Figura 6-10. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	64
Figura 6-11. Comparación diagramas del esfuerzo axial N_x [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm	68

Figura 6-12. Comparación diagramas del esfuerzo axial N_y [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm	69
Figura 6-13. Comparación diagramas del esfuerzo de momento M_x [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm.....	70
Figura 6-14. Comparación diagramas del esfuerzo de momento M_y [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm.....	71
Figura 6-15. Comparación diagramas del esfuerzo de corte Q_x [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm	72
Figura 6-16. Comparación diagramas del esfuerzo de corte Q_y [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm	73
Figura 6-17. Comparación diagramas del esfuerzo axial N_x [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm	74
Figura 6-18. Comparación diagramas del esfuerzo axial N_y [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm	75
Figura 6-19. Comparación diagramas del esfuerzo axial M_x [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm	76
Figura 6-20. Comparación diagramas del esfuerzo axial M_y [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm	77
Figura 6-21. Comparación diagramas del esfuerzo axial Q_x [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm	78
Figura 6-22. Comparación diagramas del esfuerzo axial Q_y [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm	79
Figura 6-23. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	81

Figura 6-24. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	81
Figura 6-25. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	82
Figura 6-26. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	83
Figura 6-27. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 152x51 mm	83
Figura 6-28. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	84
Figura 6-29. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	85
Figura 6-30. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	85
Figura 6-31. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	86
Figura 6-32. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 381x140 mm	87
Figura 6-33. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	88
Figura 6-34. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	88
Figura 6-35. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	89
Figura 6-36. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 152x51 mm	90
Figura 6-37. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	90
Figura 6-38. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	91
Figura 6-39. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	92

Figura 6-40. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	92
Figura 6-41. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	93
Figura 6-42. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	94
Figura 7-1. Sección transversal túnel de hormigón armado para el cálculo de costos. Fuente: Elaboración propia	125
Figura 7-2. Sección transversal túnel de acero corrugado para el cálculo de costos. Fuente: Elaboración propia	126
Figura 7-3. Refuerzo o costilla para tubos de acero corrugado. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)	127
Figura 8-1. Refuerzo o costilla para tubos de acero corrugado. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)	135
Figura 0-1. Equipo utilizado para la compactación del relleno estructural en la modelación del proceso constructivo	141
Figura 0-1. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	142
Figura 0-2. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	142
Figura 0-3. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	143
Figura 0-4. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	143
Figura 0-5. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	144
Figura 0-6. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	144
Figura 0-7. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm.....	145
Figura 0-8. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	145

Figura 0-9. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	146
Figura 0-10. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	146
Figura 0-11. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm	147
Figura 0-12. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	147
Figura 0-13. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	148
Figura 0-14. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	148
Figura 0-15. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	149
Figura 0-16. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	149
Figura 0-17. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm.....	150
Figura 0-18. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	150
Figura 0-19. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	151
Figura 0-20. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm	151

1. Introducción

La Minería es responsable de gran parte del crecimiento económico de Chile, ubicándolo como el mayor exportador de Cobre del mundo con un 26,9% de la producción total en el año 2016, según información publicada en la revista digital Minería Chilena. De acuerdo con estadísticas de COCHILCO (Comisión Chilena del Cobre), en el año 2017 la exportación del cobre llegó a US\$31.825,7 millones, suma 21,9% superior a los US\$26.087,9 millones del año 2016. El crecimiento de esta actividad se produce luego de 5 años de disminución y está relacionada directamente con la variación en el precio del cobre: para el año 2017 el cobre se cotizó en US\$ 2,79 la libra, en tanto el año 2016 el precio del cobre promedió US\$ 2,3 la libra. Esta fluctuación influye en los ingresos fiscales del país, según información publicada en la revista digital Minería Chilena, el año 2016 la actividad minera entregó al financiamiento fiscal US\$ 904 millones, cifra que aumentó considerablemente en el año 2017, alcanzando los US\$ 2.643 millones.

En general, los proyectos mineros son complejos y de gran envergadura e involucran diversas especialidades (química, civil estructural, mecánica, eléctrica, piping entre otras) por lo que requieren de una inversión relevante, la cual puede llegar a los US\$ 5.000 millones por proyecto e incluso mayor a este valor de acuerdo a la información de los proyectos entregada por COCHILCO. Una gran cantidad de procesos conforman lo que es el proyecto minero en su totalidad, desde la extracción de la materia prima hasta el producto final y su posterior comercialización. En particular, luego del chancado primario (proceso que consiste en la trituración de grandes rocas que contienen el material de valor para obtener elementos más pequeños) el material es transportado a través de cintas transportadoras y se acumula formando grandes pilas de acopio que actualmente varían entre 30 a 50 metros de altura. El material acopiado es vaciado a los túneles de recuperación a través de las bocas de alimentación ubicadas en la parte superior (ver figura 1-1) y se dirige al siguiente proceso mediante correas transportadoras ubicadas al interior de los túneles.

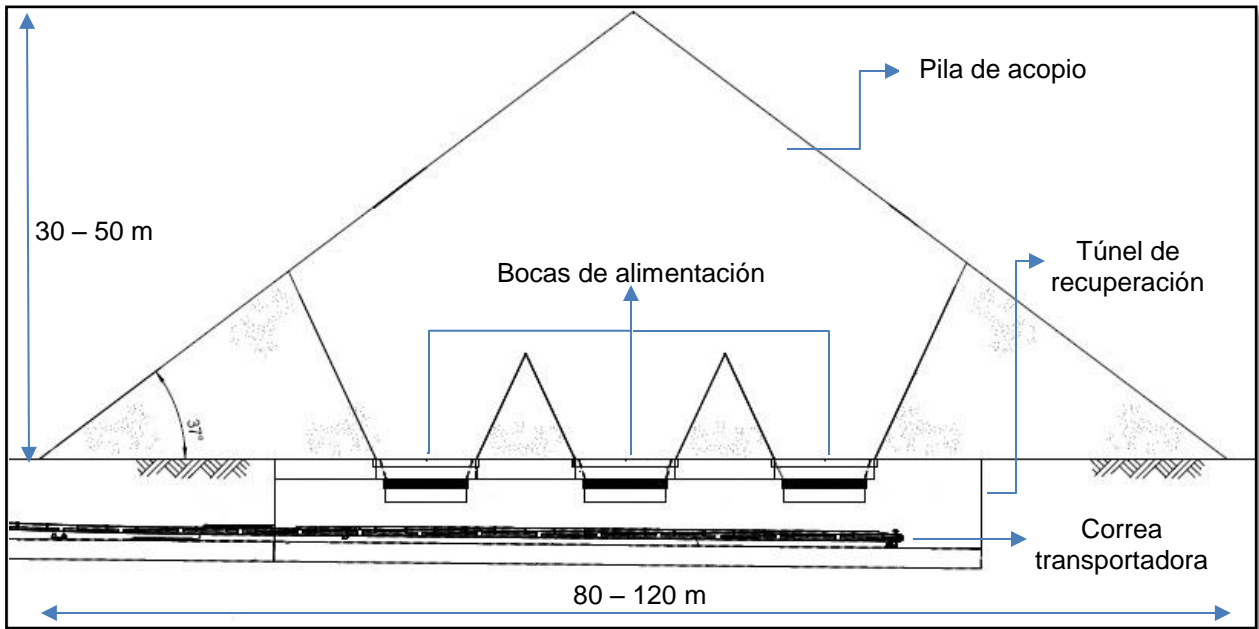


Figura 1-1. Túnel de recuperación con 3 bocas de alimentación bajo pila de acopio de material granular

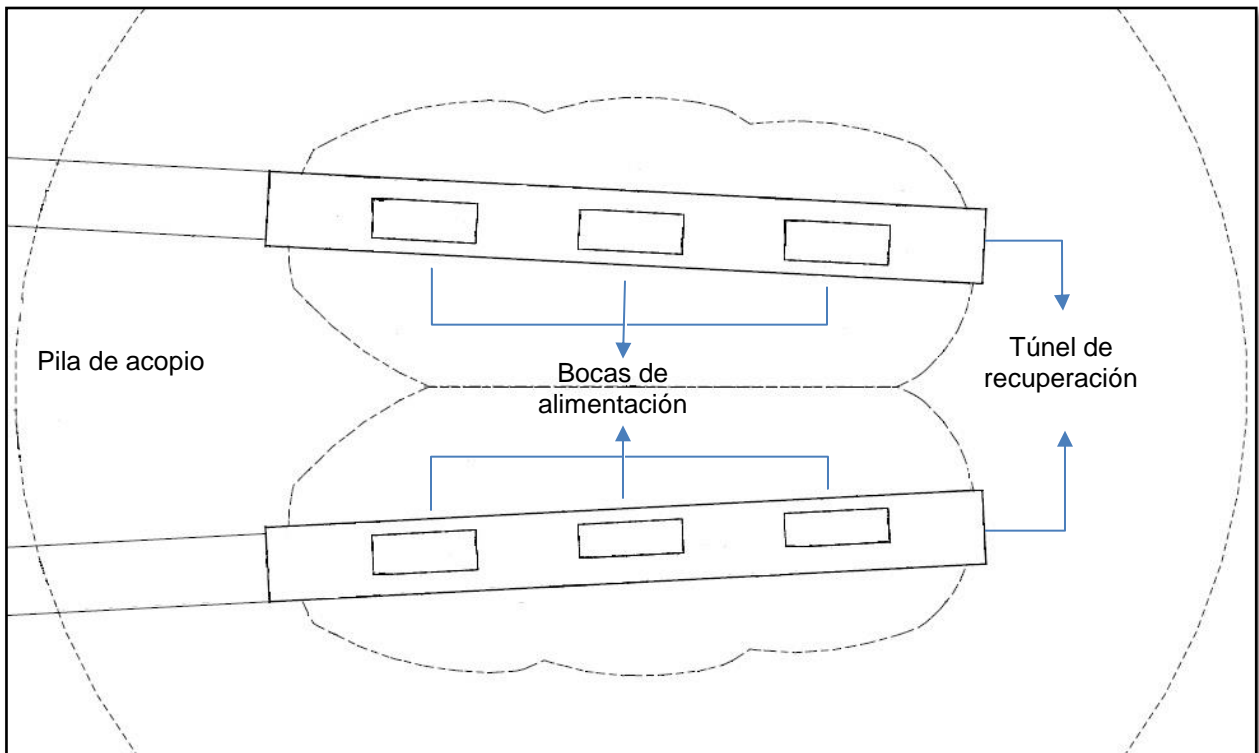


Figura 1-2. Vista en planta, 2 túneles de recuperación con 3 bocas de alimentación cada uno, bajo pila de acopio de material granular

Los túneles de recuperación son indispensables en este tipo de proyectos ya que permiten trasladar el material asegurando así la continuidad de la producción. Actualmente en Chile, estos túneles generalmente son de sección rectangular de gran tamaño de modo que permita la operación al interior de él, se construyen de hormigón armado y de espesores importantes debido a las solicitaciones a las que se encuentran sometidos. Por lo tanto, es de esperar que se utilice una elevada cantidad de material en la construcción de túneles, lo cual afecta directamente el costo total y el tiempo de construcción del túnel, y posiblemente también del proyecto.

Considerando los antecedentes expuestos, resulta relevante estudiar otro tipo de soluciones para la estructuración, la geometría y el tipo de material a utilizar en el diseño de este tipo de estructuras. Este trabajo analiza la factibilidad técnica de diseñar estos túneles con tubos de acero corrugado como una alternativa distinta, que sería más económica y más rápida de construir que la utilizada hoy en día.

El diseño de túneles de recuperación con acero corrugado se ha realizado para alturas menores a 14 metros utilizando una corrugación 152 x 51 mm, y para alturas superiores se ha realizado con túneles de hormigón armado. Sin embargo, actualmente han ingresado al mercado internacional tubos con "corrugaciones profundas", como es el caso de la corrugación 381 x 140 mm y la corrugación 400 x 150 mm, logrando alturas superiores a los 14 metros que alcanza una corrugación 152 x 51 mm.

Es probable que, el uso de tubos de acero corrugado en la construcción de los túneles no esté exenta de dificultades, principalmente porque para su implementación se requiere de un proceso complejo que incluye la compactación adecuada del suelo a ambos lados del tubo corrugado para evitar su deformación excesiva y así otorgarle la resistencia necesaria para soportar las cargas solicitantes. Sin embargo, ha sido usada con muy buenos resultados en otros países, como Canadá y Australia, por lo que representa una alternativa factible si la construcción se lleva a cabo de manera correcta.

Este trabajo está orientado a determinar si el diseño con tubos de acero corrugado es técnicamente factible y efectuar una comparación económica respecto de los túneles tradicionales de hormigón armado, con el fin de determinar si representa una mejor opción para un proyecto en su totalidad.

2. Antecedentes

2.1 Introducción general

Los materiales granulares desempeñan un papel importante en muchos procesos productivos y en distintos tipos de industrias, entre las que se encuentra la agricultura, la construcción y la minería. Dependiendo del tipo de industria y del proceso productivo a desarrollar deben ser almacenados para su posterior utilización.

En el caso de la minería el material granular suele acumularse formando un cono de grandes dimensiones denominado pila de acopio o *stock pile*, permitiendo darle continuidad a la producción desde la extracción del material de la mina. Dependiendo del proyecto, estas pilas de acopio pueden llegar a medir desde 10 hasta 50 metros de altura, por lo que la extracción del material mediante vehículos de carga podría no ser lo suficientemente eficiente, surgiendo así como solución el diseño con túneles de recuperación como una mejor alternativa.

2.2 Túneles de recuperación y diseño tradicional

Los túneles de recuperación tienen como función contener en su interior la correa transportadora, la cual a su vez tiene la función de extraer el material desde la pila y transportarlo al siguiente proceso. Se trata de estructuras enterradas a poca profundidad bajo las pilas de acopio de material granular que se forman mediante depositación a cierta altura (ver figura 1-1). Como ya se ha mencionado anteriormente, estos túneles usualmente están contruidos de hormigón armado con una sección transversal rectangular y en algunas ocasiones presentan una sección con forma de arco. En su interior se ubican los equipos e instalaciones necesarias para efectuar el transporte de material, tales como ductos de aire, instalaciones eléctricas, chutes y la correa transportadora, entre otros.

El diseño de los túneles de recuperación con hormigón armado fue estudiado y analizado en el año 2017 por Nicolás Alvarado et al. en su memoria para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile “Análisis comparativo de túnel de recuperación minero en forma rectangular y de arco”, por lo que los resultados obtenidos para el diseño con tubos de acero corrugado serán comparados con los resultados expuestos en dicho trabajo.

2.3 Diseño de túneles de recuperación

En general el diseño de los túneles de recuperación se encuentra determinado por distintos factores. Uno de los más importantes tiene relación con las dimensiones del espacio interior que se requiere para la operación. Este espacio deberá ser lo suficientemente amplio de modo que permita la operación de los equipos e instalaciones necesarias según la capacidad de producción del proyecto en su totalidad.

Por otra parte, las cargas solicitantes, tales como el peso de los equipos interiores, el peso de la pila de acopio y un eventual sismo constituyen solicitaciones relevantes a considerar al momento de diseñar los túneles de recuperación. Estos últimos dos estados de carga son particularmente relevantes pues obligan a estudiar la distribución del perfil de presiones que se genera bajo una pila de acopio y el efecto que tiene un evento sísmico sobre estructuras enterradas. Por este motivo serán analizadas más profundamente en las secciones siguientes, de manera de obtener un diseño apropiado que permita reducir el costo total y el tiempo constructivo de los túneles de recuperación.

2.4 Perfil de presiones bajo una pila de acoplamiento

La distribución de las presiones que se ejercen bajo una pila de acoplamiento ha sido objeto de estudio por distintos autores. A continuación se presentan algunos de los estudios más relevantes utilizados en el desarrollo de este trabajo.

En 1997 Huntley et al. desarrolló un experimento para medir la distribución de la fuerza de contacto bajo una pila de material granular. En este estudio se investigan 8 materiales granulares con distintas propiedades (ángulo de reposo, densidad, tamaño de partícula, entre otras), tal como se presentan en la figura 2-1. El octavo material es una mezcla de esferas de vidrio pequeñas y grandes. Se realizaron varias mediciones para cada uno de los materiales con el fin de obtener resultados más representativos.

Powder	Angle of repose / °	Loosely-packed density / Mg m^{-3}	Tightly-packed density / Mg m^{-3}	Mean particle size / mm	Standard deviation of sizes / mm
lead-shot	20.9	8	9	2.62	0.01
sand	30.7	1.4	1.5	0.22	0.12
large glass beads	20.6	2.1	2.3	0.56	0.05
small glass beads	22.8	1.9	2.2	0.18	0.02
large lightly-frosted glass beads	22.9	1.9	2.1	0.56	0.06
large heavily-frosted glass beads	24.5	1.7	2.0	0.54	0.06
flour	49.2	0.59	0.82		

Figura 2-1. Tabla de materiales usados y sus propiedades. Fuente: Huntley et al. (1997)

Los resultados del perfil de presiones se presentan en las figuras 2-2, 2-3 y 2-4, donde cada punto corresponde al promedio de la medición, y la línea que se extiende verticalmente en cada uno representa la desviación estándar.

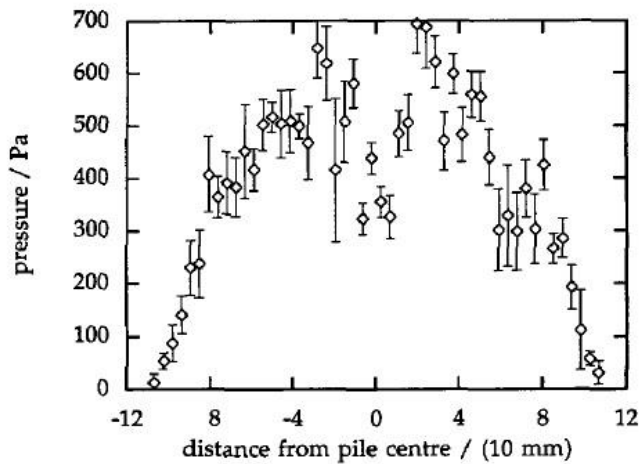


Figura 2-2. Perfil de presiones arena. Fuente: Huntley et al. (1997)

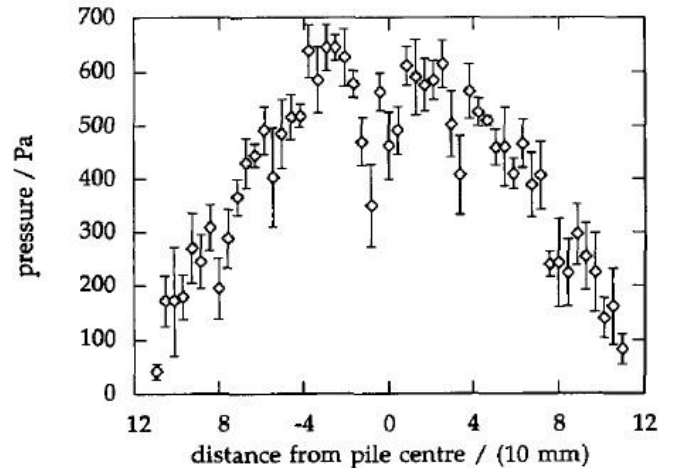


Figura 2-3. Perfil de presiones esferas de vidrio pequeñas. Fuente: Huntley et al. (1997)

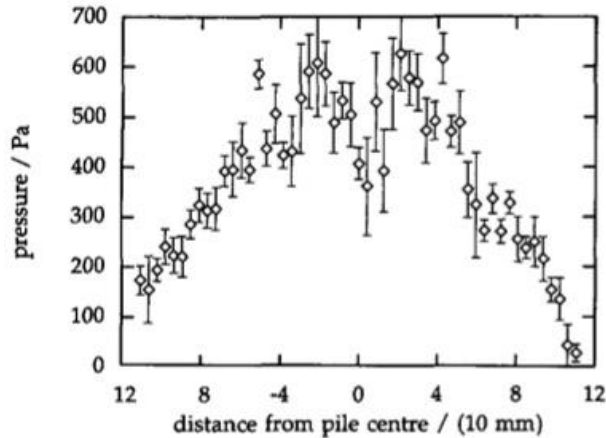


Figura 2-4. Perfil de presiones mezcla esferas de vidrio. Fuente: Huntley et al. (1997)

Se puede observar una depresión central en el perfil de presiones para estos 3 materiales, cuyo máximo se encuentra a una distancia entre 0.2 a 0.4 veces el radio de la pila, lo que no ocurre para el resto de los materiales. Esto resulta interesante ya que es contra-intuitivo, puesto que se esperaría que la mayor presión estuviera en el centro de la pila, sin embargo esto no ocurre para algunos materiales granulares. Cabe destacar que de la experiencia también se desprende que esta depresión central no depende del coeficiente de fricción de la superficie sobre la que se encuentra la pila.

En el año 2006, William McBride et al. también realizó un experimento para medir la presión basal bajo una pila de acoplamiento. El estudio solo considera un tipo de material: roca triturada con tamaño de partícula de 10 milímetros aproximadamente. Además, en la medición se incluye el proceso de llenado, es decir, durante la formación de la pila, y cuenta con un alimentador en el centro de la base para extraer el material y luego medir durante el relleno y observar posibles cambios.

Los resultados de este estudio se grafican en las figuras 2-5, 2-6 y 2-7. El proceso de llenado (formación de la pila) se realizó 3 veces pero sólo se presenta uno de los gráficos obtenidos ya que son muy similares entre sí.

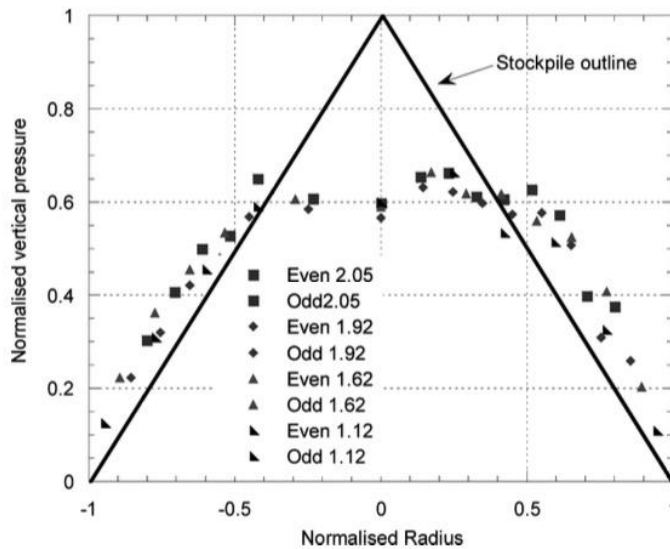


Figura 2-5. Cargas de llenado en pila de acoplamiento. Fuente: McBride et al. (2006)

Tal como se observa en la figura 2-5, nuevamente se obtiene una depresión central en el perfil de presiones durante el proceso de llenado, dicha depresión aparece casi inmediatamente al comenzar la formación de la pila. Además, es importante notar que la pila de acoplamiento inicial se dejó almacenada durante 7 días antes de iniciar el proceso de recuperación, durante este periodo de almacenamiento no se registró una redistribución de los esfuerzos obtenidos inicialmente.

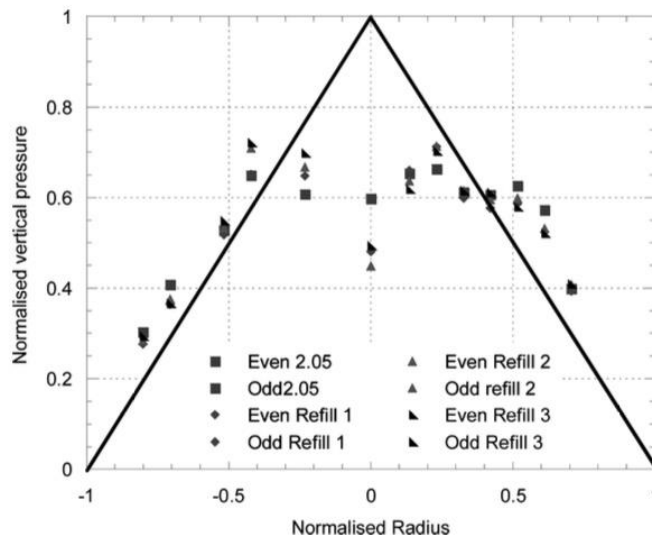


Figura 2-6. Cargas de relleno en pilas de acoplamiento. Fuente: McBride et al. (2006)

En la figura 2-6 se presentan los resultados de 3 pruebas de rellenado. En esencia, los resultados son los mismos, se puede observar la misma forma en las 3 pruebas con una muy baja variación, tanto en el valor mínimo de la depresión central como en el valor máximo al aumentar ligeramente el radio.

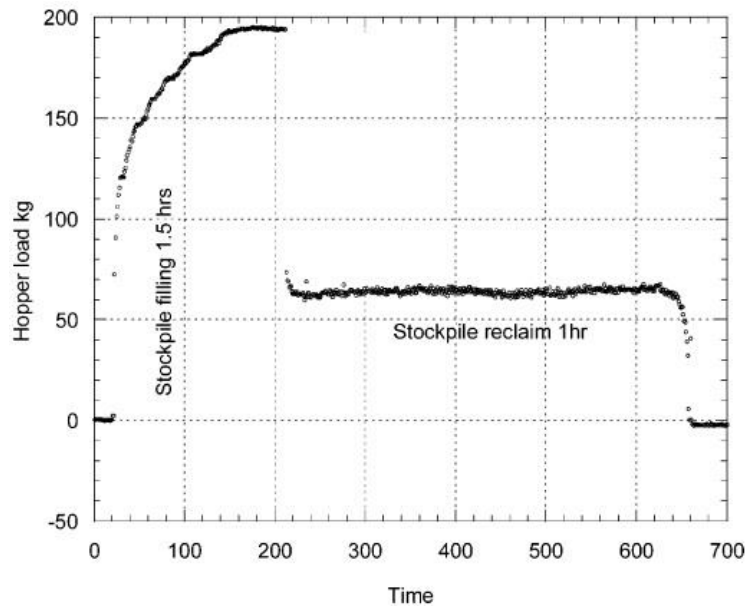


Figura 2-7. Carga sobre el alimentador. Fuente: McBride et al. (2006)

Por último, se presenta la carga sobre el alimentador durante el proceso completo (ver figura 2-7). Se observa que al iniciar la formación de la pila se alcanza rápidamente el máximo valor. Luego al iniciar el proceso de recuperación, la carga desciende a un 40% de este valor aproximadamente y se mantiene constante hasta el final del proceso.

Ooi et al. en el año 2008 realiza un estudio similar a los anteriores, para el cual utiliza bolas de hierro con un diámetro promedio de 3 milímetros. Se llevaron a cabo 5 pruebas en las cuales se midió durante la formación de la pila y una vez que ésta ya se ha formado (ver figura 2-8). Además, se comparan los resultados obtenidos al construir la pila sobre una base rígida y sobre una base flexible (ver figura 2-9).

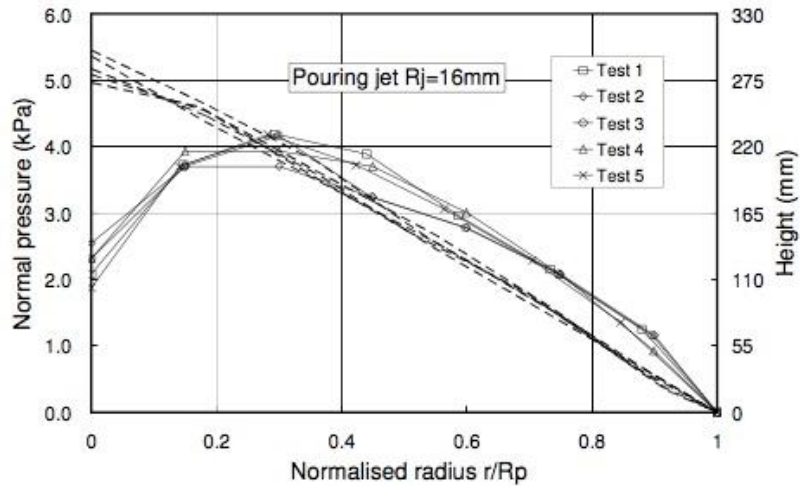


Figura 2-8. Perfiles de presión para 5 pruebas. Fuente: Ooi et al. (2008)

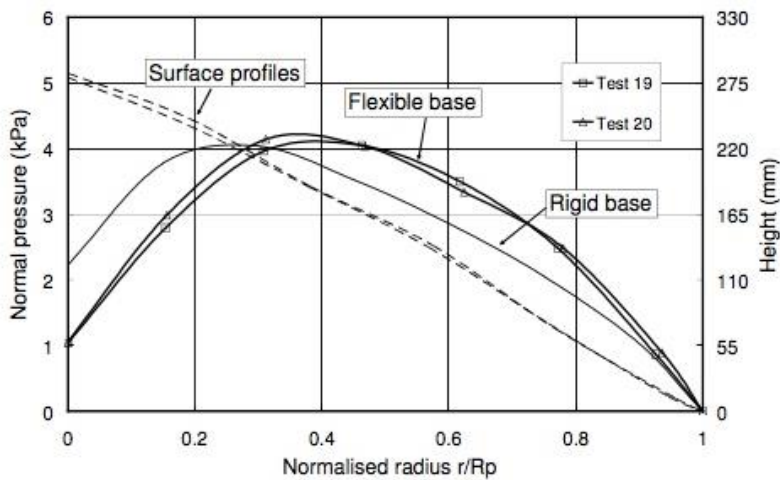


Figura 2-9. Influencia de la deflexión de la base en perfil de presión. Fuente: Ooi et al. (2008)

Nuevamente se obtienen resultados similares en cuanto a la forma de los perfiles de presiones presentados en la figura 2-8, donde se puede ver que la presión máxima se encuentra a una distancia de 0.3 veces el radio aproximadamente y que la presión central de la pila puede llegar a ser un 50% de la presión hidrostática en ese punto. Luego, al considerar una base flexible en comparación con una base rígida, se observa que disminuye el valor mínimo en el centro, aumenta ligeramente el valor máximo y este se desplaza hacia los bordes aumentando el ancho de la depresión central. Esto último es de gran importancia debido a que en el diseño considerado, la base corresponde al suelo presente en terreno, el cual puede variar entre proyectos.

Finalmente, se hará mención a la tesis publicada por Conley et al. en el año 2012. A partir de los resultados obtenidos, se genera una curva que predice de buena forma este perfil de presiones bajo una pila cónica e identifica el valor mínimo y el valor máximo, la cual tiene un 90% de certeza al ser comparada con los resultados experimentales por lo que obtiene valores muy confiables.

Los resultados obtenidos en los trabajos expuestos concuerdan entre sí, bajo una pila de acopio de material granular se genera una descarga bajo la clave de la pila de acopio y una sobrecarga a una distancia aproximada de 0,3 veces el radio de la pila, contrario a las magnitudes del perfil hidrostático que se esperaría. Esta distribución con forma de letra “M” también está presente durante los procesos de llenado, recuperación y rellenado de la pila, lo cual resulta relevante dado que en la práctica de un proyecto minero podrían ocurrir eventualmente estos procesos.

Resulta fundamental considerar esta distribución en el perfil de presiones bajo una pila de acopio ya que podría evitar un sobredimensionamiento de la estructura y por ende, implicaría una reducción de costos. Además, cabe destacar que al colocar una estructura de acero corrugado en un suelo existente, se genera un efecto de arco, el cual fue estudiado y analizado en el año 2001 por Edgardo Schmitz et al. en su memoria para optar al título de ingeniero civil de la Universidad de Chile “Recomendaciones para el análisis y diseño de tuberías de acero corrugado”.

Schmitz et al. (2001) sostiene:

Al instalar una estructura de acero corrugado en un medio continuo, podemos considerar en cierta forma que hemos reemplazado un sector de suelo existente por una tubería... Si la tubería instalada tiene la misma rigidez del material reemplazado, entonces diremos que “el suelo no se percata del cambio” y se mantiene la misma presión geostática original ($p=\gamma h$), no existiendo efecto de arco... En la realidad la tubería puede ser menos rígida que el relleno desplazado, en este caso al deformarse más que el material adyacente el suelo sobre la tubería tiende a “colgarse” del suelo lateral, produciéndose un efecto de arco positivo que disminuye la presión sobre la tubería..., siendo el comportamiento típico esperado de las tuberías de acero. En el caso contrario, cuando la estructura es más rígida que el suelo reemplazado, el material adyacente se cuelga de la columna de suelo sobre la tubería, aumentando la presión vertical, produciendo lo que se conoce como efecto de arco negativo... (p. 30-31).

El análisis realizado por Edgardo Schmitz et al. (2001) afirma: “Por lo tanto estas estructuras se alejan de ser estructuras flexibles ya que, basados en un análisis como el antes descrito, siempre se recargan” (p. 41). Sin embargo, este resultado dependerá

de una serie de variables que determinan la rigidez tanto del suelo como del tubo, tales como las propiedades del suelo circundante, el espesor y el diámetro del túnel de acero corrugado, entre otros, por lo que, sin lugar a dudas, debe tomarse en cuenta al momento de diseñar este tipo de estructuras enterradas.

Si bien los resultados presentados no se utilizan directamente en el desarrollo de este trabajo, ya que FLAC3D permite modelar la pila como un material granular con sus respectivas propiedades, ayudan a entender de mejor manera el comportamiento de las presiones que se generan bajo una pila de acoplamiento, facilitando así la interpretación de los esfuerzos internos del tubo de acero corrugado entregados por el programa.

2.5 Análisis sísmico de estructuras enterradas

En muchas ocasiones el análisis sísmico para estructuras enterradas no es considerado, esto principalmente debido a que la estructura se mueve en solidario con el suelo circundante como un solo cuerpo, por lo que las cargas sísmicas son significativamente menores con respecto a otras sollicitaciones.

En la norma AASHTO LRFD (2014, págs. 3-55) se menciona que los “efectos sísmicos para alcantarillados y estructuras enterradas no necesitan ser considerados excepto en donde se cruce una falla activa”. Sin embargo, según la normativa en Chile debido a su naturaleza sísmica, es necesario hacer un análisis dinámico a todas las estructuras industriales. Entre los métodos utilizados para el análisis sísmico se encuentran aquellos incluidos en el Manual de Carreteras volumen 3, la norma NCh433 modificada en 2012 y la norma NCh2369. Sin embargo, estos métodos no son aplicables directamente a los túneles de recuperación debido a que están pensados para el diseño de subterráneos de edificios o túneles mineros, por lo que debieran ser adaptados a las condiciones que presenta este tipo de estructuras.

Existe otra alternativa para realizar un análisis sísmico, la cual consiste en utilizar registros sísmicos reales de aceleración v/s tiempo obtenidos mediante sismógrafos colocados in situ, lo cual entregaría información precisa sobre el comportamiento que se produce en túneles de recuperación debido a un evento sísmico. A pesar de ser una de las mejores alternativas para llevar a cabo un análisis sísmico, por lo general no se utiliza debido a que conlleva un elevado costo y depende de la ocurrencia de eventos sísmicos en la zona a analizar.

En el manual canadiense para tuberías de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products* también se presenta una forma de considerar un evento sísmico para este tipo de estructuras, la cual consiste en agregar la carga dinámica a las cargas estáticas como un factor por estas últimas. Este factor corresponde a la aceleración vertical generada por un sismo y se calcula como $2/3$ de la aceleración horizontal del suelo en el cual se ubicará la estructura.

2.6 Diseño estructural de túneles con tubo de acero corrugado

Se diseña estructuralmente el túnel de recuperación con tubo de acero corrugado según lo detallado en el capítulo 6 del manual canadiense para tuberías de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products*. En esta sección se presenta el procedimiento utilizado para diseñar el tubo de acero corrugado que se describe en dicho manual, junto con las fórmulas y parámetros usados.

De acuerdo a las dimensiones del túnel se debe seguir el procedimiento detallado para estructuras enterradas con un diámetro o vano mayor a 3 metros. Se utiliza el método CHBDC (*The Canadian Highway Bridge Design Code*), el cual se basa en el diseño de los estados límites de las estructuras.

2.6.1 Estados límites de diseño

Los estados límites que se deben verificar para las estructuras suelo-metal, según el método CHBDC descrito en el capítulo 6 del manual canadiense para tuberías de acero corrugado, son los siguientes:

- Falla a compresión
- Formación eje plástico durante la construcción
- Falla de la conexión
- Deformación durante la construcción

2.6.2 Combinaciones de carga

En esta sección se presentan los métodos de cálculo de los esfuerzos de diseño con sus respectivas combinaciones de cargas adaptadas a las condiciones del sistema.

- Método de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD)

Los túneles de recuperación mineros corresponden a una estructura industrial cavada a cielo abierto y enterrada hasta la superficie, por lo tanto se permite el uso de las combinaciones expuestas en la norma chilena NCh2369:

- 1) 1,4 D*
- 2) 1,2 D + 1,6 L + 1,6 H
- 3) 1,2 D + 1,0 L + 1,6 H
- 4) 1,2 D*
- 5) 1,2 D + 1,0 L
- 6) 0,9 D*
- 7) 1,2 D + 1,0 L + 1,2 H + 1,4 E
- 8) 0,9 D + 1,2 H + 1,4 E

Donde:

D: Cargas muertas totales.

D*: Carga sólo por peso propio.

L: Cargas vivas.

H: Cargas por presión lateral del suelo.

E: Cargas sísmicas.

- Método de diseño manual canadiense (CHBDC)

Los factores de carga usados para calcular las cargas amplificadas según lo expuesto en el manual canadiense son:

$$\alpha_{DL} = 1.25 \quad \text{Cargas muertas}$$

$$\alpha_{LL} = 1.70 \quad \text{Cargas vivas}$$

Así, el esfuerzo de diseño se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_f = 1,25 \cdot T_D + 1,7 \cdot T_L + T_E$$

Donde:

T_f : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a las cargas amplificadas.

T_D : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a cargas muertas sin amplificar.

T_L : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a cargas vivas sin amplificar.

T_E : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a cargas sísmicas.

Las solicitaciones sísmicas se determinan de la siguiente forma:

$$T_E = T_D \cdot A_V$$

$$A_V = \frac{2}{3} \cdot A_H$$

Donde:

T_E : Esfuerzo en la pared de una estructura suelo-metal debido a una carga sísmica.

T_D : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a cargas muertas sin amplificar.

A_V : Relación de la aceleración vertical debido a una carga sísmica.

A_H : Relación de la aceleración horizontal debido a una carga sísmica.

2.6.3 Factores de resistencia del material

Los factores de resistencia, ϕ , se presentan en la figura 2-10 y se utilizan para calcular la resistencia reducida de las paredes de la estructura suelo-metal.

Type of Structure	Component of Resistance	Material Resistance Factor
Soil-metal with shallow corrugations	Compressive strength	$\phi_t = 0.80$
	Plastic hinge during construction	$\phi_{hc} = 0.90$
	Connections	$\phi_j = 0.70$
Soil-metal with deep corrugations	Compressive strength	$\phi_t = 0.80$
	Plastic hinge	$\phi_h = 0.85$
	Plastic hinge during construction	$\phi_{hc} = 0.90$
	Connections	$\phi_j = 0.70$
Metal box	Compressive strength	$\phi_t = 0.90$
	Plastic hinge	$\phi_h = 0.90$
	Connections	$\phi_j = 0.70$

Figura 2-10. Factores de resistencia del material, Φ . Fuente: *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)*

2.6.4 Proceso de diseño: Estructuras suelo-metal

El procedimiento que se sigue para el diseño estructural del túnel de recuperación con tubo de acero corrugado se detalla a continuación. Dicho procedimiento se encuentra detallado en el capítulo 6 del manual canadiense para tuberías de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products*.

1. Altura mínima de recubrimiento de suelo

Para estructuras suelo-metal diseñadas de acuerdo el método CHBDC, la altura mínima de recubrimiento permitida, H_{min} (ver figura 2-11), es el mayor valor entre:

- a) 0,6 [m]
- b) $\frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v}\right)^{1/2}$ [m]
- c) $0,4 \left(\frac{D_h}{D_v}\right)^2$ [m]

Donde:

D_h : Dimensión horizontal (diámetro o vano efectivo) de la estructura según lo definido en la figura 2-12, [m].

D_v : Dimensión vertical (altura efectiva) de la estructura según lo definido en la figura 2-12, [m].

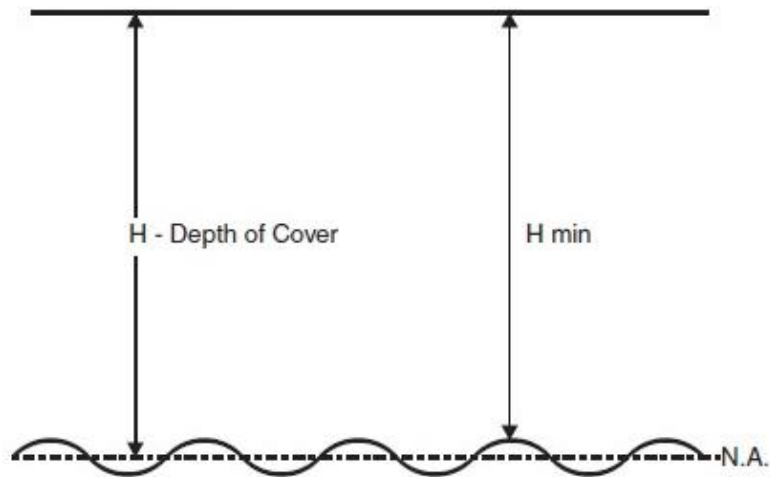


Figura 2-11. Altura de recubrimiento para estructuras suelo-metal. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)

Para estructuras suelo-metal con corrugaciones profundas, la altura mínima de recubrimiento de suelo debe ser el menor valor entre 1,5 m y la altura mínima de recubrimiento para una estructura con corrugación poco profunda pero con el mismo tamaño del conducto.

El requerimiento de la altura mínima de recubrimiento está destinado a asegurar que los momentos de flexión en la pared debido a cargas vivas estén limitados a un nivel en el cual pueden ser despreciados en el diseño de manera segura. También está destinado a evitar la agitación de una porción de suelo sobre y hacia un lado de la estructura suelo-metal debido a la aplicación de una carga superficial de gran magnitud.

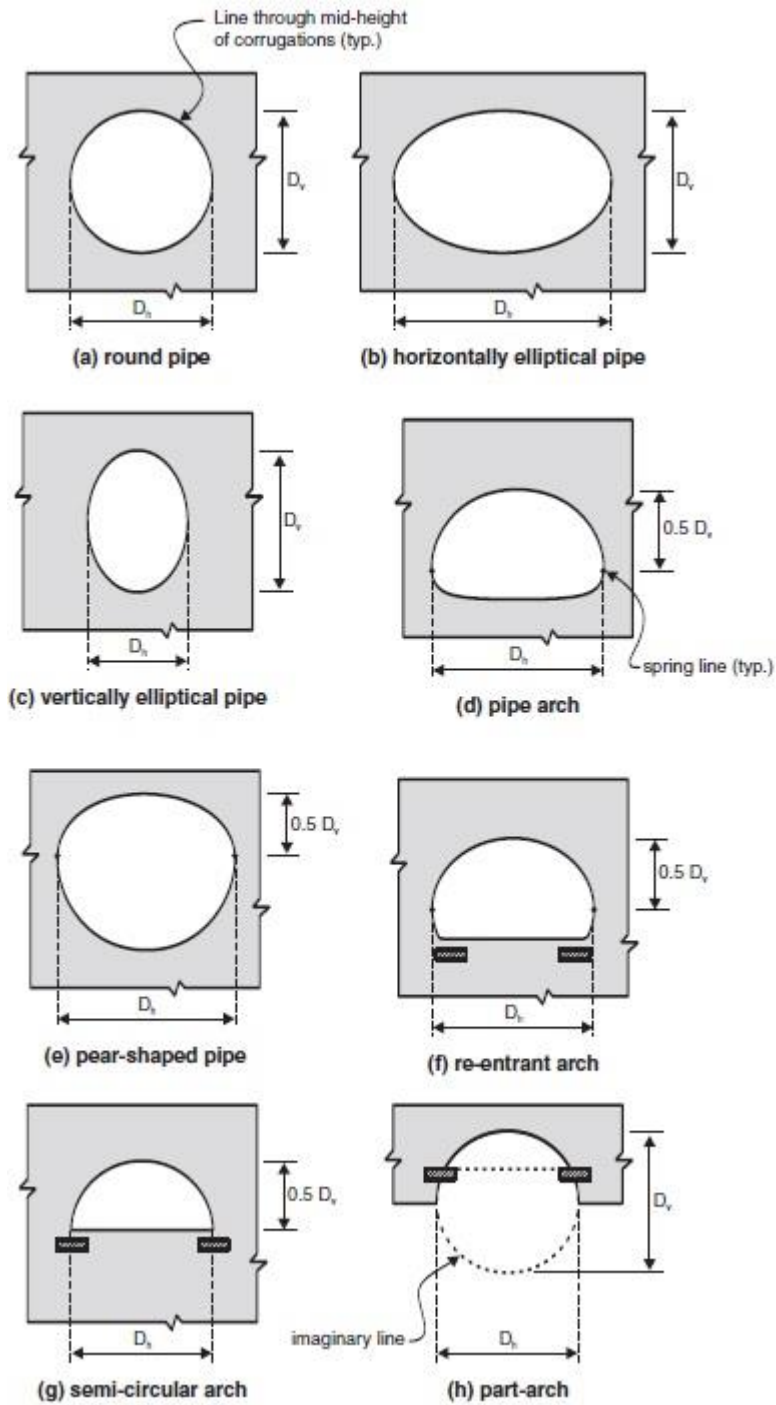


Figura 2-12. Definiciones de D_h y D_v para varias formas de tubo de acero corrugado. Fuente: *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)*

2. Esfuerzo de compresión en el estado límite último

En el estado límite último, el esfuerzo de compresión en la pared del tubo de acero corrugado no debe exceder el esfuerzo de falla a compresión reducido de ésta.

$$\sigma \leq f_b$$

Donde:

$$\sigma = \frac{T_f}{A}$$

σ : Esfuerzo de compresión en el estado límite último.

f_b : Esfuerzo de falla a compresión de la pared, reducido.

T_f : Esfuerzo amplificado en la pared debido a las cargas.

A : Área transversal del perfil de corrugación.

3. Resistencia de la pared en compresión

El esfuerzo de falla a compresión reducido de la pared del tubo de acero corrugado se calcula de la siguiente forma:

a) Para $R \leq R_e$

$$f_b = \phi_t \cdot F_m \left(F_y - \frac{(F_y \cdot K \cdot R)^2}{12 \cdot E \cdot r^2 \cdot \rho} \right)$$

b) Para $R > R_e$

$$f_b = 3 \cdot \phi_t \cdot \rho \cdot F_m \cdot E / \left(\frac{K \cdot R}{r} \right)^2$$

Donde:

- i. E_m para el costado y la parte inferior de la pared de la estructura es igual a E_s , mientras que para la parte superior de la pared de la estructura se obtiene de la siguiente expresión:

$$E_m = E_s \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_c + 1000[H + H']} \right)^2 \right]$$

- ii. λ para la parte superior de la pared de la estructura se obtiene de la siguiente expresión:

$$\lambda = 1,22 \left[1 + 1,6 \left(\frac{E \cdot I}{E_m \cdot R_c^3} \right)^{1/4} \right]$$

Para los otros casos λ es igual a 1,22.

iii. $K = \lambda \left(\frac{E \cdot I}{E_m \cdot R_c^3} \right)^{1/4}$

iv. $\rho = \left(1000 \frac{[H+H']}{R_c} \right)^{1/2} \leq 1,0$

v. $R_e = \frac{r}{K} \left(\frac{6 \cdot E \cdot \rho}{F_y} \right)^{1/2}$

- vi. F_m es igual a 1,0 para instalaciones de estructura única, mientras que para múltiples estructuras se obtiene de la siguiente ecuación:

$$F_m = \left(0,85 + \frac{0,3 \cdot S}{D_h} \right) \leq 1,0$$

Y donde:

D_h : Dimensión horizontal (diámetro o vano efectivo) de la estructura según lo definido en la figura 2-12, [m].

E : Módulo de elasticidad de la estructura metálica, [MPa].

E_m : Módulo modificado de la rigidez del suelo, [MPa].

E_s : Módulo secante de la rigidez del suelo, según lo definido en la figura 2-13, [MPa].

F_m : Factor de reducción para modificar la resistencia de la pared en instalaciones de múltiples estructuras.

F_y : Resistencia a la fluencia de la pared de la estructura, [MPa].

H : Altura de recubrimiento, [m].

H' : La mitad de la distancia vertical entre la corona o punto más alto del tubo y la *springline* (ver figura 2-12), [m].

I : Momento de inercia del perfil de corrugación, [mm⁴/mm].

K : Factor que representa la rigidez relativa de la pared de la estructura con respecto al suelo adyacente.

R : Radio de curvatura de la pared, medido en el eje neutro de la corrugación, en una sección transversal, [mm].

R_c : Radio de curvatura de la corona o parte superior de la estructura, [mm].

R_e : Radio equivalente, [mm].

r : Radio de giro del perfil de corrugación, [mm].

S : El menor espacio libre transversal entre estructuras adyacentes, [m].

λ : Factor usado en el cálculo de K .

ρ : Factor de reducción del esfuerzo de pandeo en la pared de la estructura.

ϕ_t : Factor de resistencia para la resistencia a la compresión de las estructuras suelo-metal (ver figura 2-10).

Soil Group	Grain Size	Soil Types	Unified Soil Classification Symbol*
I	Coarse	Well Graded Gravel or Sandy Gravel	GW
		Poorly Graded Gravel or Sandy Gravel	GP
		Well Graded Sand or Gravelly Sand	SW
		Poorly Graded Sand or Gravelly	SP
II	Medium	Clayey Gravel or Clayey-sandy Gravel	GC
		Clayey Sand or Clayey Gravelly Sand	SC
		Silty Sand or Silty Gravelly Sand	SM

* According to ASTM D2487.92 *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*

Soil Group Number*	Standard Proctor Density**	Secant Modulus of Soil, E _s , MPa
I	85%	6
	90%	12
	95%	24
	100%	30
II	85%	3
	90%	6
	95%	12
	100%	15

Figura 2-13. Clasificación del suelo para determinar el valor de Es. Fuente: *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)*

4. Requerimientos de resistencia durante la construcción

Los efectos combinados del esfuerzo axial y del momento de flexión, que surgen de las cargas muertas y cargas vivas sin amplificar resultante de un equipo de construcción específico, no debe exceder la capacidad de momento plástico reducido de la sección en todas las etapas de la construcción. El esfuerzo combinado del esfuerzo axial y el momento de flexión de calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\left(\frac{P}{P_{Pf}}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_{Pf}}\right| \leq 1,0$$

Donde:

$$P_{Pf} = \phi_{hc} \cdot A \cdot F_y$$

$$M_{Pf} = \phi_{hc} \cdot M_p$$

Y donde:

M : Momento, sin amplificar, generado por el suelo circundante y por las cargas vivas de los equipos de construcción, [kNm/m].

M_p : Capacidad de momento plástico sin reducir, [kNm/m].

M_{Pf} : Capacidad de momento plástico reducido, [kNm/m].

P : Esfuerzo axial, sin amplificar, debido a las cargas muertas y a las cargas vivas producidas por equipos de construcción, [kN/m].

P_{Pf} : Resistencia a compresión reducida, [kN/m].

ϕ_{hc} : Factor de resistencia para la formación de comportamiento plástico (ver figura 2-10).

En el manual canadiense para tuberías de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products* se detalla una forma simplificada para calcular el esfuerzo axial y el esfuerzo de momento sin amplificar (P y M respectivamente) que se generan en el tubo de acero corrugado durante el proceso de construcción, sin embargo, no se incluye ya que estos esfuerzos internos se obtienen del modelo analizado en el programa FLAC3D, el cual considera las solicitaciones generadas por el suelo circundante y por los equipos de construcción.

5. Resistencia de la pared de la estructura completa con corrugaciones profundas

Un control adicional para las estructuras suelo-metal con corrugaciones profundas requiere que los efectos combinados del esfuerzo axial y del momento de flexión en el estado límite último no excedan la capacidad de momento plástico reducida de la sección en el diseño completado. La combinación del momento de flexión y el esfuerzo axial se calcula de la siguiente manera:

$$\left[\frac{T_f}{P_{Pf}} \right]^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf}} \right| \leq 1,0$$

Donde:

$$P_{Pf} = \phi_h \cdot A \cdot F_y$$

$$M_{Pf} = \phi_h \cdot M_p$$

Y donde:

P_{Pf} : Resistencia completa de la sección, reducida.

M_{Pf} : Capacidad de momento plástico de la sección, reducida.

T_f : Máximo esfuerzo axial debido a cargas amplificadas.

M_f : Máximo momento debido a cargas amplificadas.

Análogamente al punto anterior para el requerimiento de resistencia durante la construcción, en el manual canadiense para tuberías de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products* se detalla una forma simplificada para calcular los máximos esfuerzos de momento y axial (M_f y T_f respectivamente), la cual no se incluye ya que los esfuerzos máximos se obtienen del modelo analizado en FLAC3D.

6. Resistencia de la conexión

La resistencia reducida de las conexiones longitudinales no debe ser menor que el máximo esfuerzo axial debido a cargas amplificadas.

$$\phi_j \cdot S_s \geq T_f$$

Donde:

ϕ_j : Factor de resistencia para las conexiones (ver figura 2-10).

S_s : Resistencia axial de la conexión longitudinal (ver figura 2-14, 2-15 y 2-16), [kN/m]

T_f : Máximo esfuerzo axial debido a cargas amplificadas, [kN/m].

7. Radios de curvatura

El radio de curvatura de la pared del conducto, R, en cualquier ubicación, no debe ser menor que $0,2R_C$ (R_C es el radio de la corona o parte superior de la estructura).

Specified Thickness mm	Bolt per Corrugation			Bolt Diameter mm
	2	3	4	
3.0	745			19
4.0	1120			19
5.0	1470	1650		19
6.0	1840	2135		19
7.0	2100	2660	3200	19

Figura 2-14. Máxima resistencia longitudinal de la conexión [kN/m]. Placa estructural apernada con corrugación 152x51 mm. Fuente: *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)*

Specified Thickness mm	6 Bolts per Corrugation		Bolt Diameter mm
	S_S^\dagger	S_M^*	
3.53	905	Consult Manufacturer	19
4.27	1182		19
4.79	1357		19
5.54	1634		19
6.32	1926		19
7.11	2101		19

† per ASTM A796.
* Proprietary design values.

Figura 2-15. Máxima resistencia longitudinal de la conexión [kN/m]. Placa estructural apernada con corrugación 381x140 mm. Fuente: *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)*

Specified Thickness mm	Bolt Diameter mm	Compressive Seam Strength* S_S kN/m
4.0	19	1191
5.0	19	1735
6.0	19	2063
7.0	19	2238
8.0	19	2238
7.0	22	2688
8.0	22	2688

* Proprietary design values.

Figura 2-16. Máxima resistencia longitudinal de la conexión [kN/m]. Placa estructural apernada con corrugación 400x150 mm. Fuente: *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)*

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

El objetivo general del trabajo de título es estudiar la factibilidad técnica del uso de tubos de acero corrugado como solución técnica en túneles de recuperación bajo la clave de una pila de altura relevante de 50 metros.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar la aplicabilidad de los tubos de acero corrugado en toda la longitud del túnel de recuperación o en una parte de este, considerando el diseño con hormigón armado para los tramos más críticos (secciones donde se encuentran las bocas de alimentación) y tubos de acero corrugados para los otros.
- Comparar esta alternativa con el diseño de hormigón armado desde el punto de vista técnico y económico.
- Contribuir con una opción distinta para los diseños futuros de túneles de recuperación.

4. Metodología de trabajo

Para abordar y considerar todos los factores y variables que afectan el diseño de los túneles de recuperación se sigue la siguiente estrategia.

4.1 Estudio del comportamiento del terreno

En primer lugar se realiza una revisión teórica de los conceptos más importantes relacionados con estructuras enterradas y pilas de acopio. Se estudian distintos documentos en los que se analizan factores presentes y limitaciones que se puedan tener. Entre los documentos a revisar se incluyen estudios, normas y manuales.

4.2 Desarrollo del modelo del túnel de recuperación

La segunda etapa corresponde a la modelación del túnel de recuperación en el programa de análisis FLAC3D. Este es un software de análisis numérico de interacción suelo-estructura que permite tanto la modelación del tubo de acero corrugado como elemento estructural tipo *shell*, como del suelo circundante al túnel y la pila de acopio con sus respectivas propiedades, por lo que los estados de cargas asociados al suelo se encuentran integrados en el programa.

El modelo en FLAC3D se valida mediante la comparación con los esfuerzos de un modelo estático simplificado. A continuación se presenta el modelo estático simplificado (ver figura 4-1) y la expresión para obtener el esfuerzo axial en el tubo.

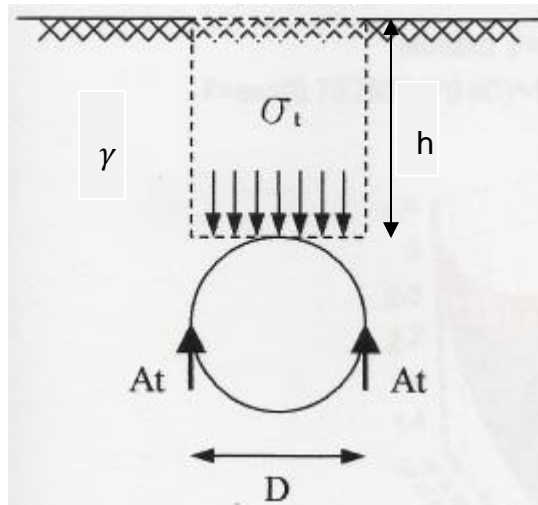


Figura 4-1. Modelo estático simplificado. Fuente: Schmitz et al. (2001)

$$\sigma_t = \gamma \cdot h$$

$$A_t = \left(\frac{D}{2}\right) \cdot \sigma_t$$

Donde:

σ_t : Presión sobre la clave [ton/m²].

γ : Densidad del suelo [ton/m³].

h : Altura de relleno sobre el túnel [m].

A_t : Esfuerzo axial teórico [ton/ml].

D : Diámetro de la tubería [m].

Además, al ser un programa tridimensional de diferencias finitas explícito, el túnel es modelado con las bocas de alimentación y considera el proceso constructivo que se lleva a cabo en la realidad.

4.3 Diseño de la propuesta

A partir de los esfuerzos internos que se generan en el tubo de acero corrugado debido a las solicitaciones de los estados de carga, entregados por el programa, se diseña estructuralmente según lo estipulado en el manual canadiense para tuberías de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction*, en el cual el método a utilizar es el CHBDC (*The Canadian Code Highway Bridge Design Code*). Esto incluye el diseño sísmico que se detalla en dicho documento, cuyo procedimiento se presenta en la sección de análisis sísmico del capítulo 6: Resultados.

Luego, se determina el costo total asociado a la implementación de tubos de acero corrugado en túneles de recuperación, considerando el costo de estos y el costo de su instalación.

4.4 Análisis comparativo con el diseño de hormigón armado

Finalmente, se realiza un análisis comparativo entre el diseño con tubos de acero corrugado y el de hormigón armado considerando el aspecto técnico y el económico. En este análisis se utilizan los resultados obtenidos por Nicolás Alvarado (2017) et al. en su memoria para optar al título de ingeniero civil de la Universidad de Chile “Análisis comparativo de túnel de recuperación minero en forma rectangular y de arco” donde se aborda a cabalidad el diseño de túnel de recuperación de hormigón armado con una geometría cuadrada y otra de arco.

Con esto se pretende determinar si es factible la opción de diseño de túneles de recuperación con tubos de acero corrugado ubicados en zonas con alta solicitación de carga y, en caso de serlo, si corresponde a una alternativa más económica y simple para futuros proyectos mineros.

5. Modelación de la estructura

5.1 Introducción

El desarrollo de este trabajo está enfocado en la comparación entre el diseño del túnel de recuperación con tubos de acero corrugado y el diseño con hormigón armado analizado por Nicolás Alvarado et al. en su trabajo de título para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile “Análisis comparativo de túnel de recuperación minero en forma rectangular y de arco”. Por esta razón, se utilizarán los mismos parámetros definidos en dicho trabajo tales como las propiedades del suelo, las propiedades de la pila, algunas dimensiones, entre otros.

El programa utilizado para el desarrollo de este trabajo de título es FLAC3D versión 5.0. Se opta por trabajar con este software de análisis numérico por diferencias finitas ya que, por un lado, permite modelar el suelo como una malla de elementos finitos con todas sus propiedades, tales como la densidad, el módulo de Young, la cohesión y el ángulo de fricción, entre otros, por lo que representa de mejor manera el comportamiento que tiene la interacción entre el suelo y el elemento estructural. Además, incluye distintos modelos constitutivos de comportamiento del suelo, dentro de los cuales se encuentran modelos elásticos y plásticos. Por otro lado, es el único que permite incorporar un elemento estructural sin la necesidad de modelarlo como una capa, lo cual es una herramienta muy útil al trabajar con tubos de acero corrugado, cuya inercia y área no pueden ser modeladas por una capa de espesor constante. Además, al ser un programa de análisis explícito en tres dimensiones, permite considerar el método constructivo en el modelo y modelar discontinuidades en el elemento estructural (bocas de alimentación del túnel de recuperación).

5.2 Bases de la modelación

5.2.1 Sistema de unidades

El programa de análisis FLAC3D debe ser utilizado con un sistema de unidades consistente para poder interpretar los resultados de manera correcta. El sistema de unidades con el cual se trabaja se presenta a continuación.

Tabla 5-1. Sistema de unidades parámetros mecánicos

Longitud	m
Densidad	kg/m ³
Fuerza	N
Presión	Pa
Gravedad	m/seg ²

Tabla 5-2. Sistema de unidades propiedades elemento estructural

Área	m ²
Rigidez axial	N/m
Momento de inercia	m ⁴
Momento plástico	N-m
Límite elástico	N
Módulo de Young	Pa

5.2.2 Descripción del túnel

El túnel de acero corrugado tiene una geometría con forma de bóveda, tal como se muestra en la figura 5-1, con un ancho de 7,4 metros de extremo a extremo, una altura de 4,2 metros y una longitud de 140 metros. El radio de la corona (punto más alto del túnel) es de 4,2 metros, el del riñón (costado) es de 1 metro y el radio del fondo es de 8,9 metros. En la parte superior se ubican 3 bocas de alimentación de 3 metros de ancho por 9 metros de largo, separadas entre sí por 5 metros.

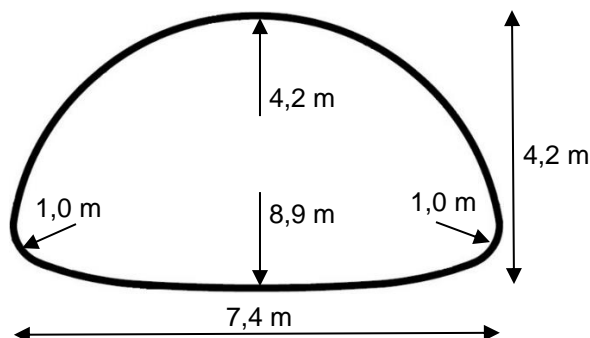


Figura 5-1. Geometría de bóveda del túnel. Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Acero corrugado

Considerando las solicitaciones de gran magnitud a las cuales estará sometido el túnel de recuperación durante su vida útil, se utilizan perfiles de corrugación con valores relevantes para el espesor, profundidad de onda y distancia entre ondas. En la tabla 5-3 se presentan las propiedades de los perfiles de acero corrugado utilizados.

Tabla 5-3. Propiedades acero corrugado para corrugación 152x51 mm, 381x140 mm y 400x150 mm. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)

Propiedades	152x51 mm	381x140 mm	381x140 mm	400x150 mm
Tipo de Acero	A-36	A-36	A-36	A-36
Módulo de Young [MPa]	210.000	210.000	210.000	210.000
Límite de fluencia [MPa]	250	250	250	250
Coeficiente de Poisson	0,3	0,3	0,3	0,3
Densidad [kg/m ³]	7.850	7.850	7.850	7.850
Espesor [mm]	7	8	10	10
Profundidad de onda [mm]	50,9	140	140	150
Distancia entre ondas [mm]	152,4	381	381	400
Área [mm ² /mm]	8,58	11,23	14,1	13,78
Momento de inercia [mm ⁴ /mm]	2.672	27.695	34.827	38.822
Radio de giro [mm]	17,6	49,67	49,75	53,11
Momento plástico [kNm/m]	26,25	98,911	124,382	129,41

Cabe mencionar que, a partir de las propiedades detalladas en el manual canadiense para tubos de acero corrugado con corrugación 381x140 mm y 400x150 mm de distintos espesores, se obtienen las propiedades detalladas en la tabla 5-3 para los tubos de acero corrugado 381x140 mm de 8 mm y 10 mm de espesor y para el tubo de acero corrugado 400x150 mm de 10 mm de espesor. Para esto, se determina la

ecuación de la recta definida por las propiedades según el espesor y se calculan dichas propiedades para 8 y 10 mm de espesor. El momento plástico se calcula a partir de las propiedades del tubo corrugado, dicho cálculo se presenta en “Anexo A”.

Además, en el programa de análisis FLAC3D se modela el túnel de recuperación con el tubo de acero con corrugación 152x51 mm y el tubo con corrugación 381x140 mm de 8 mm de espesor, para luego diseñar estructuralmente con los esfuerzos obtenidos del análisis para cada uno. Los tubos con corrugación 381x140 mm y 400x150 mm de 10 mm de espesor no se modelan debido a que el análisis en el programa requiere de una gran cantidad de tiempo, por lo que sólo se utilizan para el diseño estructural en caso de que los perfiles de corrugación analizados no cumplan con los requerimientos de resistencia.

En la figura 5-2 se presenta un esquema con los perfiles de corrugación del acero mencionados anteriormente.

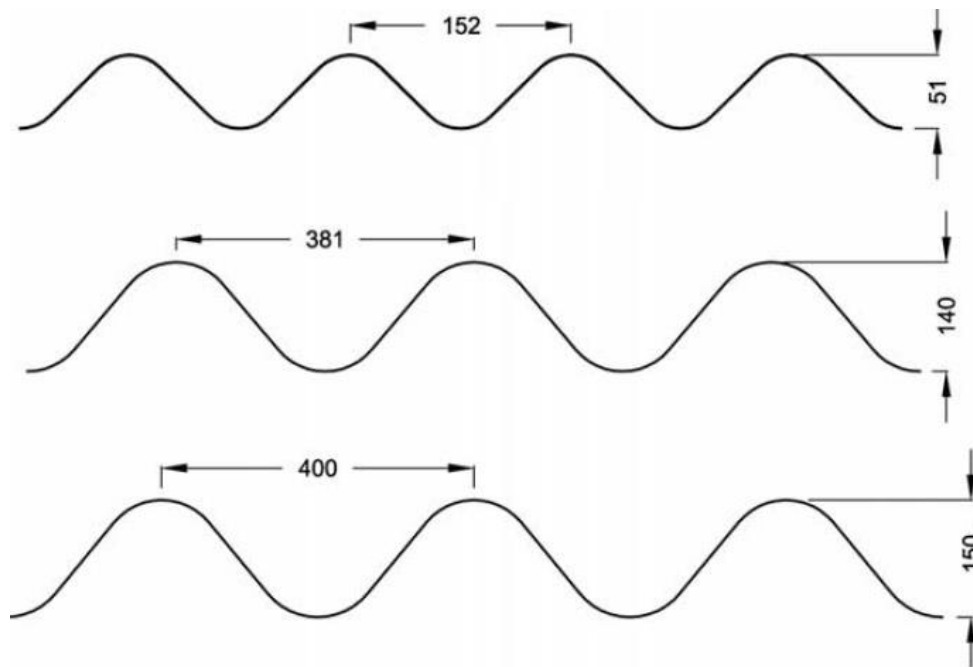


Figura 5-2. Perfiles de corrugación del acero 152x51mm, 381x140 mm y 400x150 mm. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)

Para modelar el acero corrugado en el programa, se utilizan las fórmulas del manual de FLAC3D versión 5.0 para materiales con propiedades ortotrópicas presentadas a continuación.

$$\{\sigma'\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{x'y'} \end{Bmatrix} = [E']\{\epsilon'\} = \begin{bmatrix} c'_{11} & c'_{12} & 0 \\ & c'_{22} & 0 \\ sym. & & c'_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{x'} \\ \epsilon_{y'} \\ \gamma_{x'y'} \end{Bmatrix}$$

Las constantes elásticas c'_{11} , c'_{12} , c'_{22} y c'_{33} que componen la matriz de rigidez se ingresan al programa, las cuales se calculan con las siguientes fórmulas:

$$c_{11}^{b'} = \frac{12}{t^3} D_{x'}$$

$$c_{22}^{b'} = \frac{12}{t^3} D_{y'}$$

$$c_{33}^{b'} = \frac{12}{t^3} G_{x'y'}$$

$$c_{12}^{b'} = \frac{12}{t^3} D_{x'y'}$$

Donde D_x' , D_y' , $D_x'y'$ y $G_x'y'$ representan las rigideces a la flexión y la rigidez torsional de una placa ortotrópica, respectivamente. A su vez, estas rigideces se calculan utilizando las fórmulas de la figura 5-3 para una placa corrugada y los parámetros presentados en la tabla 5-3.

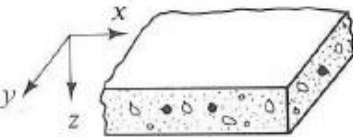
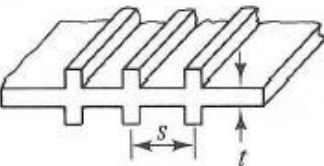
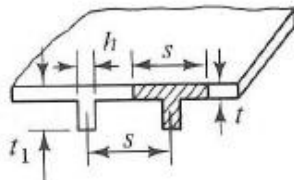
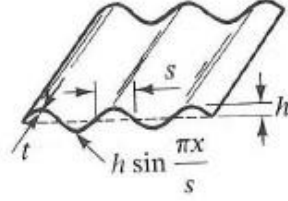
<p>A. Reinforced concrete slab with x and y directed reinforcement steel bars</p>	$D_x = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \left[I_{cx} + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) I_{sx} \right] \quad D_y = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \left[I_{cy} + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) I_{sy} \right]$
	$G_{xy} = \frac{1 - \nu_c}{2} \sqrt{D_x D_y} \quad H = \sqrt{D_x D_y} \quad D_{xy} = \nu_c \sqrt{D_x D_y}$
	<p>ν_c: Poisson's ratio for concrete E_c, E_s: Elastic modulus of concrete and steel, respectively $I_{cx}(I_{sx}), I_{cy}(I_{sy})$: Moment of inertia of the slab (steel bars) about neutral axis in the section $x = \text{constant}$ and $y = \text{constant}$, respectively</p>
<p>B. Plate reinforced by equidistant stiffeners</p>	$D_x = H = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad D_y = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} + \frac{E'I}{s}$
	<p>E, E': Elastic modulus of plating and stiffeners, respectively ν: Poisson's ratio of plating s: Spacing between centerlines of stiffeners I: Moment of inertia of the stiffener cross section with respect to midplane of plating</p>
<p>C. Plate reinforced by a set of equidistant ribs</p>	$D_x = \frac{Est^3}{12[s - h + h(t/t_1)^3]} \quad D_y = \frac{EI}{s}$
	$H = 2G'_{xy} + \frac{C}{s} \quad D_{xy} = 0$
	<p>C: Torsional rigidity of one rib I: Moment of inertia about neutral axis of a T-section of width s (shown as shaded) G'_{xy}: Torsional rigidity of the plating E: Elastic modulus of the plating</p>
<p>D. Corrugated plate</p>	$D_x = \frac{s}{\lambda} \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad D_y = EI, H = \frac{\lambda}{a} \frac{Et^3}{12(1 + \nu)} \quad D_{xy} = 0$
	<p>where</p>
	$\lambda = s \left(1 + \frac{\pi^2 h^2}{4s^2} \right) \quad I = 0.5h^2t \left[1 - \frac{0.81}{1 + 2.5(h/2s)^2} \right]$

Figura 5-3. Rigideces de varias placas ortotrópicas, donde $H = 2G_{XY} + D_{XY}$. Fuente: Ugural (1981)

Así, los valores de las constantes elásticas que componen la matriz de rigidez ingresados en el programa son:

Tabla 5-4. Valores de constantes elásticas para los perfiles de corrugación del acero 152x51 mm y 381x140 mm

Constante elástica	152x51 mm	381x140 mm
$C_{11}^{b'}$ [N/m^2]	$1,808 \cdot 10^{11}$	$1,731 \cdot 10^{11}$
$C_{22}^{b'}$ [N/m^2]	$4,063 \cdot 10^{12}$	$2,441 \cdot 10^{13}$
$C_{33}^{b'}$ [N/m^2]	$6,328 \cdot 10^{10}$	$6,058 \cdot 10^{10}$
$C_{12}^{b'}$ [N/m^2]	0	0

5.2.4 Propiedades del terreno

En la tabla 5-5 se presentan las propiedades del suelo de fundación en el cual se ubicará el túnel de recuperación.

Tabla 5-5. Propiedades del suelo de fundación

Densidad [kg/m^3]	2.200
Módulo de Young [MPa]	98,1
Cohesión [Pa]	2.000
Ángulo de fricción [°]	37
Ángulo de dilatación [°]	0
Coefficiente de Poisson	0,3

Además, la zona sísmica corresponde a una zona tipo II, por lo que la aceleración máxima del suelo tiene un valor de 0,4g.

Cabe mencionar que tanto el suelo de fundación como el relleno estructural en torno al túnel se caracterizarán según las propiedades de la tabla 5-5. El suelo modelado no considera la presencia de napas de agua, en caso de existir, se pueden generar presiones de poros negativas generando licuefacción. En estos casos se deben tomar las medidas necesarias de drenaje y/o agotamiento de napas según sea el caso, asesorándose por un especialista geotécnico. Adicionalmente, el relleno estructural debe cumplir con ciertas propiedades. Edgardo Schmitz (2001) et al. en su memoria para optar al título de ingeniero civil de la Universidad de Chile “Recomendaciones para el análisis y diseño de tuberías de acero corrugado” presenta las propiedades que debe cumplir el relleno estructural según distintas normas.

Schmitz et al. (2001) expone:

Por su parte, la norma AASHTO recomienda un relleno que cumpla con la clasificación AASHTO M145, tabla 2... Para alturas de relleno menores a 3,66 m se deben usar suelos de los grupos A-1, A-3, A-2-4 y A-2-5. Para alturas de relleno mayores a 3,66 m se deben usar suelos del tipo A-1 y A-3. La compactación no debe ser inferior al 90% de la densidad basado en la especificación AASHTO T 180 (proctor modificado)...

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)						
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Tamizado, % que pasa							
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Consistencia							
Límite líquido	...		...	B			
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B			
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas			
Calificación	Excelente a bueno						

Figura 5-4. Clasificación de suelos según la norma AASHTO

5.2.5 Propiedades de la pila

Las propiedades del material que forma la pila de acoplamiento se encuentran en la siguiente tabla, cuyos parámetros fueron recogidos del trabajo de título de Nicolás Alvarado et al. para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile “Análisis comparativo de túnel de recuperación minero en forma rectangular y de arco”.

Tabla 5-6. Propiedades de la pila de acoplamiento

Altura [m]	50
Radio basal [m]	68
Densidad [kg/m ³]	1.900
Módulo de Young [MPa]	98,1
Cohesión [Pa]	2.000
Ángulo de fricción [°]	37
Ángulo de dilatación [°]	0
Coefficiente de Poisson	0,3

5.2.6 Cargas solicitantes

En esta sección se identifican las sollicitaciones consideradas a las cuales se encuentra sometido el túnel de recuperación. El valor y el punto de aplicación de las cargas asociadas a los equipos e instalaciones internos se definen en la siguiente sección.

5.2.6.1 Cargas muertas

- **Peso propio de la estructura:** Corresponde a la carga debido al peso del tubo de acero corrugado.
- **Peso propio de la plataforma:** Esta carga está asociada al peso de la plataforma ubicada en el interior del túnel y que soporta la cinta transportadora. Esta plataforma usualmente se encuentra sujeta a los muros laterales del túnel de recuperación y su carga depende del ancho interior de este.

- **Peso propio de chutes:** Los chutes se encuentran en los bordes de las bocas de alimentación y dirigen el material hacia la cinta transportadora. Esta carga corresponde al peso de los chutes y de las planchas de desgaste ubicadas sobre estos.
- **Peso propio de la pila:** Corresponde a la carga generada por la pila de acoplamiento sobre el túnel de recuperación.
- **Peso propio relleno:** Los tubos de acero corrugado requieren de una altura mínima de recubrimiento de suelo, esta carga corresponde al peso de esta capa de suelo.

5.2.6.2 Cargas vivas

- **Sobrecarga de la plataforma:** Esta carga representa la operación de la plataforma. Se aplicará en los muros laterales como una carga distribuida.
- **Sobrecarga de la pila:** Corresponde a la carga generada debido al desplazamiento del material granular de la pila de acoplamiento hacia el túnel de recuperación.
- **Sobrecarga equipo de compactación:** Debido a la compactación del suelo circundante al tubo de acero corrugado que se requiere para su construcción, se generan esfuerzos internos.

5.2.6.3 Cargas laterales

- **Empuje del suelo:** Es la presión horizontal generada por el suelo circundante al túnel de recuperación.

5.2.6.4 Carga sísmica

Esta carga se adiciona por separado a las solicitaciones estáticas y se calcula como un valor reducido de dichas solicitaciones, según lo estipulado en el capítulo 6 de Diseño Estructural del manual canadiense para tuberías de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction*.

5.2.7 Combinación de carga

La combinación de carga que se utiliza para el diseño del túnel de recuperación con tubo de acero corrugado es la presentada en el capítulo 6 del manual canadiense *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction*, para el método CHBDC. Se opta por esta combinación ya que está enfocada al diseño de estructuras enterradas, en la cual se amplifican las cargas muertas y las cargas vivas, y además se consideran las cargas sísmicas sin castigar demasiado a la estructura, considerando que un evento sísmico afecta de distinta forma a una estructura enterrada.

$$T_f = 1,25 \cdot T_D + 1,7 \cdot T_L + T_S$$

Donde:

T_f : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a las cargas amplificadas.

T_D : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a cargas muertas sin amplificar.

T_L : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a cargas vivas sin amplificar.

T_S : Esfuerzo en la pared de la estructura debido a cargas sísmicas.

5.3 Modelo en FLAC3D

FLAC3D es un software de análisis de interacción suelo-estructura utilizado para el análisis geotécnico de roca, suelo y soporte estructural. Permite una modelación tridimensional de una gran variedad de sistemas estructurales por medio de elementos finitos. A continuación se describe el modelo realizado en FLAC3D para el túnel de recuperación.

5.3.1 Construcción del modelo

El modelo completo se construye utilizando zonas (comando *zone*) para representar el suelo y la pila de acoplamiento, y elementos estructurales de área tipo *shell* para el tubo de acero corrugado.

La figura 5-5 corresponde al modelo completo, donde el suelo circundante al túnel de recuperación tiene un ancho y un largo de 140 metros, el suelo base bajo el túnel tiene 5 metros de profundidad y las capas que lo cubren hasta una altura de 1,4 metros sobre el punto más alto del túnel tienen un espesor de 20 centímetros. Esta altura de 1,4 metros se determina a partir de la altura mínima de recubrimiento necesaria para el diseño de tubos de acero corrugado, correspondiente al capítulo de diseño estructural del túnel.

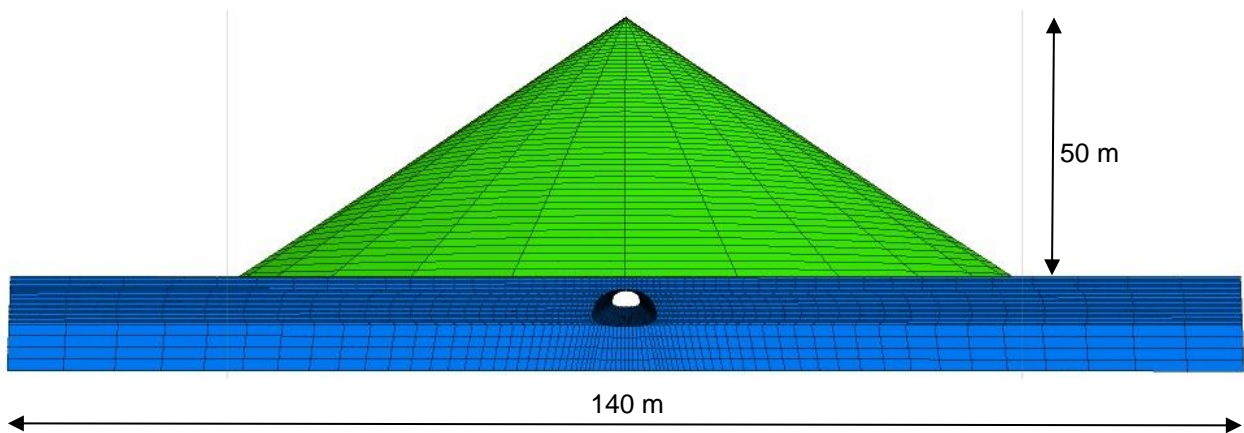


Figura 5-5. Modelo completo de túnel de recuperación en FLAC3D

El tamaño de la grilla es menor en las zonas cercanas al túnel de recuperación con el fin de obtener resultados más precisos en estas zonas de interés y de optimizar el modelo evitando tener un número muy grande de elementos. Esto se debe a que, al ser FLAC3D un software de análisis numérico por diferencias finitas, el tamaño de la grilla está relacionada con la estabilidad numérica del modelo por lo que no siempre conviene utilizar tamaños menores.

Las solicitaciones asociadas a la plataforma, los chutes y las cargas sísmicas aún no han sido consideradas en el modelo, con el fin de representar el método constructivo de la estructura, que se detalla en la siguiente sección.

El túnel de recuperación contará con 3 bocas de alimentación en la parte superior, con un ancho de 3 metros y un largo de 9 metros separadas por una distancia de 5 metros. Estas bocas de alimentación están distribuidas bajo el punto más alto de la pila de acopio. En las figuras 5-6 y 5-7 se presenta el tubo de acero corrugado modelado en FLAC3D.

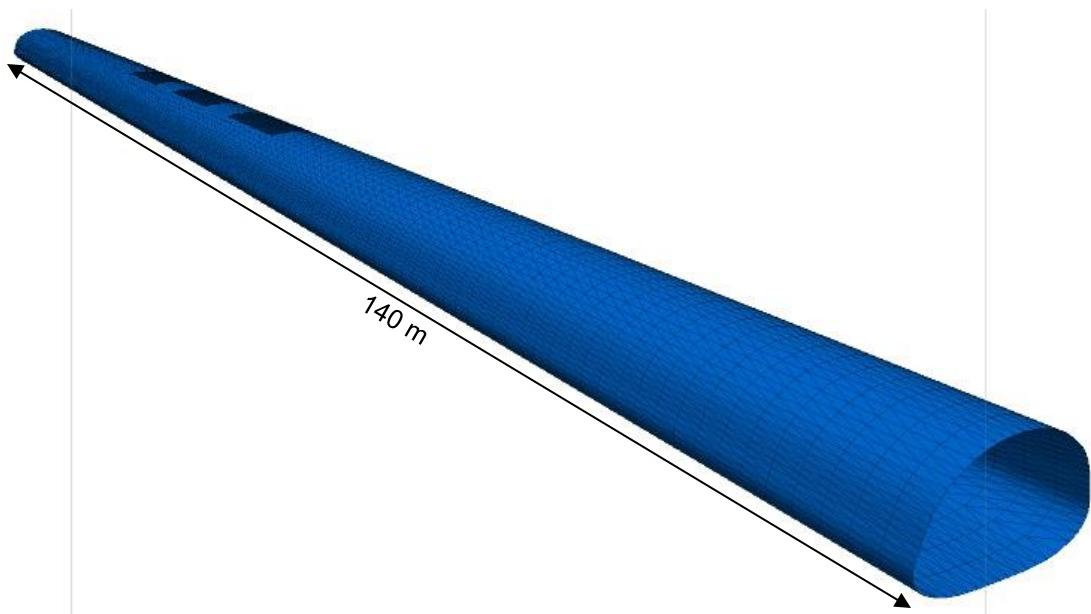


Figura 5-6. Túnel de recuperación con forma de bóveda en FLAC3D

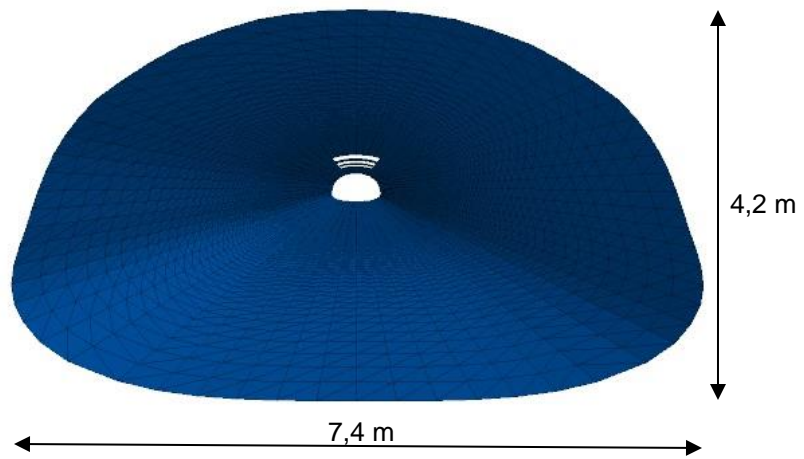


Figura 5-7. Sección transversal túnel de recuperación con forma de bóveda en FLAC3D

5.3.2 Procedimiento de análisis

En esta sección se detalla el procedimiento seguido al realizar el análisis del modelo descrito anteriormente. Este procedimiento busca representar el método constructivo de las estructuras de acero corrugado y que FLAC3D permite modelar.

En primer lugar se modela el suelo base (suelo bajo el túnel en la figura 5-8) y el tubo de acero corrugado sin las bocas de alimentación, luego aplicando solamente la gravedad se resuelve el sistema alcanzando el equilibrio. Se coloca la primera capa de 20 cm. de suelo a ambos lados del túnel, se aplica la carga de compactación, que se especifica en la siguiente sección, a ambos lados del túnel y se resuelve el sistema. Luego, se retira la carga de compactación de la primera capa, se coloca la segunda capa de suelo y se le aplica la carga de compactación para nuevamente resolver el sistema. De esta forma se van agregando y compactando las capas de suelo hasta alcanzar la altura mínima de recubrimiento. Finalmente se coloca la pila de acopio y se resuelve el sistema una vez más. A partir de los resultados entregados por el programa luego de agregar la pila de acopio, se diseña estructuralmente el tubo de acero corrugado.

Este método constructivo es fundamental para las estructuras de acero corrugado ya que les otorga la rigidez y resistencia necesarias para resistir las sollicitaciones. Además, se realiza un seguimiento a las deformaciones que se generan en el túnel durante el proceso constructivo, las cuales no pueden superar el 2%, debido a que el túnel puede fallar durante su construcción. Considerando lo expuesto anteriormente, resulta muy útil y necesario poder modelar la secuencia constructiva en el análisis del túnel de recuperación con tubo de acero corrugado.

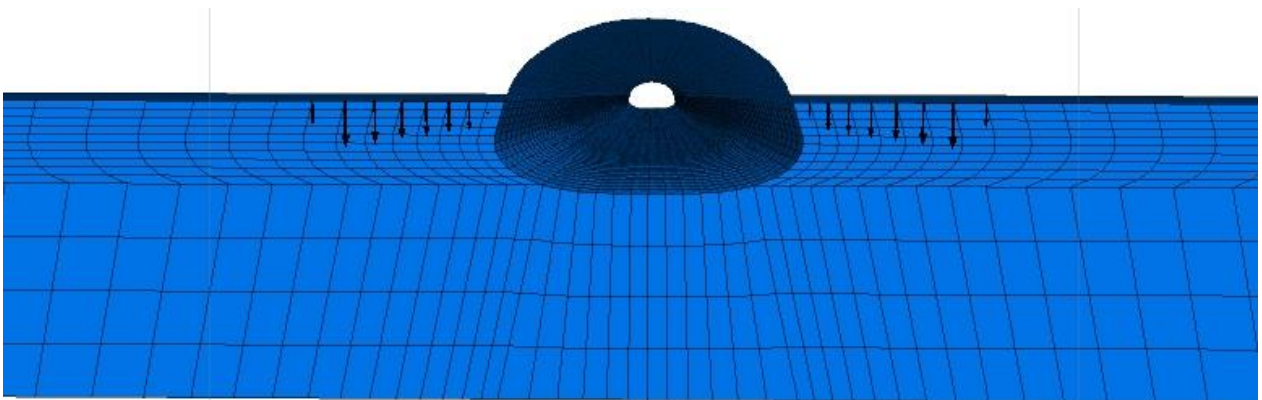


Figura 5-8. Modelo en FLAC3D en etapa intermedia del método constructivo con carga de compactación aplicada.

El siguiente paso consiste en agregar el sismo a las solicitaciones, como se detalla en la siguiente sección sobre los valores de las cargas solicitantes, y se verifica que las especificaciones de diseño se cumplan al considerar esta carga eventual.

Finalmente se modelan las 3 bocas de alimentación, se agregan las solicitaciones asociadas a la plataforma y a los chutes y se resuelve el sistema. Con la presencia de las bocas de alimentación, el material granular de la pila de acopio descende a través de estas, por lo que el modelo no alcanza un estado de equilibrio debido al desplazamiento del material. Para obtener los esfuerzos que se generan en el tubo con esta configuración se opta por ejecutar 10.000 pasos (*steps*) en FLAC3D para simular la descarga del material y observar el comportamiento del esfuerzo axial en puntos de interés cercanos a las bocas de alimentación (ver figura 5-9).

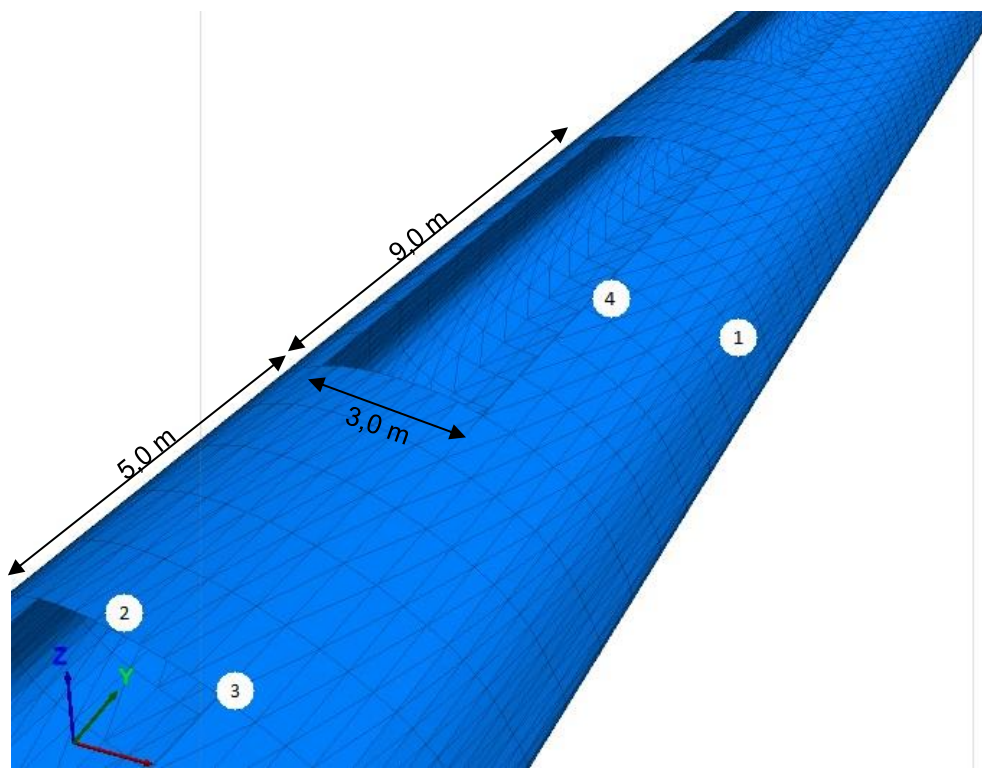


Figura 5-9. Puntos de interés a estudiar durante la descarga del material granular

El comportamiento del esfuerzo axial en los puntos de interés se presenta a continuación para el perfil de corrugación del acero 152x51 mm y para el perfil de corrugación 381x140 mm, donde el eje X y el eje Y corresponde al número de pasos ejecutados durante el análisis y el esfuerzo axial, respectivamente. Cabe mencionar que un esfuerzo negativo representa una compresión mientras que uno positivo corresponde a tracción.

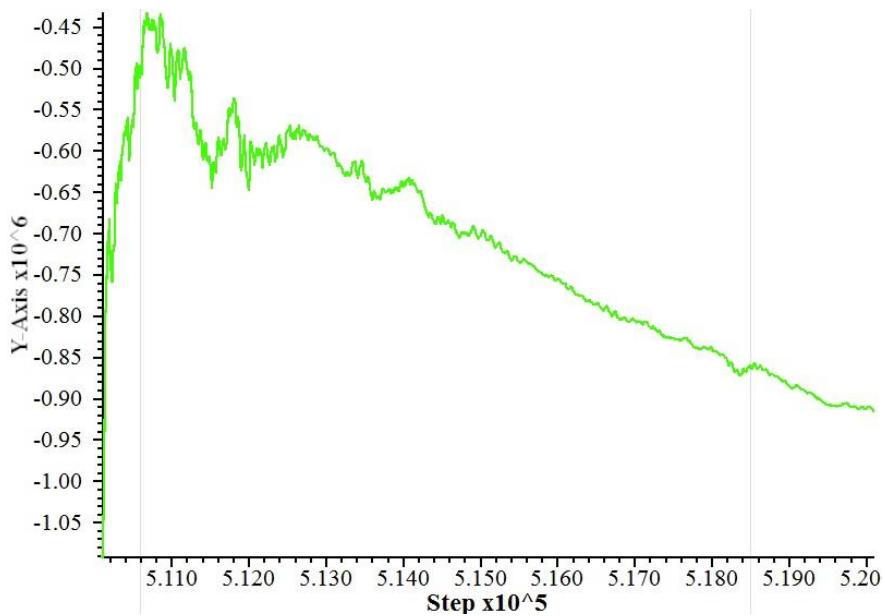


Figura 5-10. Esfuerzo de compresión en punto 1 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm

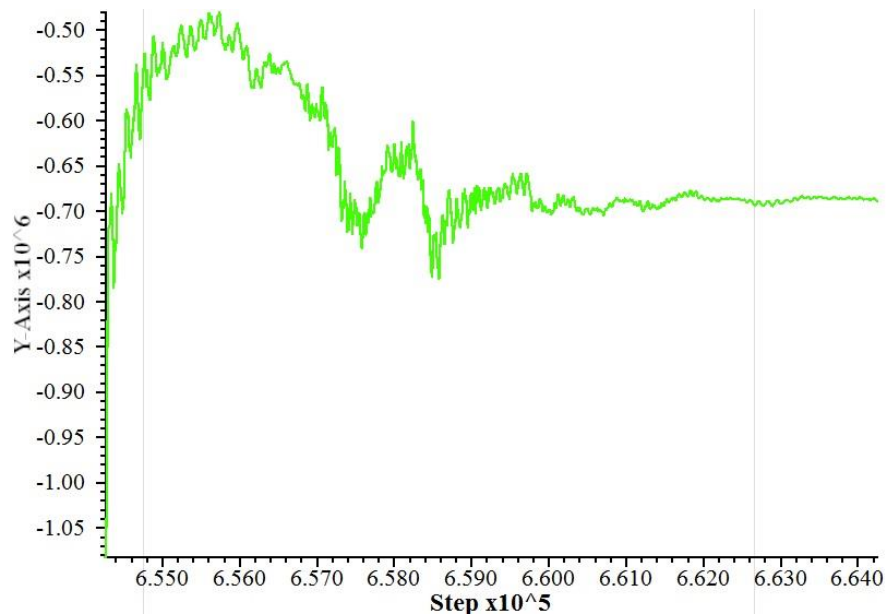


Figura 5-11. Esfuerzo de compresión en punto 1 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm

Los resultados entregados por el programa para el punto 1 concuerdan con lo esperado para ambos perfiles de corrugación; al principio, sin las bocas de alimentación, se tiene una carga de compresión elevada y esta disminuye considerablemente debido a una redistribución del esfuerzo axial por la presencia de la boca de alimentación.

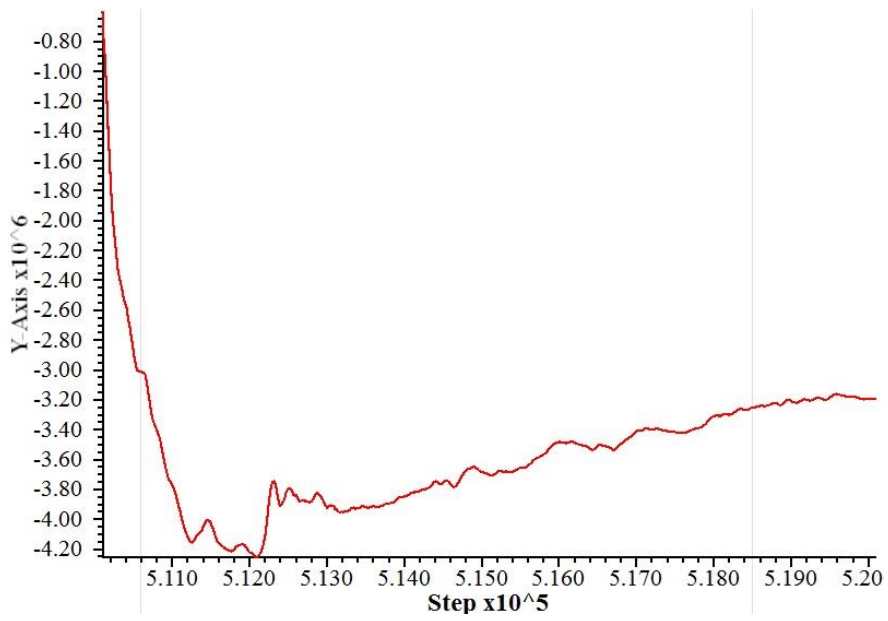


Figura 5-12. Esfuerzo de compresión en punto 2 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm

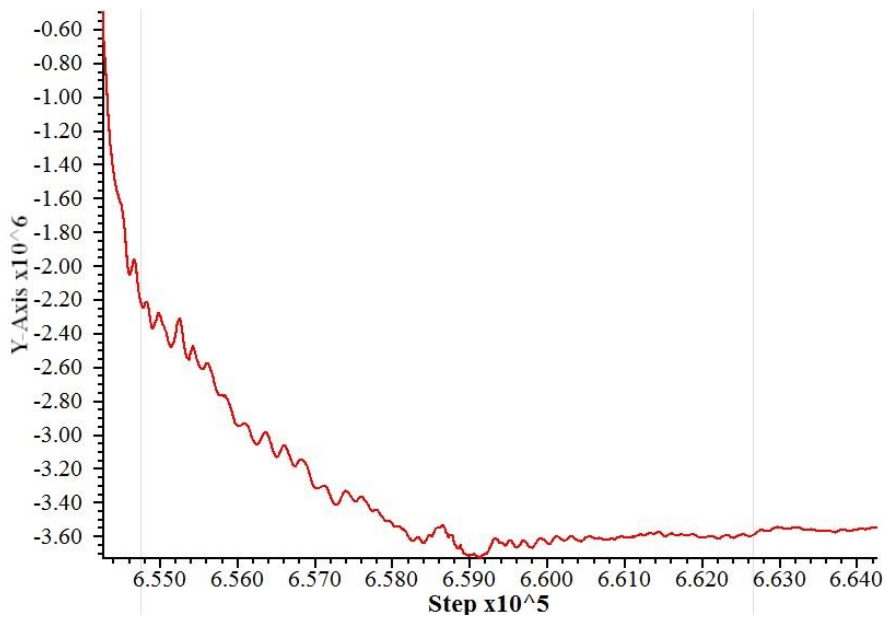


Figura 5-13. Esfuerzo de compresión en punto 2 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm

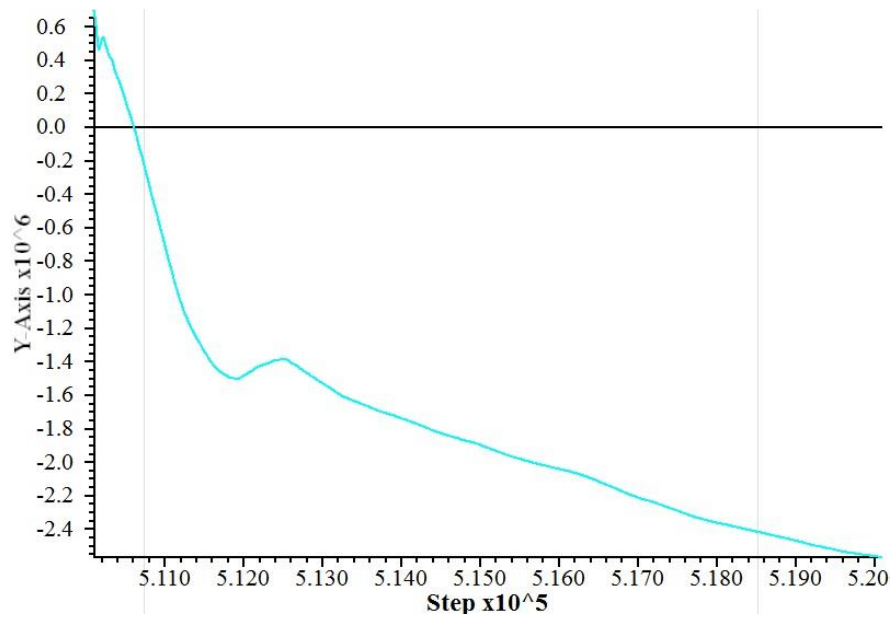


Figura 5-14. Esfuerzo de compresión en punto 3 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm

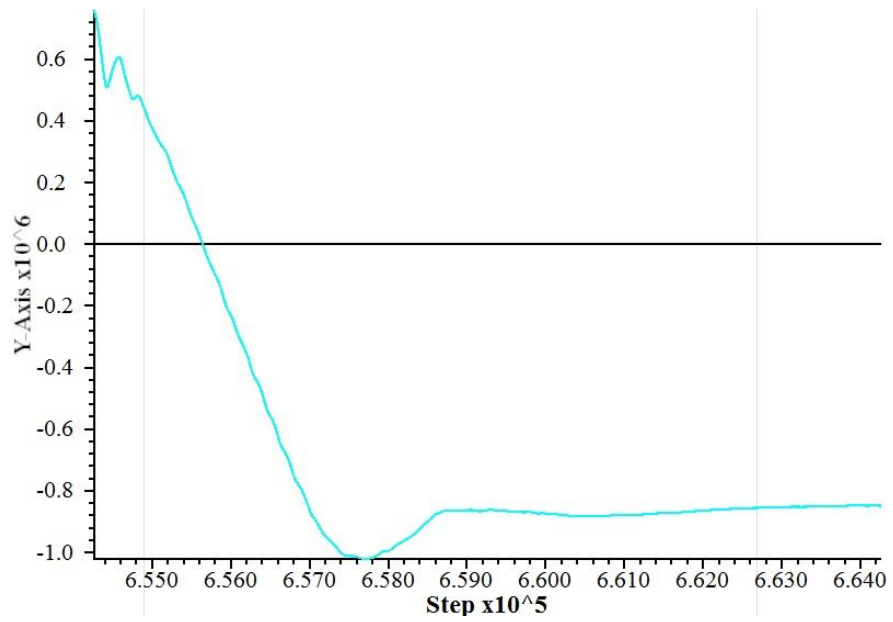


Figura 5-15. Esfuerzo de compresión en punto 3 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm

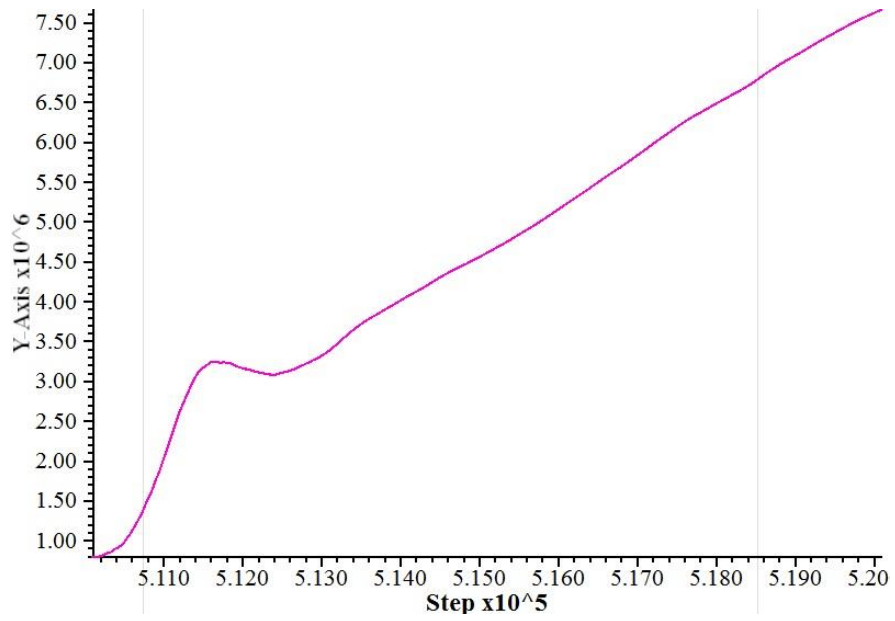


Figura 5-16. Esfuerzo de compresión en punto 4 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 152x51 mm

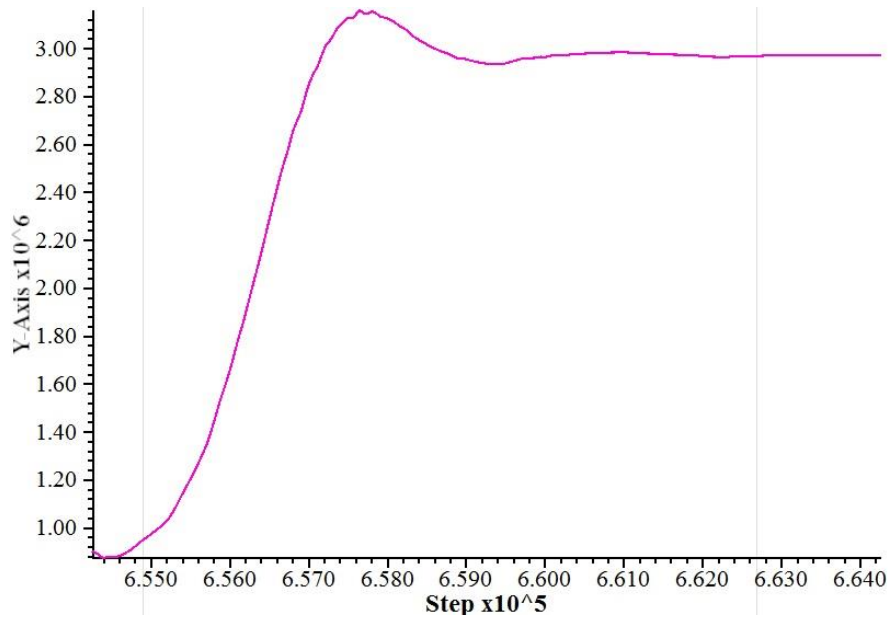


Figura 5-17. Esfuerzo de compresión en punto 4 durante la descarga del material. Perfil de corrugación 381x140 mm

A partir de los gráficos se puede observar que los puntos 2, 3 y 4 (cercanos a las bocas de alimentación) presentan la misma tendencia para cada perfil de corrugación. En un comienzo el esfuerzo axial aumenta considerablemente, luego experimentan una ligera disminución, y finalmente disminuye para el punto 2 y aumenta para los puntos 3 y 4 en el caso de la corrugación 152x51 mm, mientras que para la corrugación 381x140 mm se mantienen constante.

Para cada perfil de corrugación llama la atención que se alcanza una especie de equilibrio en el mismo momento del análisis (*steps*), lo cual ocurre alrededor del *step* $5,12 \times 10^5$ y del *step* $6,59 \times 10^5$ para la corrugación 152x51 mm y 381x140 mm, respectivamente. Además, al revisar el desplazamiento vertical de la pila de acopio se observa que para el *step* $5,2 \times 10^5$ (en el caso de la corrugación 152x51 mm) y para el *step* $6,64 \times 10^5$ (en el caso de la corrugación 381x140 mm) es mayor a 20 metros, lo cual es muy elevado, a diferencia de los 2 metros de desplazamiento para el *step* $5,12 \times 10^5$ y $6,59 \times 10^5$ que es más representativo para la descarga del material al interior del túnel de recuperación.

Considerando los antecedentes expuestos anteriormente, se utilizan los resultados entregados por el programa alrededor del *step* $5,12 \times 10^5$ para la corrugación 152x51 mm y los resultados del *step* $6,59 \times 10^5$ para la corrugación 381x140 mm, con el fin de obtener la variación de los esfuerzos internos que se generan en el tubo de acero corrugado debido a la presencia de las bocas de alimentación. A partir de estos resultados se evalúa si es necesario reforzar los bordes de las bocas.

5.3.3 Cargas solicitantes

En esta sección se especifican los valores de las solicitaciones consideradas que se dispusieron en el modelo. Los valores de las cargas de los equipos internos corresponden a valores aproximados utilizados por Nicolás Alvarado (2017) et al. en su memoria para optar al título de ingeniero civil de la Universidad de Chile “Análisis comparativo de túnel de recuperación minero en forma rectangular y de arco”.

Aquellas cargas generadas por el suelo, la pila de acopiamiento y el peso propio de la estructura ya están consideradas por el programa en la modelación por lo que no se agregan explícitamente.

5.3.3.1 Cargas muertas

- **Peso propio de la estructura:** Está considerada por el programa a partir de la densidad del acero indicada en la tabla 5-3.
- **Peso propio de la plataforma:** Se definió como una carga distribuida a lo largo de las paredes del túnel a una altura de 3 metros desde la base del túnel.

Peso propio de la plataforma:
$$PP_{plat} = 2.989 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Ancho del túnel a 3 metros:
$$B_t = 6,1 [m]$$

Largo del túnel:
$$L_t = 90 [m]$$

Esta carga se encuentra aplicada en los nodos de las paredes del tubo de acero corrugado, se considera una fila de nodos por cada pared por lo que se tiene un total de 91 nodos por lado.

Peso de la plataforma por nodo:
$$D_{plat} = \frac{PP_{plat} \cdot B_t \cdot L_t}{2 \cdot 91} = 9.016,3 \left[\frac{N}{m} \right]$$

- **Peso propio de chutes:** Esta carga se aplica en los nodos que conforman las bocas de alimentación, por lo que se distribuye uniformemente entre los 34 nodos para cada una de las bocas.

Peso propio chutes y planchas de desgaste:
$$PP_{chute} = 1.195.681 [N]$$

Peso de chute por nodo:
$$D_{chute} = \frac{PP_{chute}}{34} = 35.167 [N]$$

- **Peso propio de la pila:** Esta solicitud está considerada por el programa ya que la pila de acopio se incluye en el modelo como suelo.
- **Peso propio relleno:** Al igual que la carga anterior, está considerada por el programa.

5.3.3.2 Cargas vivas

- **Sobrecarga de la plataforma:** Esta sobrecarga está definida de la misma forma que el peso propio de la plataforma, distribuida en 91 nodos para cada pared del túnel de recuperación.

Sobrecarga plataforma:	$SC_{plat} = 7.971 \left[\frac{N}{m^2} \right]$
Ancho de la plataforma:	$B_{plat} = 6,1 [m]$
Largo túnel:	$L_t = 90 [m]$
Sobrecarga por nodo:	$SC_{plat} = \frac{SC_{plat} \cdot B_{plat} \cdot L_t}{2 \cdot 91} = 24.045 \left[\frac{N}{m} \right]$

- **Sobrecarga de la pila:** Al igual que el peso propio de la pila, está considerada por el programa al iniciarse la descarga del material.
- **Sobrecarga equipo de compactación:** El suelo circundante al túnel se compacta utilizando un equipo estándar considerando el espesor de 20 cm. de cada capa. El equipo corresponde a un vibrocompactador o placa-compactadora de 98 kg. de peso y una fuerza de impacto de 10 kN (para mayor detalle, ver Anexo B).

Mediante la ecuación de Boussinesq se determina la carga vertical distribuida a aplicar sobre las capas de suelo. Esta carga se aplica a una distancia de 0,5 metros del tubo de acero corrugado con una extensión de 5 metros, a lo largo de los 90 metros de túnel considerados en el modelo.

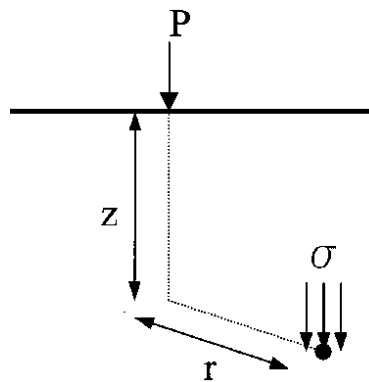


Figura 5-18. Distribución de presiones según Boussinesq. Fuente: Schmitz et al. (2001)

Ecuación de Boussinesq para una carga puntual:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Donde:

σ_z : Incremento de esfuerzo vertical en el suelo [N/m²].

P : Carga puntual [N].

x, y, z : Coordenadas del punto en el cual se va a determinar el incremento del esfuerzo vertical [m].

Para $x = 0, y = 0$ la ecuación queda:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{1}{z^2}$$

Así, se obtiene el incremento de esfuerzo vertical a 0,2 metros de profundidad:

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot 10.000}{2\pi} \cdot \frac{1}{0,2^2} = 119.366 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

5.3.3.3 Cargas laterales

- **Empuje del suelo:** Esta carga también está considerada por el programa.

5.3.3.4 Carga sísmica

En el capítulo 6 de Diseño Estructural del manual canadiense para tuberías de acero corrugado, se detalla cómo considerar un evento sísmico en las solicitaciones. Se opta por agregar esta solicitación por separado ya que corresponde a una carga eventual por lo que se toman consideraciones especiales.

Se define la carga debido a un evento sísmico como:

$$T_S = T_D \cdot A_V \quad (6.3)$$

Donde:

T_S : Carga sobre la estructura debido a un sismo [kN/m].

T_D : Carga sobre la estructura debido a cargas muertas sin amplificar [kN/m].

A_V : Relación de aceleración vertical debido a un sismo = 2/3 de la relación de aceleración horizontal, A_H [-].

Así, esta carga se adiciona a las cargas muertas amplificadas para obtener la sollicitación total sobre la estructura. El valor se presenta en el capítulo de los resultados.

5.3.4 Metodología de mediciones

5.3.4.1 Túnel sin bocas de alimentación

Según lo estipulado en el capítulo 6 de Diseño Estructural del manual canadiense, para el diseño del esfuerzo axial, las secciones de estudio del túnel sin las bocas de alimentación quedan definidas por los 3 radios del túnel; el de la zona superior, del costado o riñón y la zona inferior o fondo tal como se detalla en la sección 5.2.2, al inicio del presente capítulo. Las mediciones se realizan en la dirección transversal y en la sección del túnel bajo el punto más alto de la pila de acopio para obtener los valores máximos de los esfuerzos y proceder a diseñar estructuralmente el tubo de acero corrugado.

Además, se estudia la combinación de los esfuerzos axial y de momento para los puntos críticos del túnel, es decir, se obtienen ambos esfuerzos en el punto donde se tenga el máximo esfuerzo de compresión y en el punto donde se tenga el máximo esfuerzo de momento. Este análisis se realiza durante la construcción del túnel (etapas de colocación y compactación de las capas de suelo circundantes al túnel) y para el modelo completo con la pila de acopio.

Por último, se analizan las deformaciones durante la etapa constructiva del túnel, las cuales no deben superar el 2%, tal como se menciona en la sección 5.3.2. Se obtienen las deformaciones cada 5 capas colocadas y compactadas de relleno estructural hasta cubrir el túnel, luego al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural, y se verifica para cada instante que se cumpla la deformación admisible para tubos de acero corrugado.

5.3.4.2 Túnel con bocas de alimentación

Con la presencia de las bocas de alimentación, se tiene una discontinuidad en el tubo de acero corrugado, por lo que se espera que los esfuerzos aumenten en los bordes y en las zonas cercanas. En las figuras 5-19 y 5-20 se presentan las zonas en las cuales se podría generar un aumento de esfuerzos, para estas zonas se realiza una comparación entre los resultados obtenidos para el modelo sin las bocas de alimentación y el modelo con las bocas. A partir de esta comparación se evalúa la necesidad de colocar refuerzos en los bordes de las bocas.

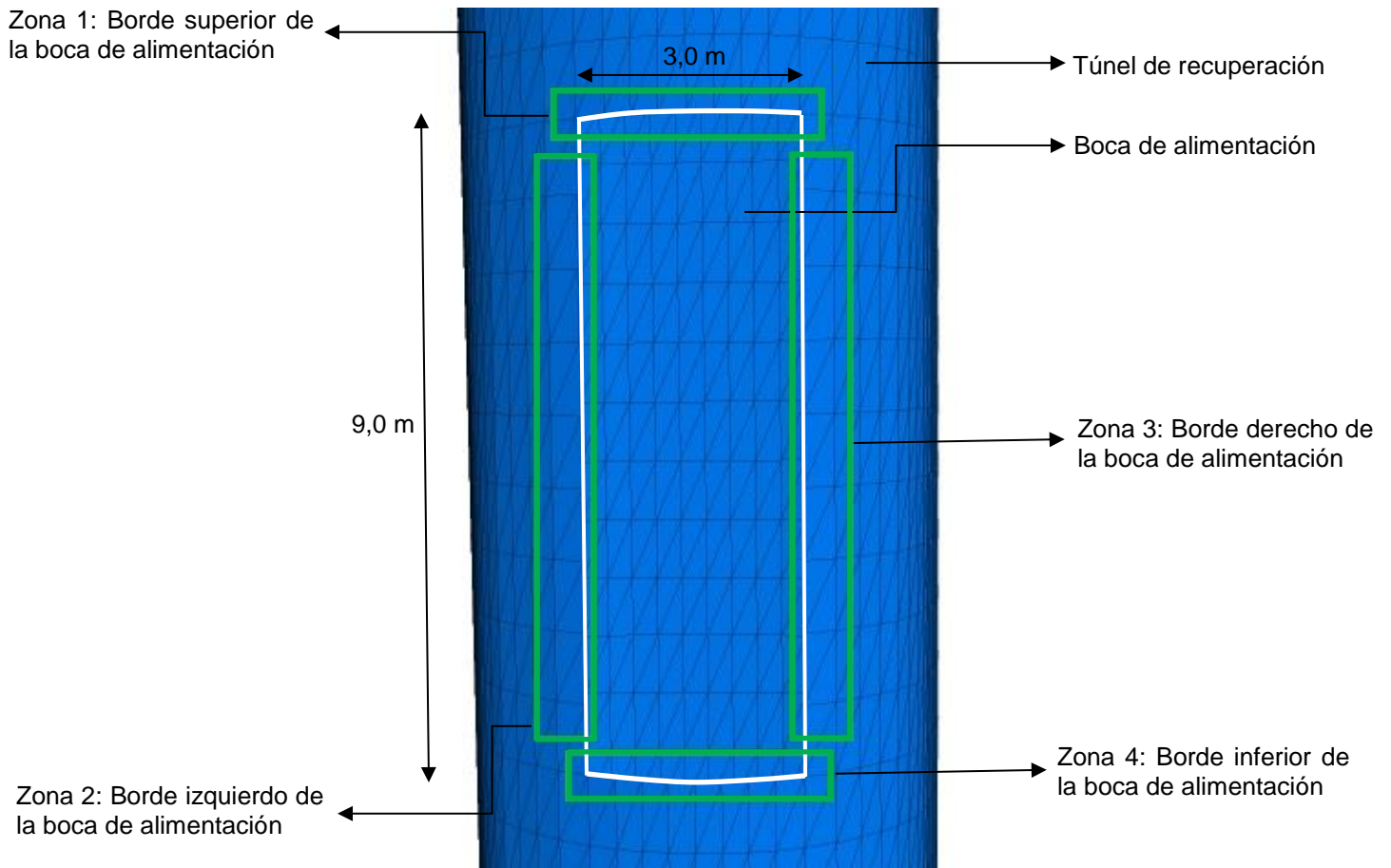


Figura 5-19. Zonas en los bordes de las bocas de alimentación donde se podría generar un aumento de esfuerzos

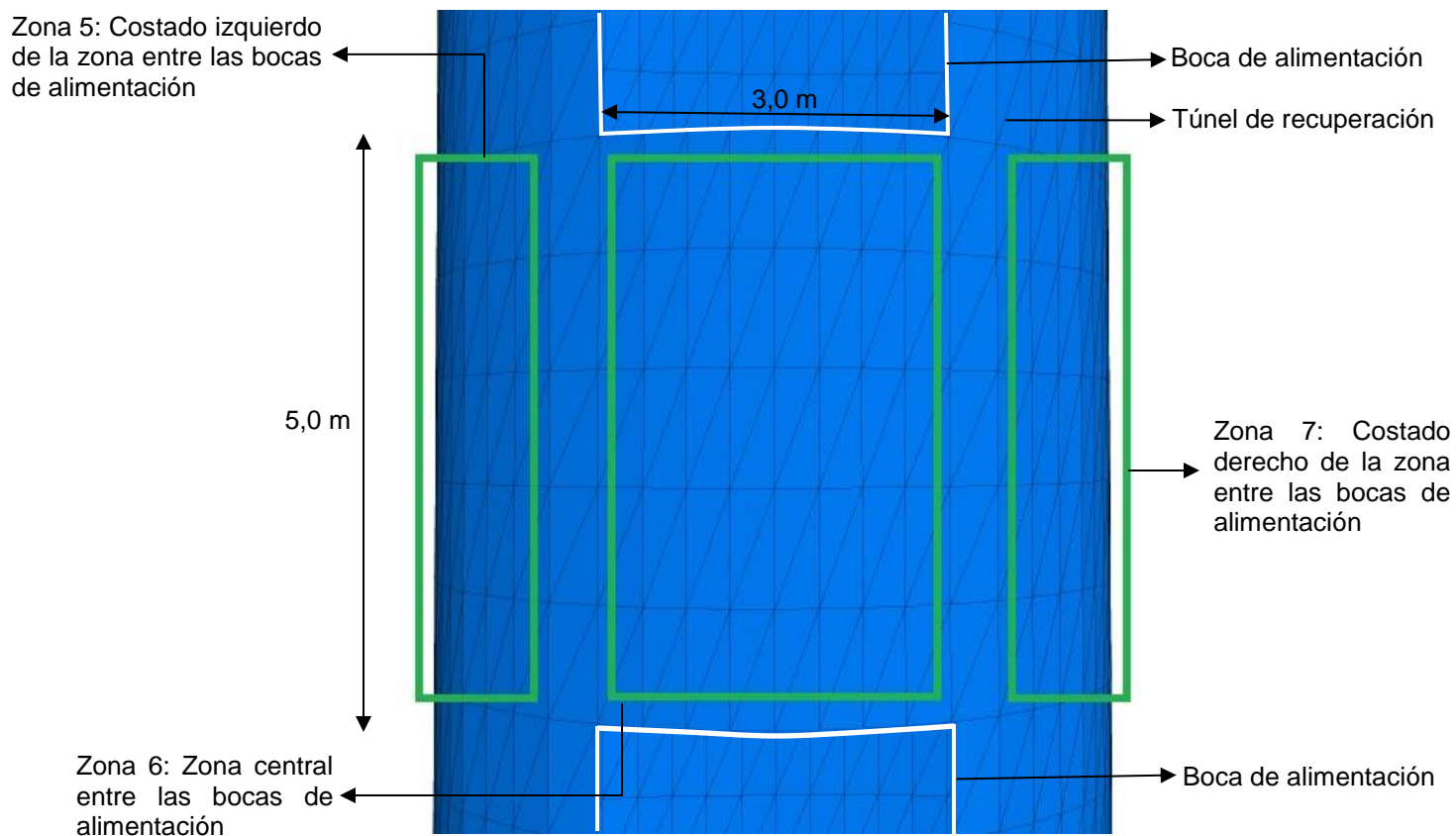


Figura 5-20. Zonas cercanas a las bocas de alimentación donde se podría generar un aumento de los esfuerzos

6. Resultados

Los esfuerzos obtenidos del análisis del programa siguen la metodología detallada en la sección 5.3.4. En esta sección se presentan los valores más relevantes con los cuales se diseñará estructuralmente en el siguiente capítulo.

6.1 Esfuerzos del túnel sin bocas de alimentación

Para cada radio de la sección transversal del túnel se obtienen los mayores esfuerzos (axial, de momento y de corte), correspondientes a las cargas que generan el suelo y la pila de acopio. Estos esfuerzos se presentan en la tabla 6-1 para el perfil de corrugación 152x51 mm y en la tabla 6-2 para el perfil 381x140 mm. Cabe mencionar que un esfuerzo axial negativo representa una compresión del elemento estructural. Adicionalmente, se presentan los diagramas de los esfuerzos en la dirección longitudinal en “Anexo C”.

Tabla 6-1. Máximos esfuerzos para cada zona. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Radio [m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Zona superior	4,2	-1.235	-25,555	98,155
Costado o riñón	1	-1.235	43,287	74,755
Zona inferior	8,9	-460	26,341	85,185

Tabla 6-2. Máximos esfuerzos para cada zona. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Radio [m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Zona superior	4,2	-1.138,3	-68,064	259,760
Costado o riñón	1	-1.138,3	147,690	187,624
Zona inferior	8,9	-402	95,427	246,668

En las tabla 6-1 y 6-2 se tiene el mismo esfuerzo de compresión tanto para la zona superior como para el costado, esto se debe a que dicho esfuerzo se encuentra justo en la zona de transición de un radio a otro, por lo que de manera conservadora se opta por esta consideración al momento de diseñar. Los resultados de los valores máximos para el esfuerzo axial y de momento de las tablas 6-1 y 6-2 se pueden observar en los diagramas para cada perfil de corrugación, los cuales se presentan desde la figura 6-1 a la figura 6-4. Los diagramas con los valores máximos para el esfuerzo de corte de ambos perfiles de corrugación se encuentran en “Anexo C”.

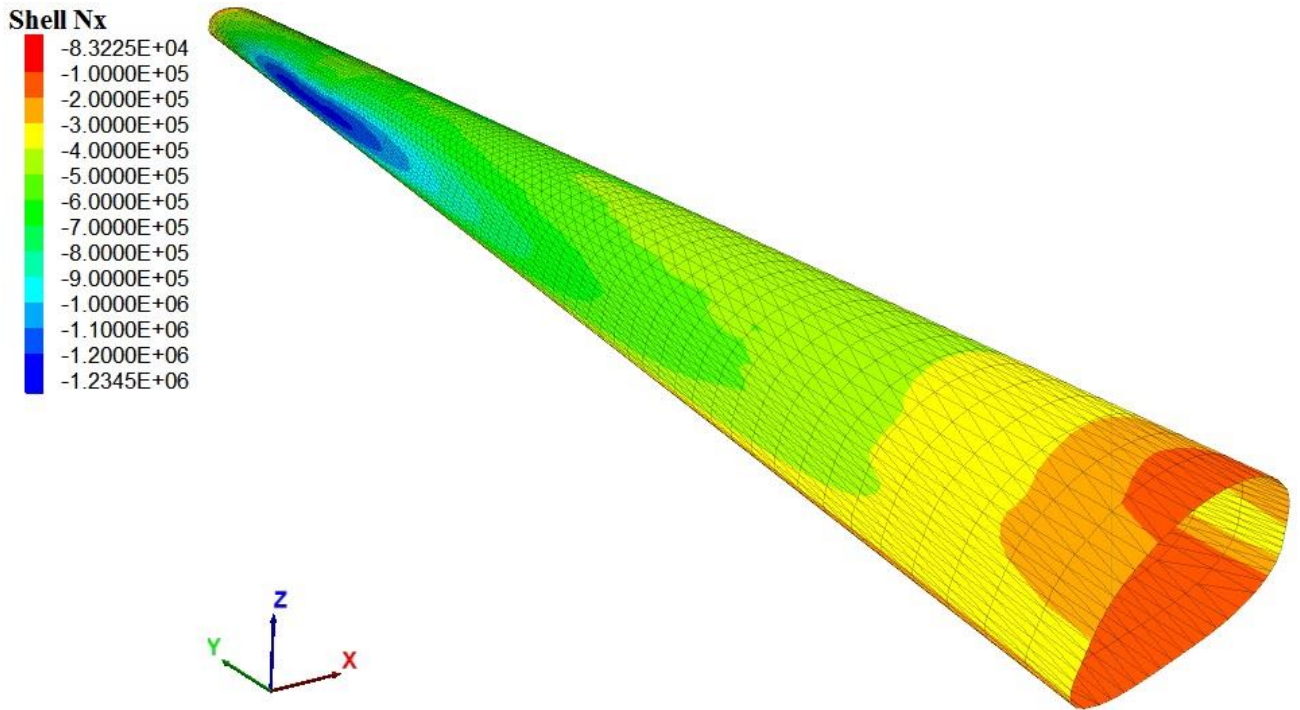


Figura 6-1. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Perfil de corrugación 152x51 mm

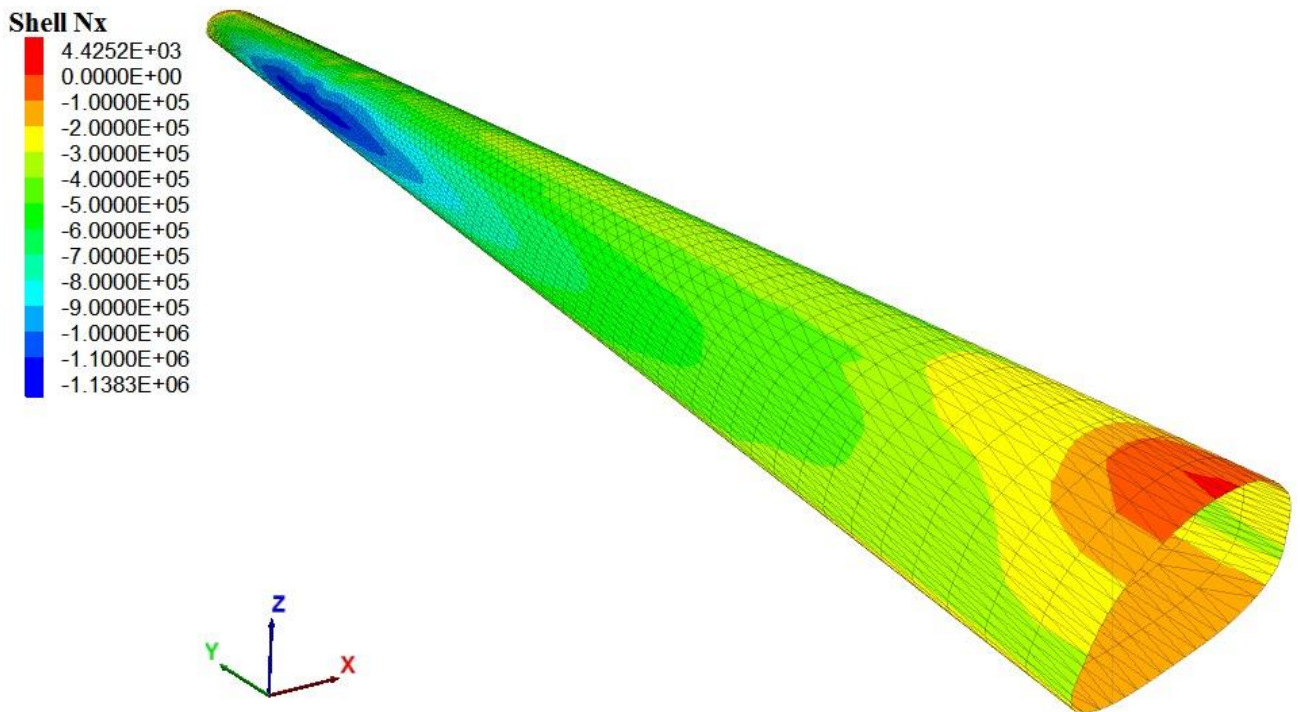


Figura 6-2. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Perfil de corrugación 381x140 mm

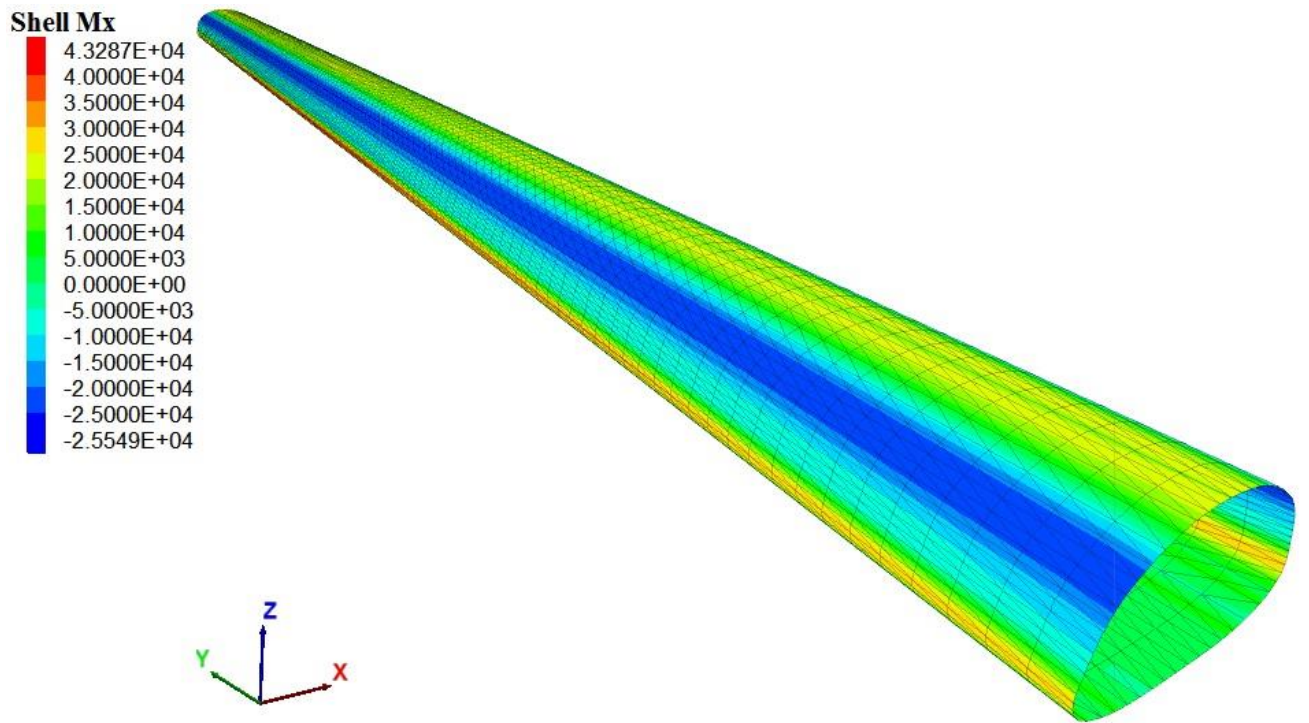


Figura 6-3. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Perfil de corrugación 152x51 mm

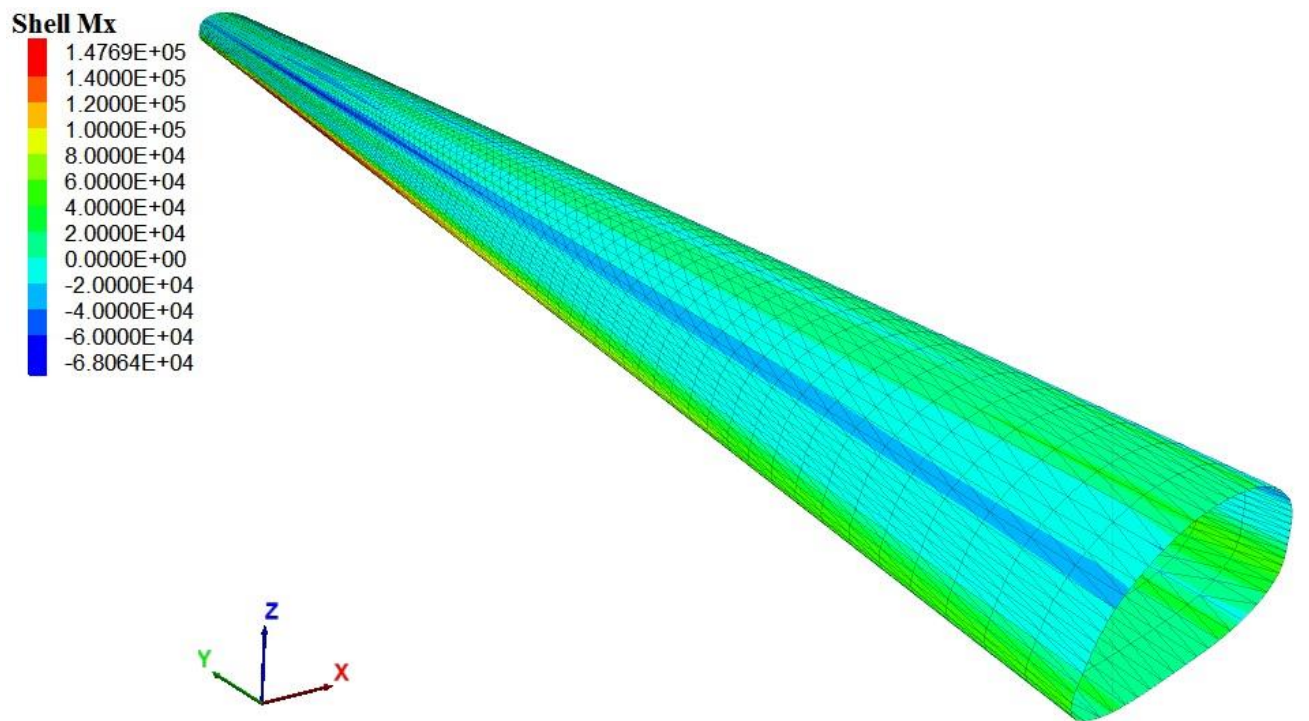


Figura 6-4. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Perfil de corrugación 381x140 mm

De los diagramas presentados, se puede observar que para cada uno el máximo valor del esfuerzo se alcanza en la sección del túnel que se encuentra bajo el punto más alto de la pila de acopio (zona azul en las figuras 6-1 y 6-2). Al comparar los resultados entre los perfiles de corrugación no se observan diferencias significativas en cuanto a su forma, pero si en la magnitud, el perfil de corrugación 152x51 mm presenta un esfuerzo axial aproximadamente un 8% mayor al perfil 381x140 mm, mientras que para el esfuerzo de momento, el perfil de corrugación 381x140 mm presenta un aumento aproximado del 166% en relación al perfil 152x51 mm.

La colocación y compactación de las capas de relleno estructural alrededor del túnel genera esfuerzos internos que también deben ser estudiados. En la tabla 6-3 y 6-4 se presentan los esfuerzos máximos en la dirección transversal para cada perfil de corrugación en 3 instantes diferentes durante la construcción del túnel; para 10 capas de relleno estructural equivalentes a 2 metros, para 20 capas de relleno estructural equivalentes a 4 metros (túnel se encuentra completamente cubierto) y al alcanzar la altura mínima de recubrimiento (1,4 metros sobre la corona o punto más alto del túnel de recuperación). La magnitud de los esfuerzos en la dirección longitudinal durante la construcción no supera el 0,5% de la magnitud de los esfuerzos en la dirección transversal para ninguna de las etapas estudiadas, por lo que estos esfuerzos y sus respectivos diagramas no se incluyen en el presente informe.

Tabla 6-3. Esfuerzos generados durante la construcción del túnel. Perfil de corrugación 152x51 mm

Etapa	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
10 capas de relleno	-71,502	5,766	14,723
20 capas de relleno	-464,85	30,621	53,053
Altura mínima	-690,95	29,393	64,799

Tabla 6-4. Esfuerzos generados durante la construcción del túnel. Perfil de corrugación 381x140 mm

Etapa	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
10 capas de relleno	-75,497	5,702	14,586
20 capas de relleno	-402,590	40,538	82,132
Altura mínima	-571,290	49,301	99,926

En las figuras 6-5 a 6-10 se presentan los diagramas de los esfuerzos axial y de momento en la dirección transversal durante la construcción del túnel de recuperación para el perfil de corrugación 152x51 mm. A partir de las tablas 6-3 y 6-4 se puede notar que la magnitud de los esfuerzos para ambos perfiles de corrugación es muy similar durante la construcción del túnel, por lo que los diagramas para el perfil 381x140 mm se encuentran en “Anexo C”, al igual que los diagramas para el esfuerzo de corte de ambos perfiles.

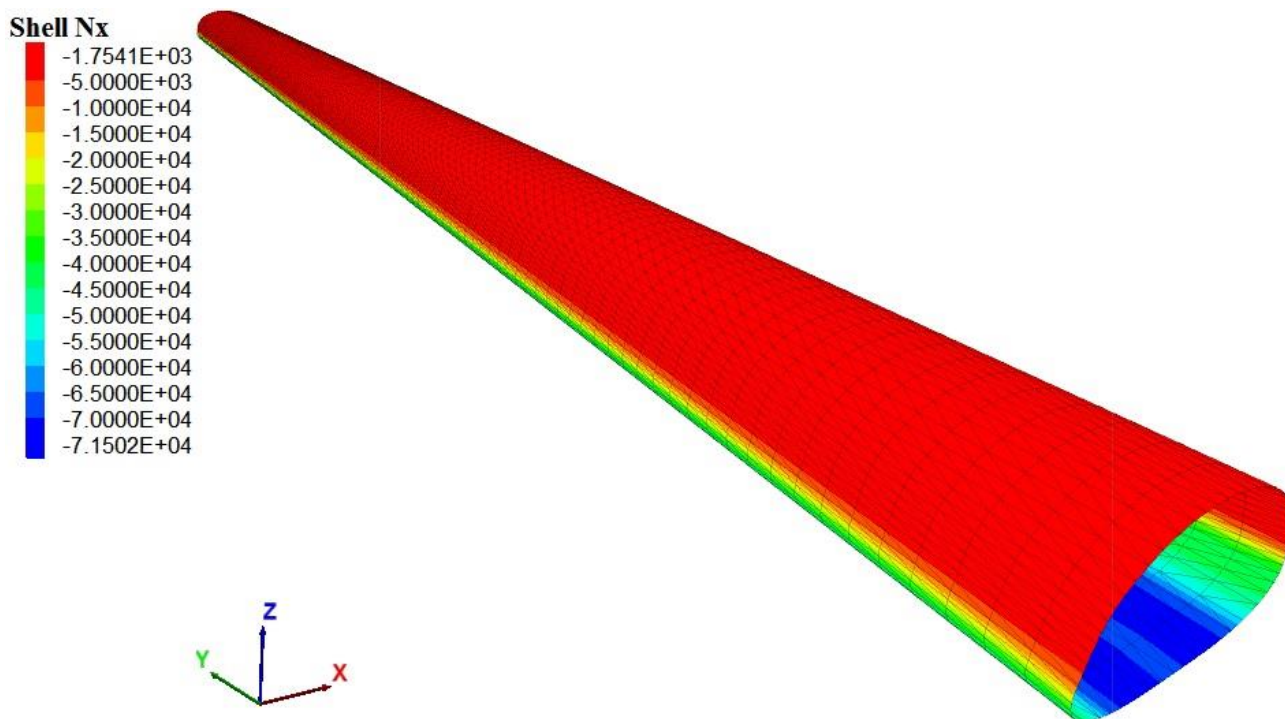


Figura 6-5. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

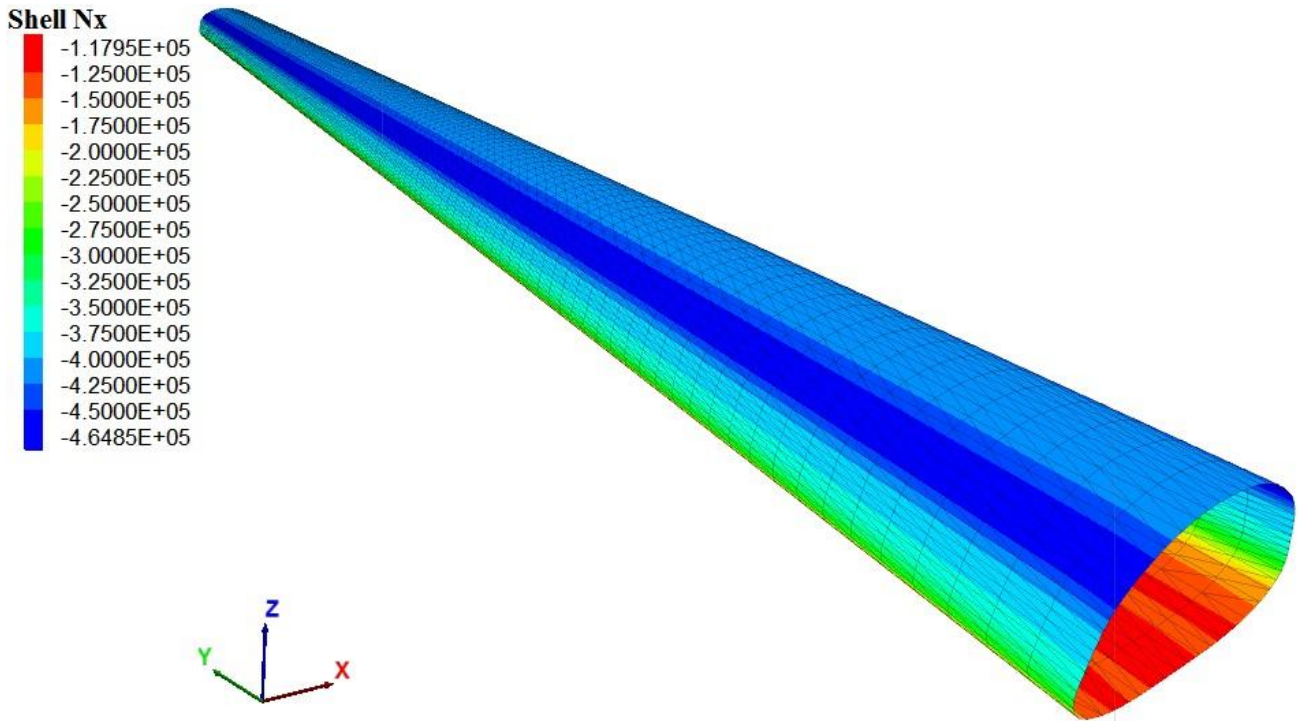


Figura 6-6. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

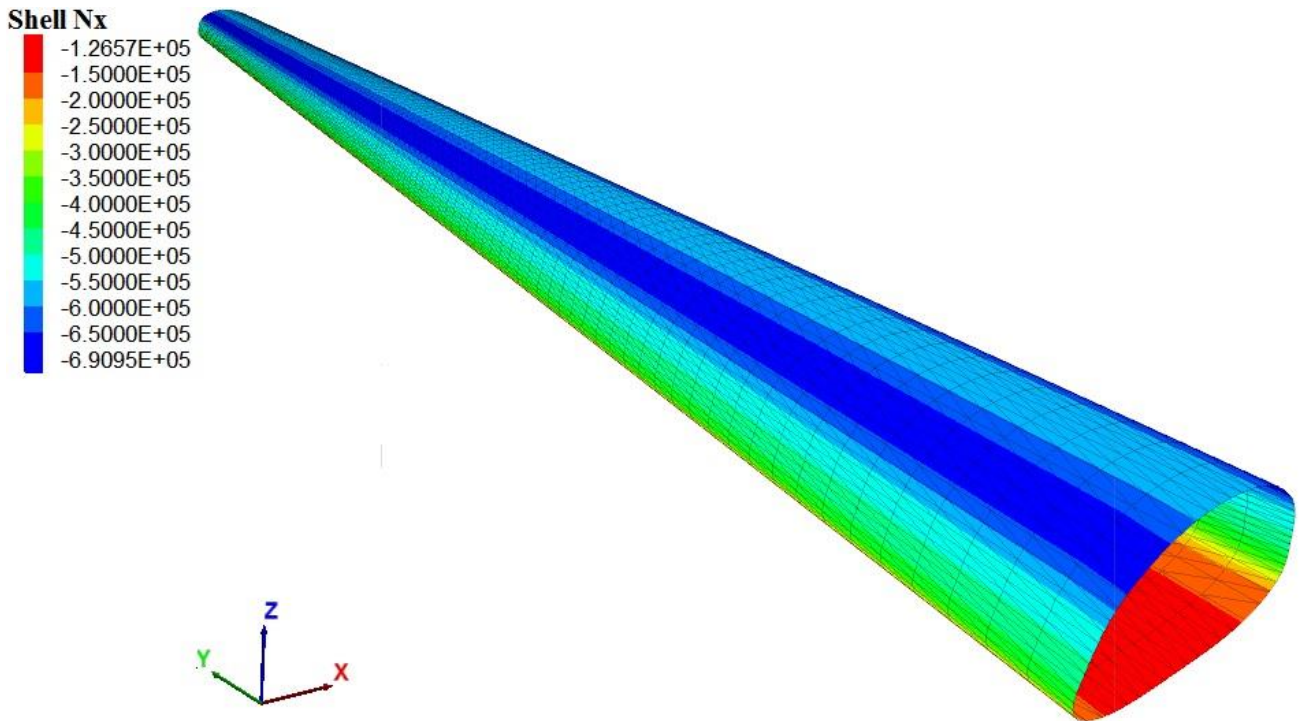


Figura 6-7. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

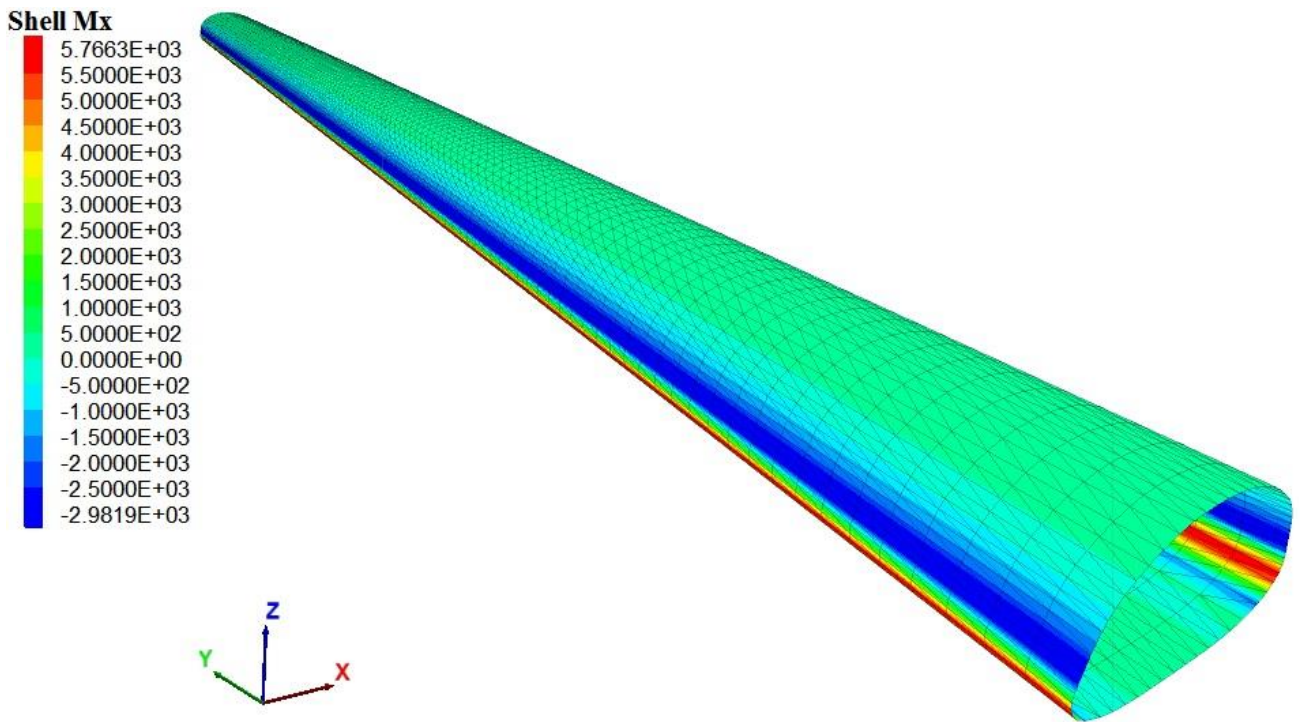


Figura 6-8. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

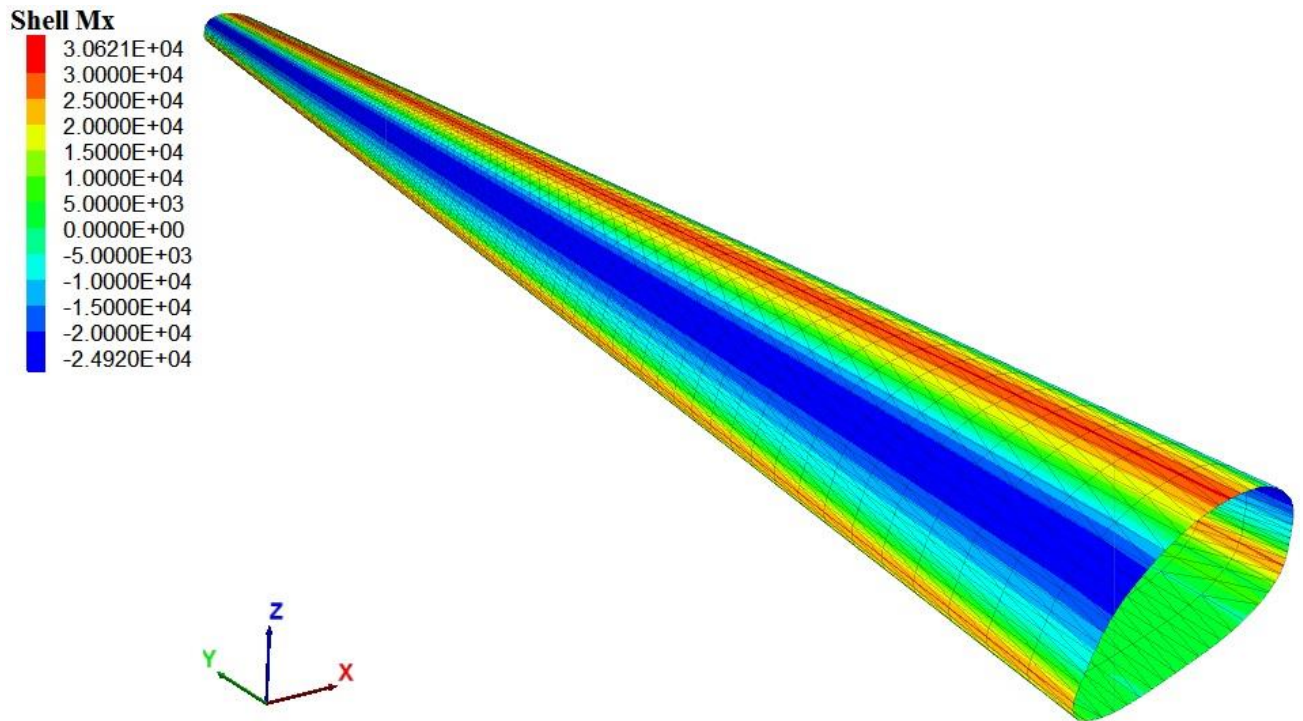


Figura 6-9. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

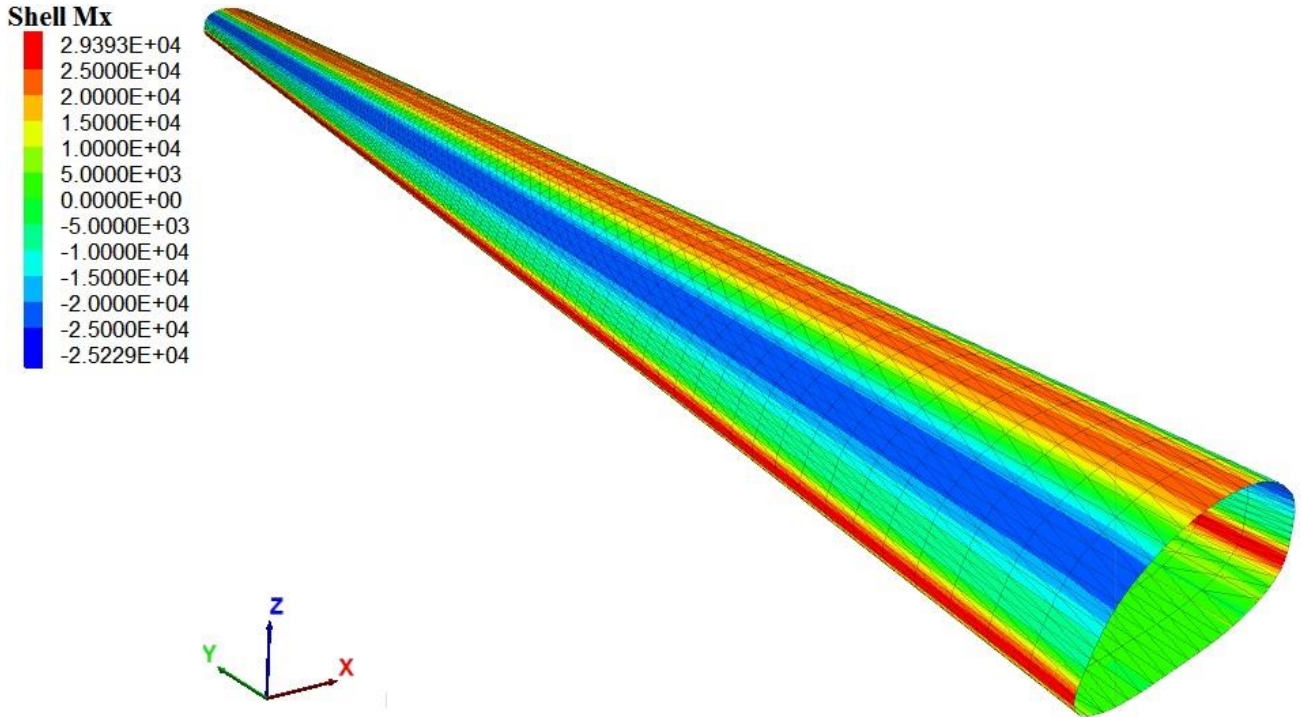


Figura 6-10. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

A partir de las figuras 6-5 a 6-10, se puede notar claramente el efecto que tiene el proceso constructivo sobre la estructura de acero corrugado, a medida que se agregan y compactan las capas de relleno estructural los esfuerzos internos aumentan y los valores máximos se desplazan hacia otras zonas del túnel. Esto ocurre desde que se comienza a colocar y compactar el relleno estructural hasta que el túnel se encuentra completamente cubierto (20 capas de relleno estructural), luego sólo aumentan los esfuerzos internos hasta alcanzar la altura mínima de recubrimiento, no varía la ubicación de los valores máximos.

En las tablas 6-5 y 6-6 se presentan los esfuerzos en los puntos o zonas críticas, a partir de los resultados expuestos anteriormente, para estudiar la combinación de los esfuerzos de compresión y de momento al agregar la pila de acopio. Se incluye la zona donde se tiene el máximo esfuerzo compresión con el momento asociado, el máximo esfuerzo de momento negativo y positivo con la compresión asociada, y por último, una zona en la cual se tiene un elevado esfuerzo, tanto de compresión como de momento.

Tabla 6-5. Esfuerzos en zonas críticas con pila de acopio. Perfil de corrugación 152x51mm

Zona	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Máxima compresión	-1235	-12,85	98,155
Máximo momento negativo	-716,199	-25,549	16,309
Máximo momento positivo	-570,651	43,3	85,181
Gran compresión y momento	-1106,41	38,178	72,85

Tabla 6-6. Esfuerzos en zonas críticas con pila de acopio. Perfil de corrugación 381x140mm

Zona	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Máxima compresión	-1.138,3	-11,081	172,395
Máximo momento negativo	-990,735	-68,064	134,836
Máximo momento positivo	-920,116	147,69	92,302
Gran compresión y momento	-783,590	138,993	52,012

6.2 Cargas sísmicas

Las cargas sísmicas se determinan de acuerdo a lo detallado en la sección de cargas solicitantes del capítulo anterior. La componente vertical de la relación de aceleración del sismo se determina a partir de la aceleración máxima del suelo:

$$a_0 = 0.4$$

La componente vertical de la relación de aceleración del sismo tiene el siguiente valor:

$$A_v = \frac{2}{3} \cdot a_0 = 0,267$$

Luego, las cargas sísmicas se obtienen multiplicando este factor por las solicitaciones obtenidas debido a las cargas generadas por el suelo y la pila de acopio presentadas en la sección anterior. A continuación se detallan las cargas sísmicas para ambos perfiles de corrugación.

Tabla 6-7. Cargas sísmicas para cada zona a partir de los esfuerzos máximos. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Radio [m]	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Zona superior	4,2	-329,333	-6,813	26,175
Costado o riñón	1	-329,333	11,543	19,935
Zona inferior	8,9	-122,667	7,024	22,716

Tabla 6-8. Cargas sísmicas para cada zona a partir de los esfuerzos máximos. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Radio [m]	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Zona superior	4,2	-303,547	-18,150	141,269
Costado o riñón	1	-303,547	39,384	50,033
Zona inferior	8,9	-107,2	25,447	65,778

Tabla 6-9. Cargas sísmicas durante la construcción. Perfil de corrugación 152x51 mm

Etapa	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
10 capas de suelo	-19,067	1,538	3,926
20 capas de suelo	-123,960	8,166	14,147
Altura mínima	-184,253	7,838	17,280

Tabla 6-10. Cargas sísmicas durante la construcción. Perfil de corrugación 381x140 mm

Etapa	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
10 capas de suelo	-20,133	1,521	3,890
20 capas de suelo	-107,357	10,810	21,902
Altura mínima	-152,344	13,147	26,647

**Tabla 6-11. Cargas sísmicas a partir de esfuerzos en puntos críticos con pila de acopio.
Perfil de corrugación 152x51 mm**

Punto	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Máxima compresión	-329,333	-3,427	26,175
Máximo momento negativo	-190,986	-6,813	4,349
Máximo momento positivo	-152,174	11,547	22,715
Gran compresión y momento	-295,043	10,181	19,427

**Tabla 6-12. Cargas sísmicas a partir de esfuerzos en puntos críticos con pila de acopio.
Perfil de corrugación 381x140 mm**

Punto	N [Kn/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Máxima compresión	-303,547	-2,955	45,972
Máximo momento negativo	-264,196	-18,150	35,956
Máximo momento positivo	-245,364	39,384	24,614
Gran compresión y momento	-208,957	37,065	13,870

En el capítulo de Diseño Estructural del modelo, se adicionan estas cargas sísmicas a las solicitaciones generadas por el suelo y la pila de acopio para obtener las cargas de diseño.

6.3 Esfuerzos del túnel con bocas de alimentación

Se presenta la comparación de los esfuerzos obtenidos entre el modelo con las bocas de alimentación y el modelo sin las bocas de alimentación. Las zonas analizadas son aquellas destacadas en las figuras 5-19 y 5-20 de la sección de metodología de mediciones. Además, se incluyen los diagramas de los esfuerzos principales entregados por el programa FLAC3D utilizados en la comparación.

En las tablas 6-13 a 6-18 se puede observar que, para el perfil de corrugación 152x51 mm, los esfuerzos en general aumentan considerablemente en los bordes de las bocas de alimentación, principalmente para el esfuerzo axial en ambas direcciones. Esto también se puede observar al comparar los diagramas del esfuerzo axial, de momento y de corte. Los diagramas muestran las zonas cercanas a una de las bocas de alimentación según lo detallado en la metodología de mediciones (ver figura 5-19 y 5-20).

Tabla 6-13. Esfuerzo axial N_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Esfuerzo axial sin bocas [kN/m]	Esfuerzo axial con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
6	-596,407	-1.419,200	2,38
1	-596,437	-3.200,690	5,37
1	-624,085	-3.685,970	5,91
4	-634,480	-3.812,780	6,01
4	-571,364	-2.043,090	3,57

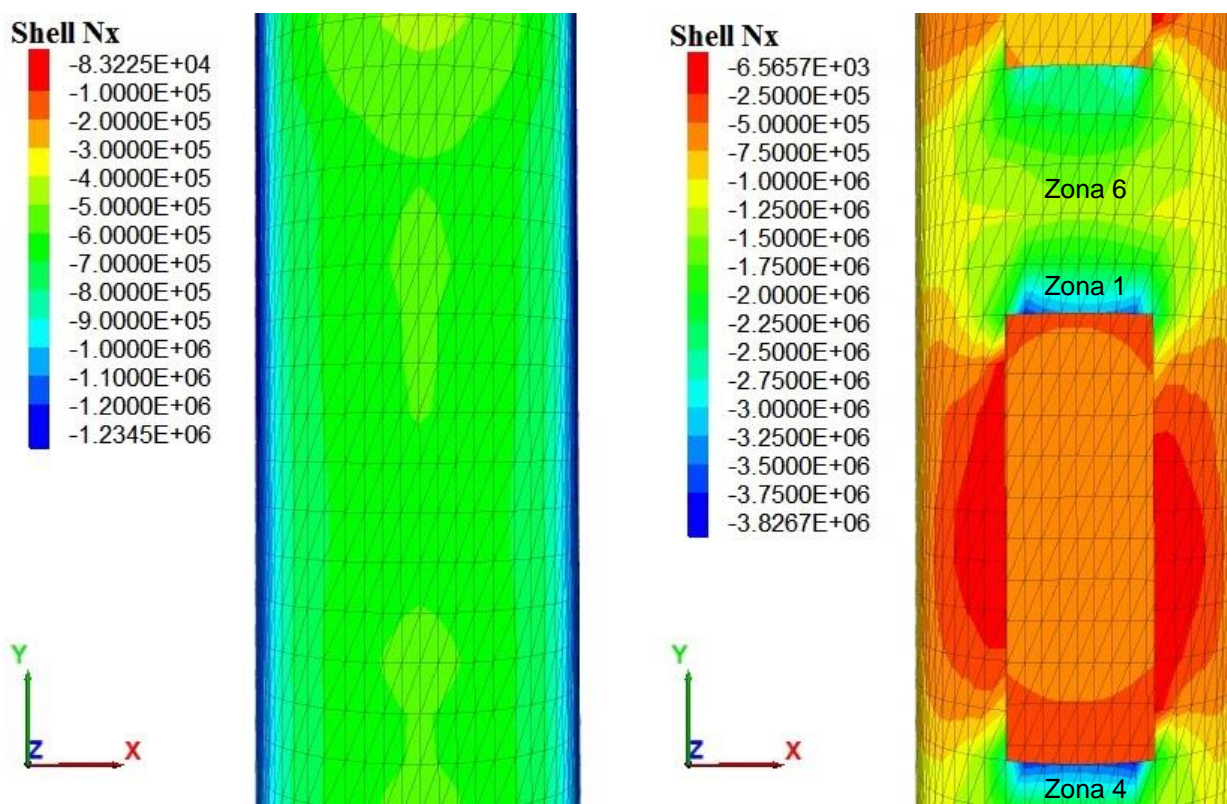


Figura 6-11. Comparación diagramas del esfuerzo axial N_x [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm

Como se puede notar en los diagramas para el esfuerzo axial del modelo con y sin las bocas de alimentación, existe una redistribución de los esfuerzos en las zonas cercanas a las bocas. Esto ocurre tanto para la dirección transversal como para la dirección longitudinal.

Tabla 6-14. Esfuerzo axial Ny para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Esfuerzo axial sin bocas [kN/m]	Esfuerzo axial con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
6	673,899	-572,062	-0,85
1	695,306	-1.143,030	-1,64
2	798,236	2.792,120	3,50

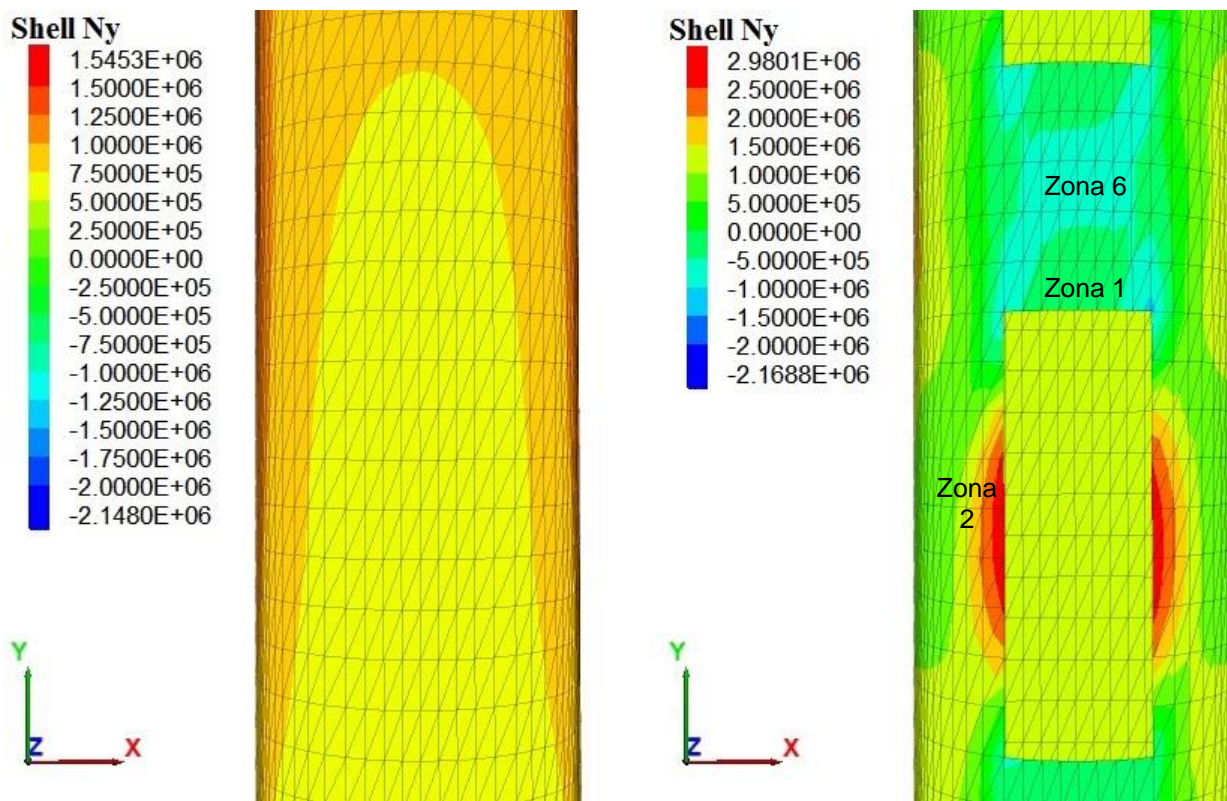


Figura 6-12. Comparación diagramas del esfuerzo axial Ny [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm

Tabla 6-15. Esfuerzo de momento Mx para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Esfuerzo de momento sin bocas [kNm/m]	Esfuerzo de momento con bocas [kNm/m]	Relación con/sin bocas
2	1,157	-1,520	-1,31
3	-9,379	11,738	-1,25
4	19,471	22,676	1,16

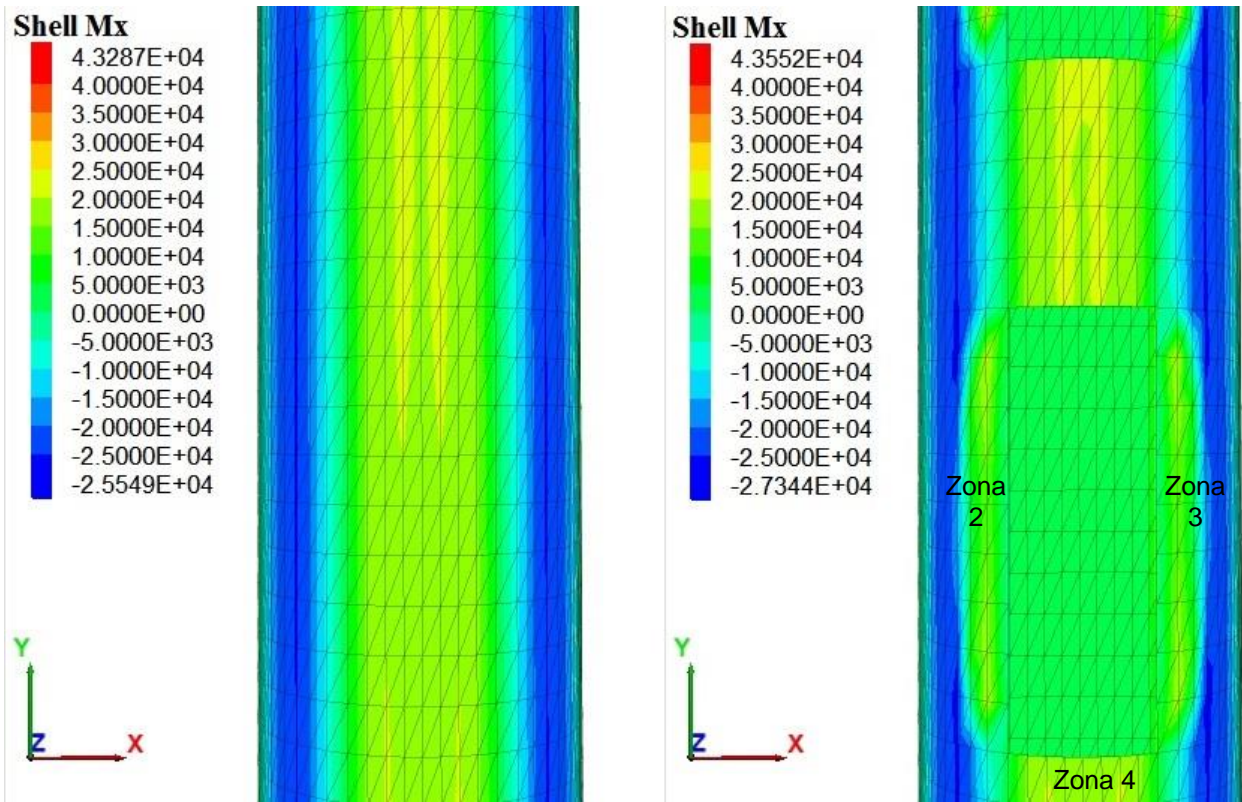


Figura 6-13. Comparación diagramas del esfuerzo de momento Mx [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm

El esfuerzo de momento en la dirección transversal no experimenta grandes cambios con la presencia de las bocas de alimentación en las zonas cercanas a estas, lo cual se puede notar tanto en la tabla 6-15 como en la figura 6-13.

Tabla 6-16. Esfuerzo de momento My para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Esfuerzo de momento sin bocas [kNm/m]	Esfuerzo de momento con bocas [kNm/m]	Relación con/sin bocas
1	-0,001	0,599	-570,48
3	-0,002	-0,433	260,84
4	-0,001	0,545	-397,81
3	0,0002	-0,459	-2.550,00

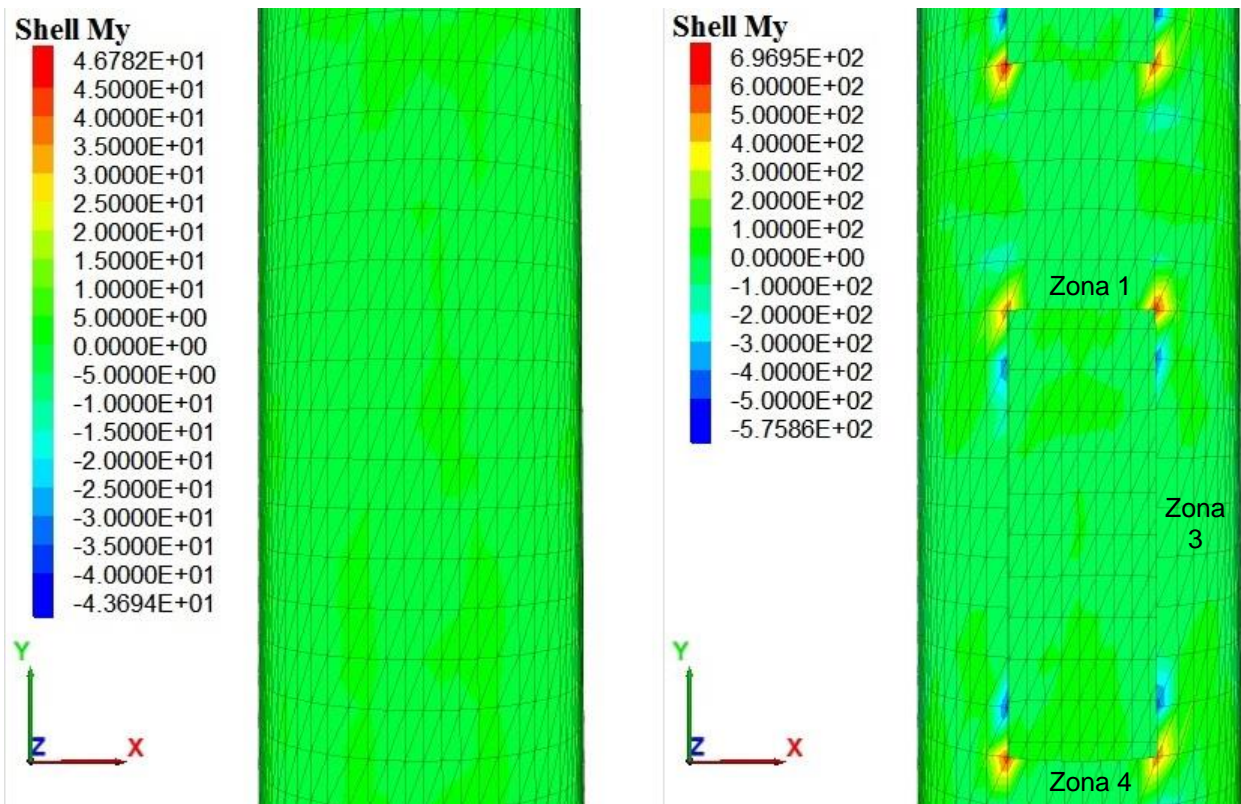


Figura 6-14. Comparación diagramas del esfuerzo de momento My [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm

En cuanto al esfuerzo de momento en la dirección longitudinal, si bien aumenta bastante para el modelo con las bocas de alimentación (ver tabla 6-16), estos valores no superan el 5% del esfuerzo de momento en la dirección transversal.

Tabla 6-17. Esfuerzo de momento Qx para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Esfuerzo de corte sin bocas [kN/m]	Esfuerzo de corte con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
2	16,215	67,347	4,15
2	16,505	88,967	5,39
2	22,301	-28,689	-1,29
2	23,005	-47,147	-2,05

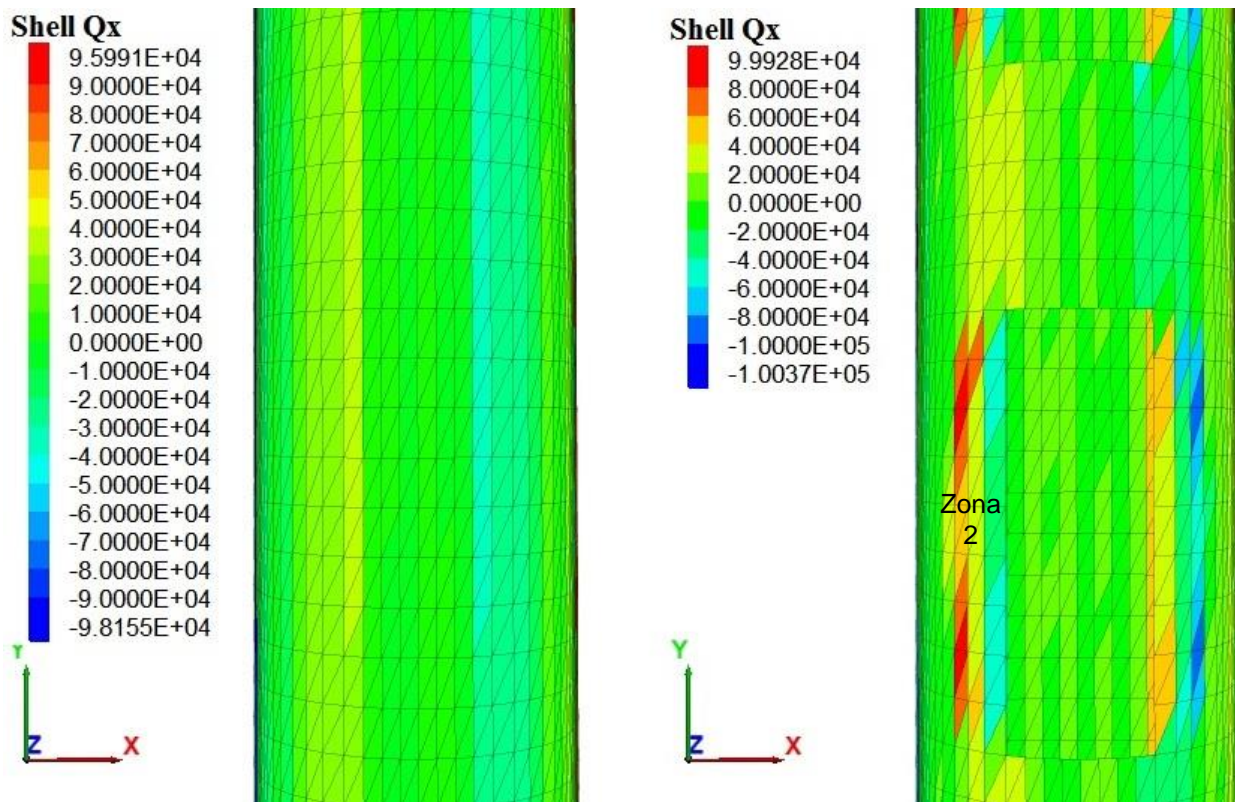


Figura 6-15. Comparación diagramas del esfuerzo de corte Qx [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm

Tabla 6-18. Esfuerzo de momento Q_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm

Zona	Esfuerzo de corte sin bocas [kN/m]	Esfuerzo de corte con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
1	0,005	1,462	299,59
3	0,008	-1,360	-164,65
1	-0,005	-0,867	191,98

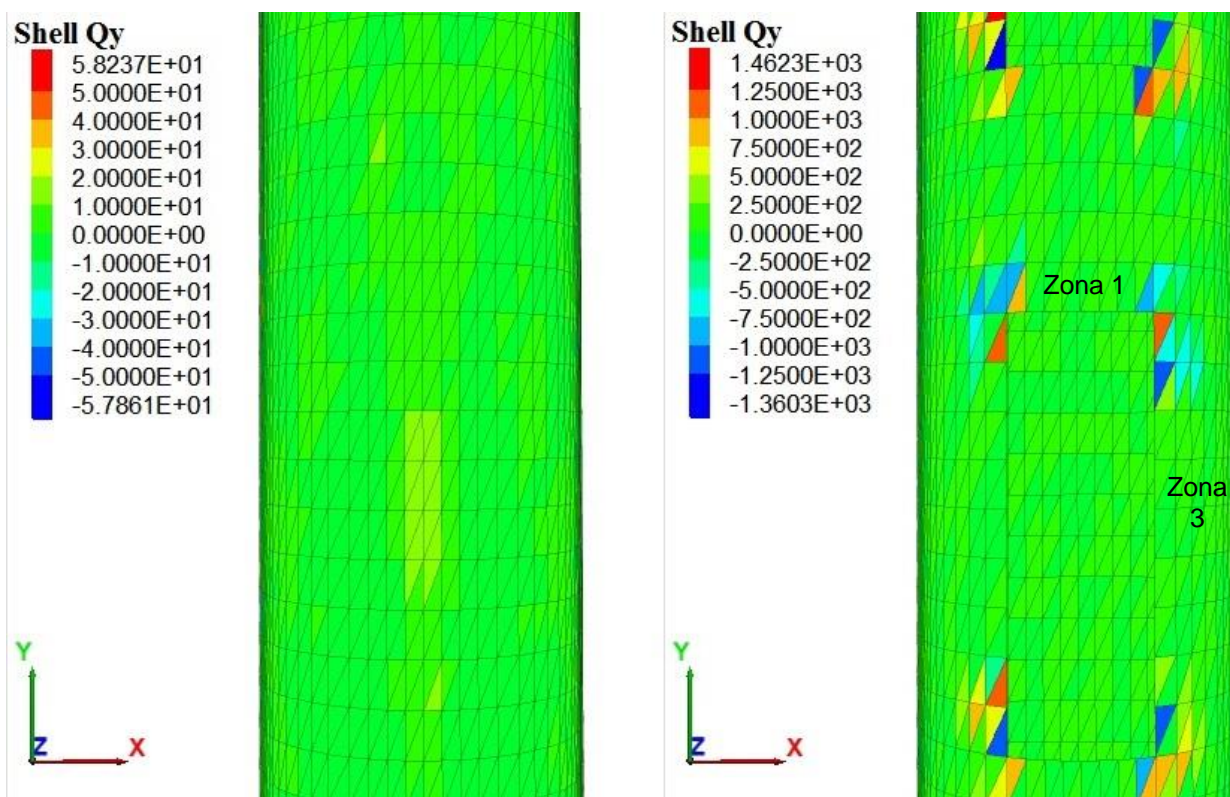


Figura 6-16. Comparación diagramas del esfuerzo de corte Q_y [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 152x51 mm

En cuanto al esfuerzo de corte en la dirección longitudinal, aumenta bastante para el modelo con las bocas de alimentación (ver tablas 6-17 y 6-18), estos valores no superan el 5% del esfuerzo de corte en la dirección transversal.

Al igual que para el perfil de corrugación 152x51 mm, los esfuerzos internos del túnel de recuperación aumentan considerablemente en los bordes de las bocas de alimentación para el perfil 381x140 mm (ver tablas 6-19 a 6-24). Del mismo modo, los esfuerzos de momento y de corte en la dirección longitudinal no superan el 1% de los esfuerzos en la dirección transversal.

Tabla 6-19. Esfuerzo axial N_x para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Esfuerzo axial sin bocas [kN/m]	Esfuerzo axial con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
6	-502,356	-1.177,010	2,34
1	-488,658	-2.987,080	6,11
1	-562,826	-3.383,660	6,01
4	-529,564	-2.974,150	5,62
4	-422,879	-1.614,640	3,82

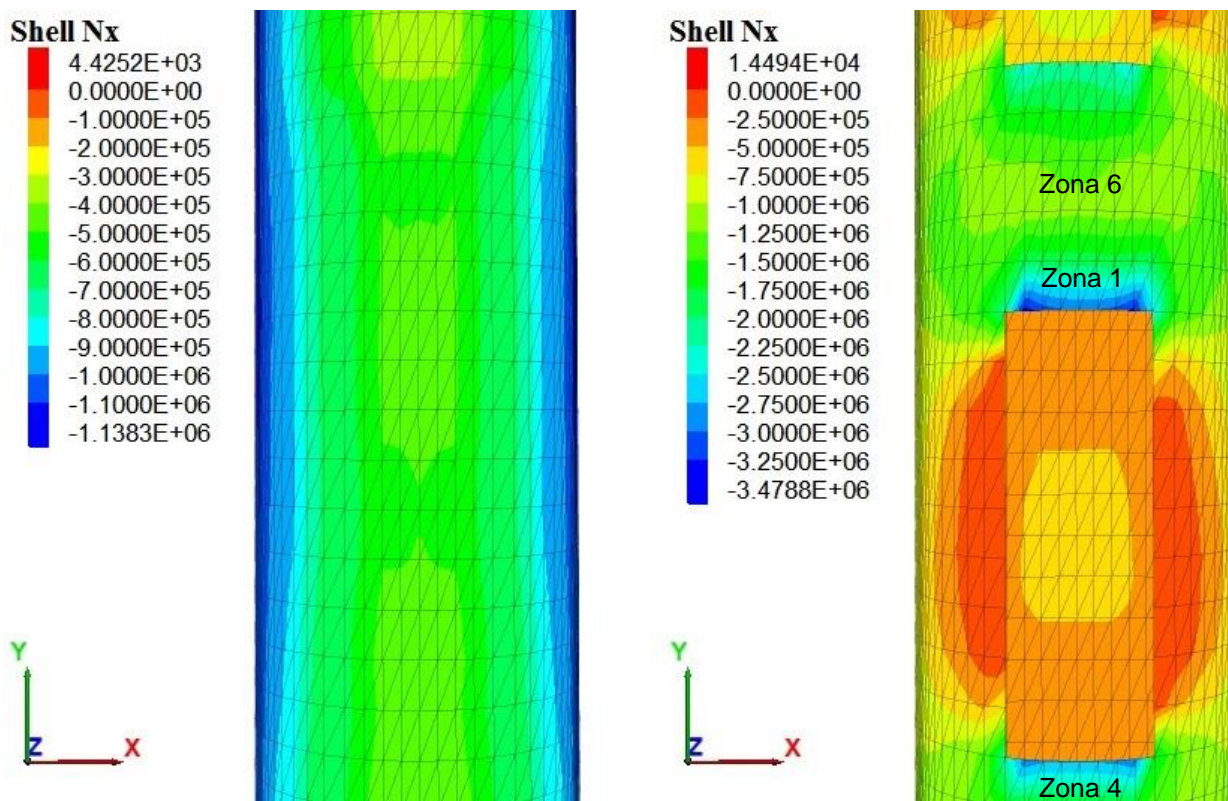


Figura 6-17. Comparación diagramas del esfuerzo axial N_x [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm

Tabla 6-20. Esfuerzo axial Ny para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Esfuerzo axial sin bocas [kN/m]	Esfuerzo axial con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
6	763,316	-362,341	-0,47
1	743,001	-722,027	-0,97
2	900,040	2.831,600	3,50

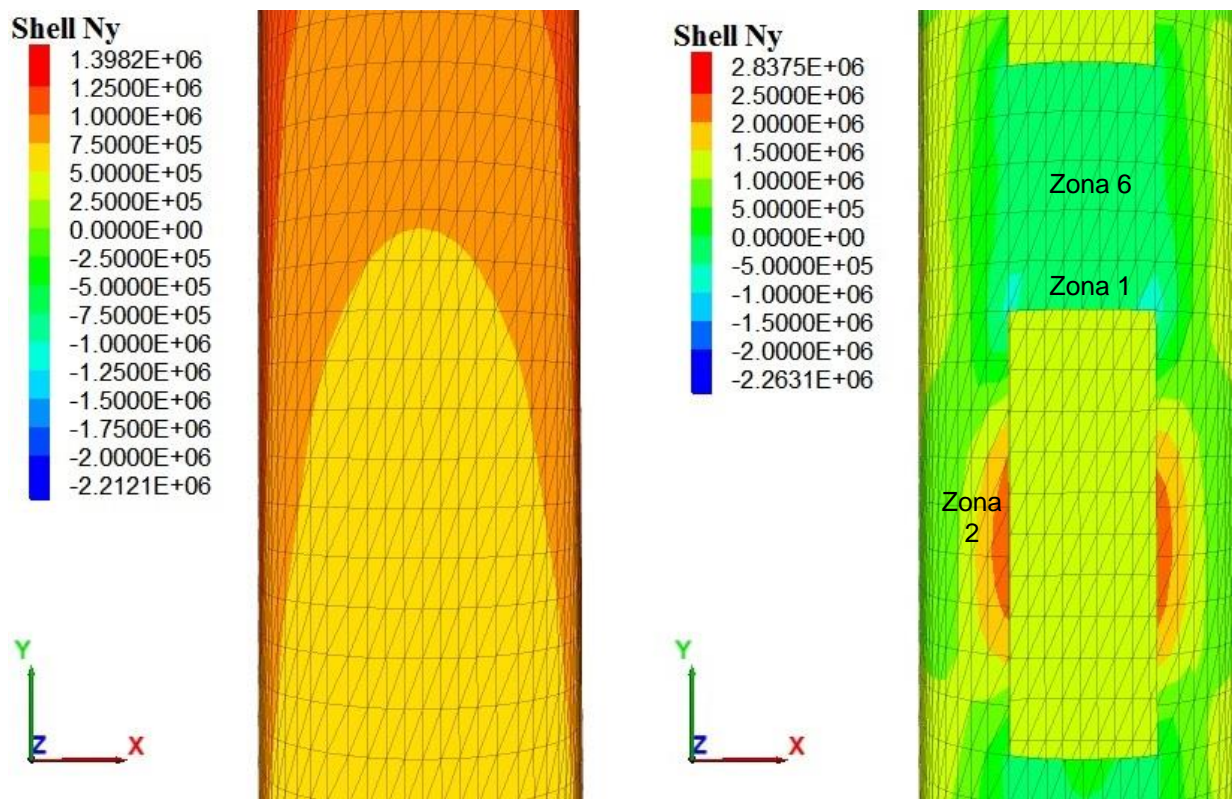


Figura 6-18. Comparación diagramas del esfuerzo axial Ny [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm

Tabla 6-21. Esfuerzo de momento Mx para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Esfuerzo de momento sin bocas [kNm/m]	Esfuerzo de momento con bocas [kNm/m]	Relación con/sin bocas
2	-21,503	-90,651	4,22
3	-28,035	-50,042	1,78
4	-5,230	1,287	-0,24

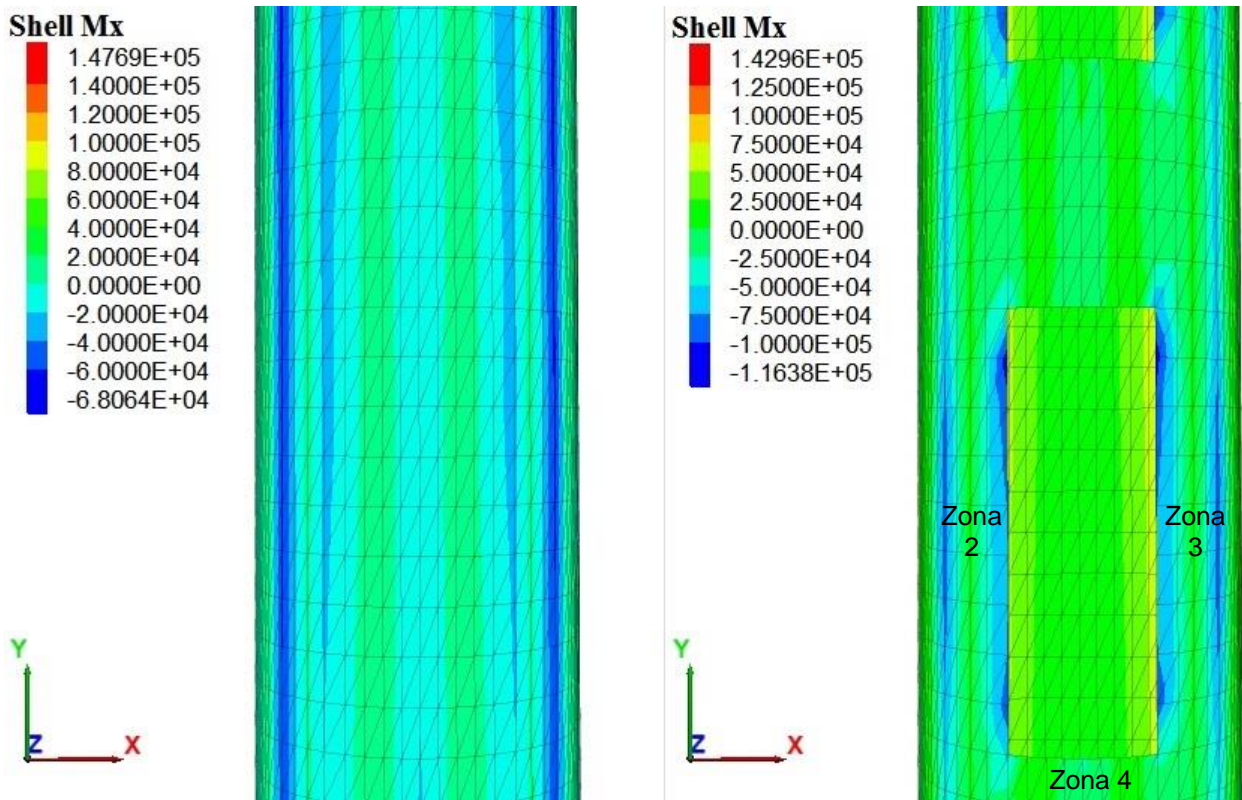


Figura 6-19. Comparación diagramas del esfuerzo axial Mx [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm

A diferencia de lo que ocurre con el perfil de corrugación 152 x51 mm, el esfuerzo de momento transversal para el perfil 381x140 mm si experimenta cambios con la presencia de las bocas de alimentación, el cual aumenta entre un 78% y un 320% en los costados de las bocas.

Tabla 6-22. Esfuerzo de momento My para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Esfuerzo de momento sin bocas [kNm/m]	Esfuerzo de momento con bocas [kNm/m]	Relación con/sin bocas
1	-0,003	0,134	-44,67
3	-0,003	-0,067	22,33
4	0,0002	0,146	730
3	-0,004	-0,052	13

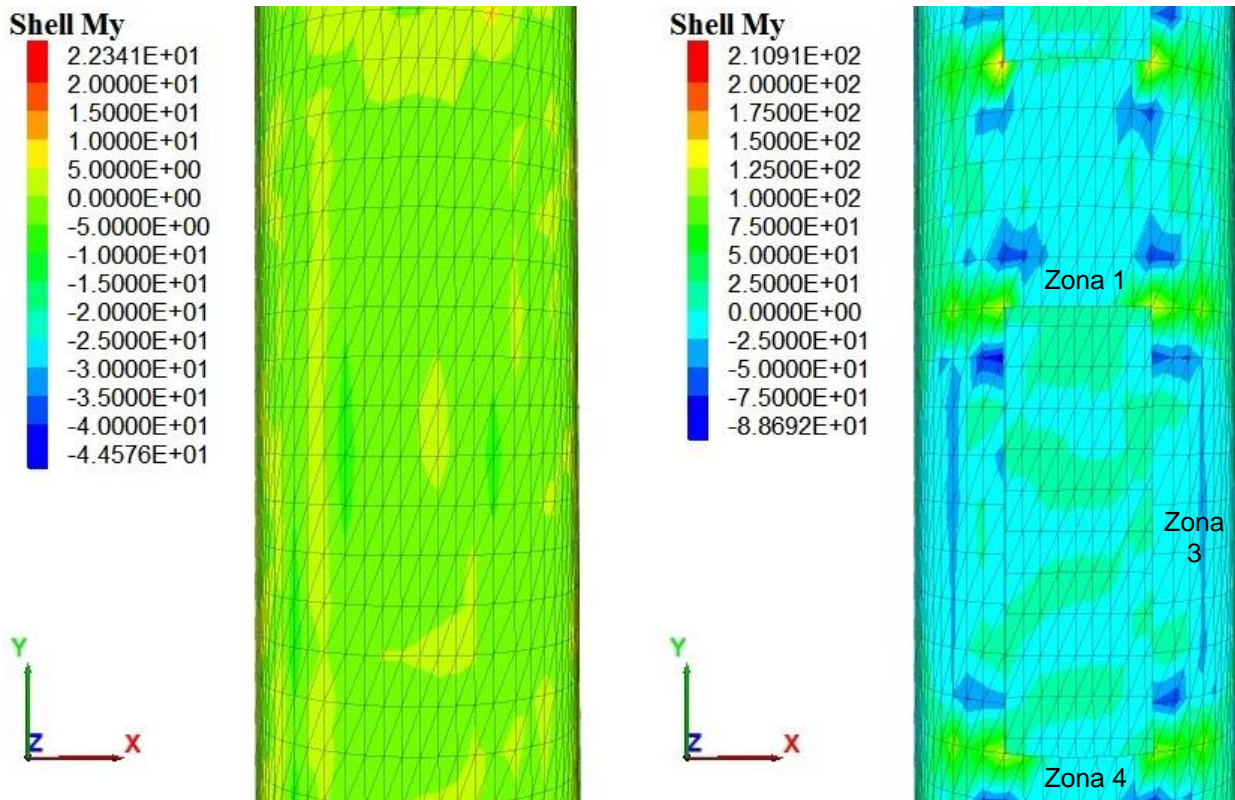


Figura 6-20. Comparación diagramas del esfuerzo axial My [kNm/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm

El esfuerzo de momento en la dirección longitudinal también aumenta bastante para el perfil de corrugación 381x140 mm con las bocas de alimentación, sin embargo, estos valores no superan el 1% del esfuerzo de momento en la dirección transversal.

Tabla 6-23. Esfuerzo de momento Qx para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Esfuerzo de corte sin bocas [kN/m]	Esfuerzo de corte con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
2	92,958	153,8	1,65
2	97,443	146,072	1,5
2	14,602	-88,303	-6,05
2	14,946	-69,410	-4,64

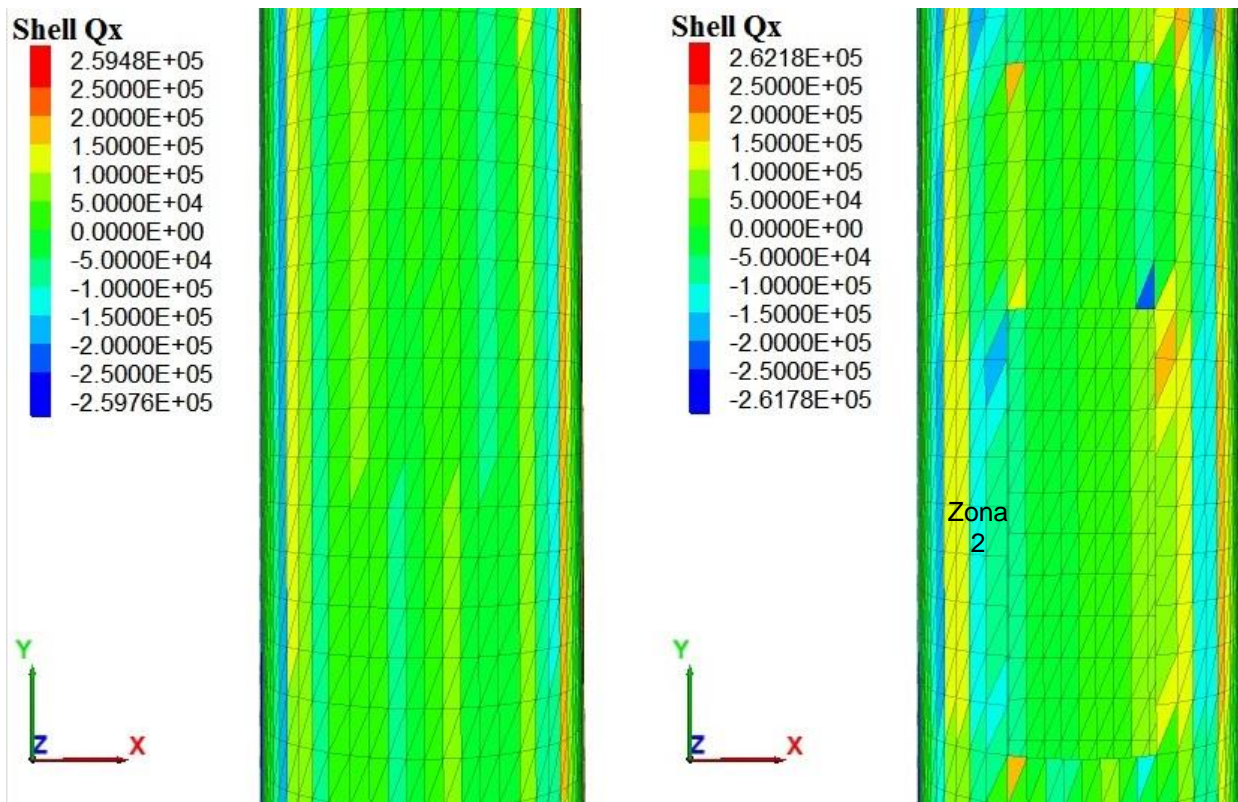


Figura 6-21. Comparación diagramas del esfuerzo axial Qx [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm

Tabla 6-24. Esfuerzo de momento Q_y para modelo con y sin bocas de alimentación. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm

Zona	Esfuerzo de corte sin bocas [kN/m]	Esfuerzo de corte con bocas [kN/m]	Relación con/sin bocas
1	0,017	0,344	20,24
3	-0,004	-0,078	19,5
1	-0,012	-0,344	28,67

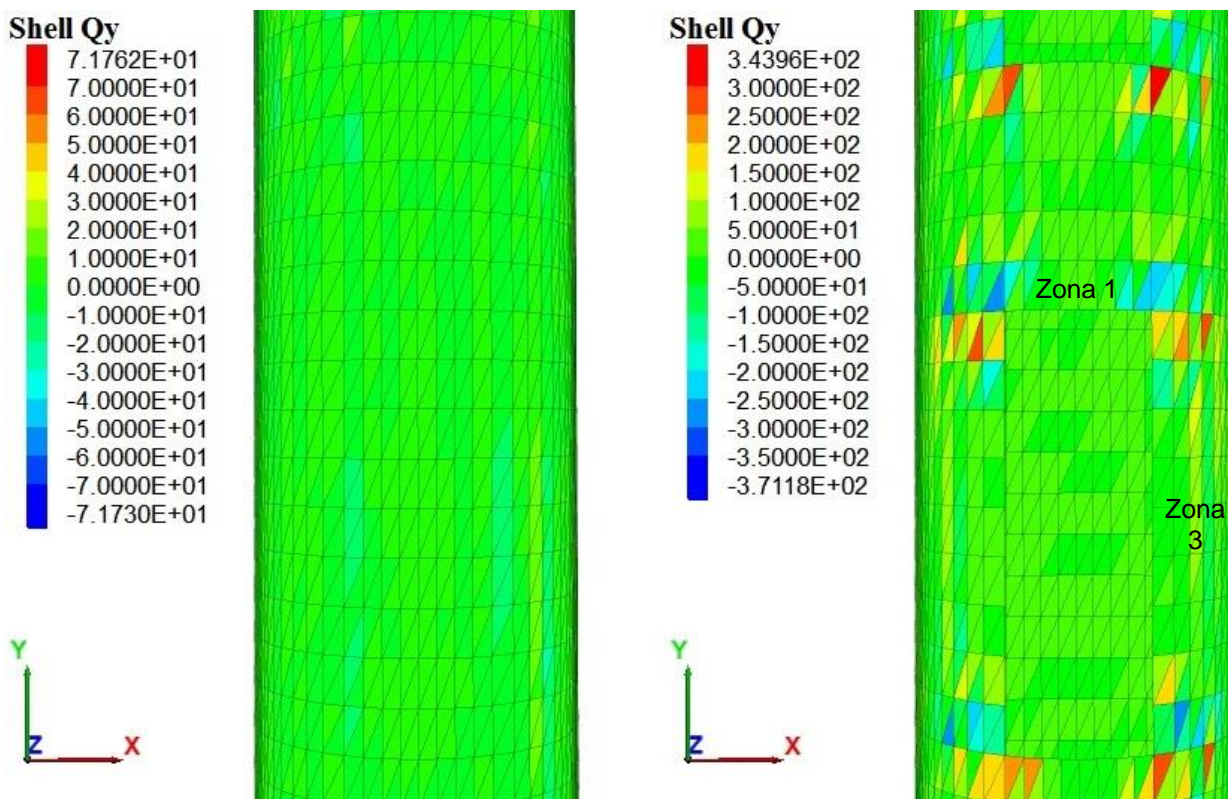


Figura 6-22. Comparación diagramas del esfuerzo axial Q_y [kN/m] para el túnel sin bocas (izquierda) y con bocas de alimentación (derecha). Perfil de corrugación 381x140 mm

Al igual que para el perfil 152x51 mm, el esfuerzo de corte en la dirección longitudinal para el perfil de corrugación 381x140 mm es muy bajo con respecto al esfuerzo de corte en la dirección transversal, no supera el 1%.

6.4 Deformación admisible

En esta sección se analiza la deformación del túnel de recuperación para ambos perfiles de corrugación durante el proceso constructivo, la cual no debe superar el 2% del radio del túnel. Se verifica la deformación del túnel para 3 etapas de la construcción: al tener 10 capas de relleno estructural (equivalente a 2 metros), al tener 20 capas de relleno estructural (equivalente a 4 metros y donde el túnel queda completamente cubierto) y al alcanzar la altura mínima de recubrimiento.

El signo del desplazamiento de los diagramas es consistente con el eje global de coordenadas del túnel, es decir, un desplazamiento vertical positivo corresponde a una deformación en el sentido del eje Z y viceversa, lo mismo ocurre con el desplazamiento horizontal y el eje global X.

6.4.1 Deformación vertical

La deformación vertical no debe superar el 2% del radio vertical del túnel:

$$\Delta Z_{max} = \frac{2}{100} \cdot 4,2 [m] = 0,084 [m]$$

A partir del análisis realizado en el programa FLAC3D se obtiene la deformación vertical del tubo de acero corrugado a medida que se colocan y se compactan las capas de relleno estructural.

6.4.1.1 Perfil de corrugación 152x51 mm

- **10 capas de relleno estructural**

Luego de colocar y compactar 10 capas de relleno estructural, el tubo de acero corrugado experimenta una deformación de 0,0034 metros en el punto más alto del túnel (zona roja figura 6-23) y una deformación de 0,013 metros en las paredes (zona azul figura 6-23). Cabe mencionar que el relleno estructural alcanza una altura de 2 metros, es decir, aproximadamente la mitad del túnel.

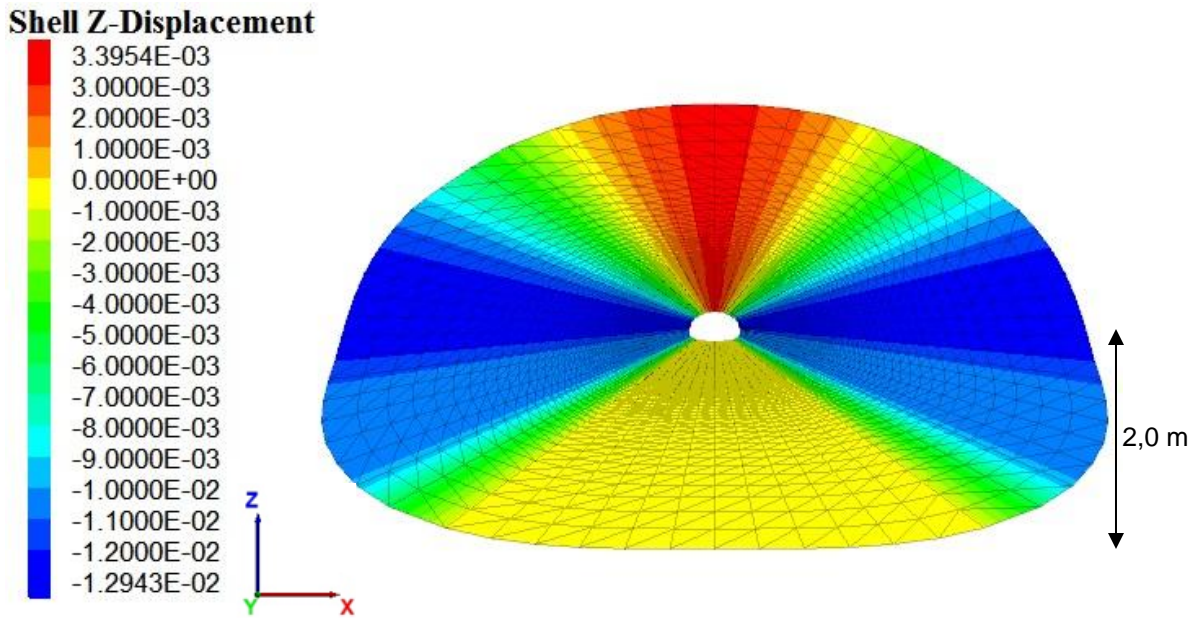


Figura 6-23. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

- **20 capas de relleno estructural**

Al cubrir completamente el túnel de recuperación con el relleno estructural, la deformación vertical en el punto más alto aumenta a 0,39 metros (zona roja de la figura 6-24), mientras que la deformación vertical en las paredes disminuye a 0,1 metros (zona azul de la figura 6-24).

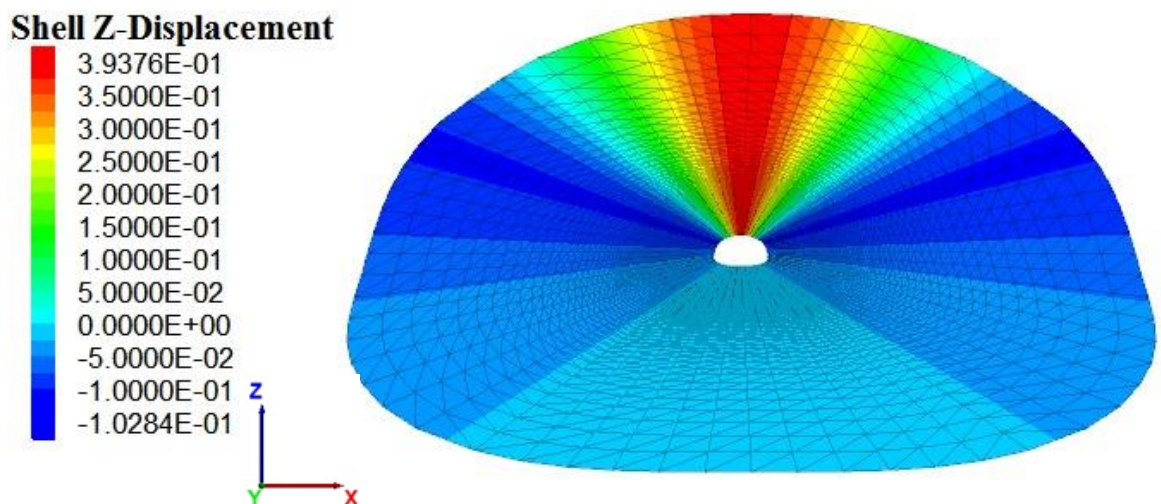


Figura 6-24. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

- **Altura mínima de recubrimiento**

Al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural, la deformación vertical del túnel disminuye a 0,32 metros en el punto más alto y casi no varía en las paredes con respecto a la etapa anterior. El diagrama de la figura 6-25 presenta un factor de deformación igual a 2 que permite visualizar de mejor manera la deformación que experimenta el tubo de acero corrugado.

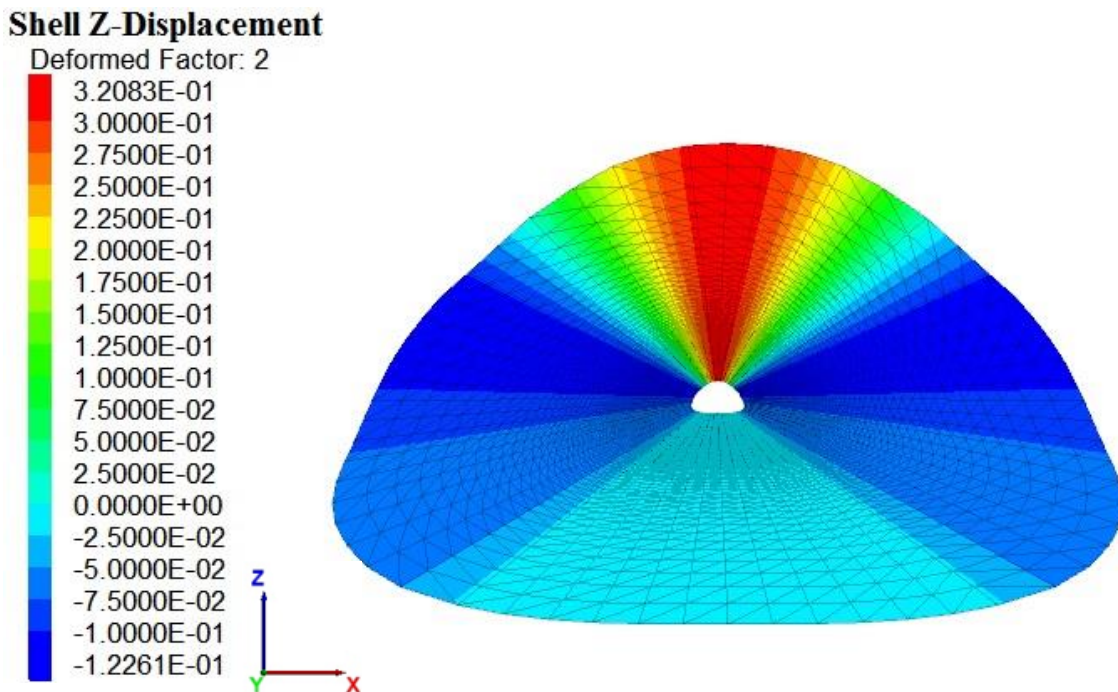


Figura 6-25. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 152x51 mm

- **Pila de acopio y bocas de alimentación**

Al incluir la pila de acopio en el modelo, la deformación de las paredes aumenta a 0,32 metros en la sección del túnel que se encuentra bajo la pila (zona azul de la figura 6-26), mientras que la deformación en el punto más alto del túnel disminuye a 0,08 metros en esta sección.

Adicionalmente, se presenta el diagrama de la deformación vertical en la sección del túnel donde se encuentran las bocas de alimentación bajo la pila de acopio, el cual presenta un aumento en la deformación vertical de aproximadamente 0,11 metros en las zonas cercanas a las bocas con respecto al diagrama sin estas (ver figura 6-27).

Shell Z-Displacement

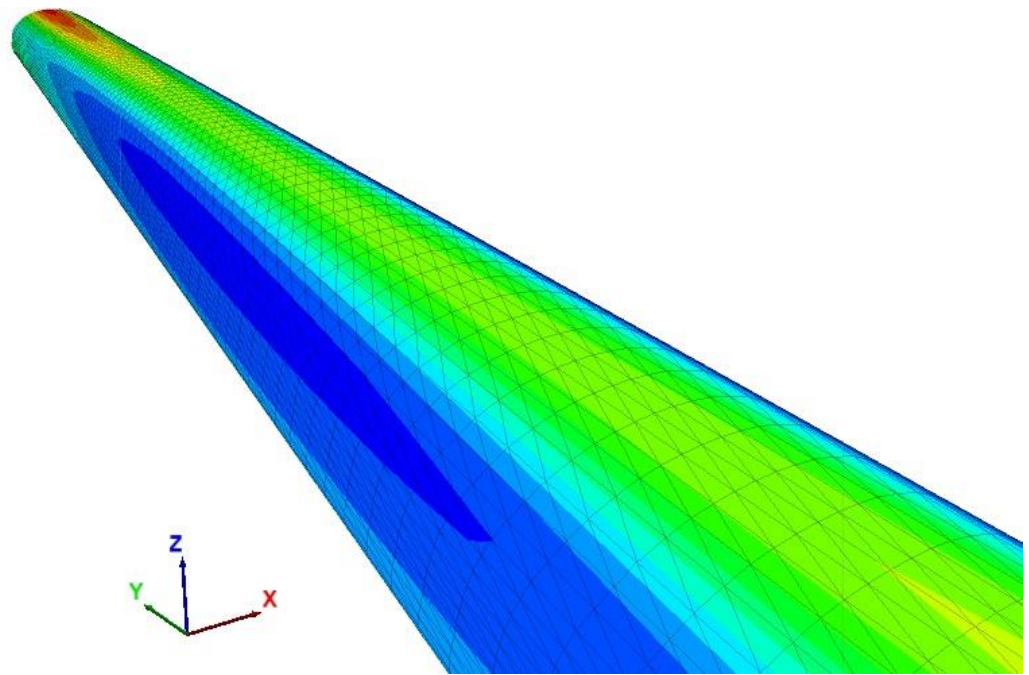
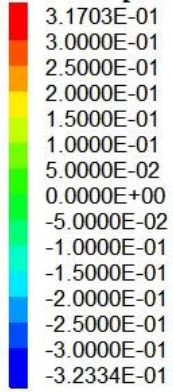


Figura 6-26. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 152x51 mm

Shell Z-Displacement

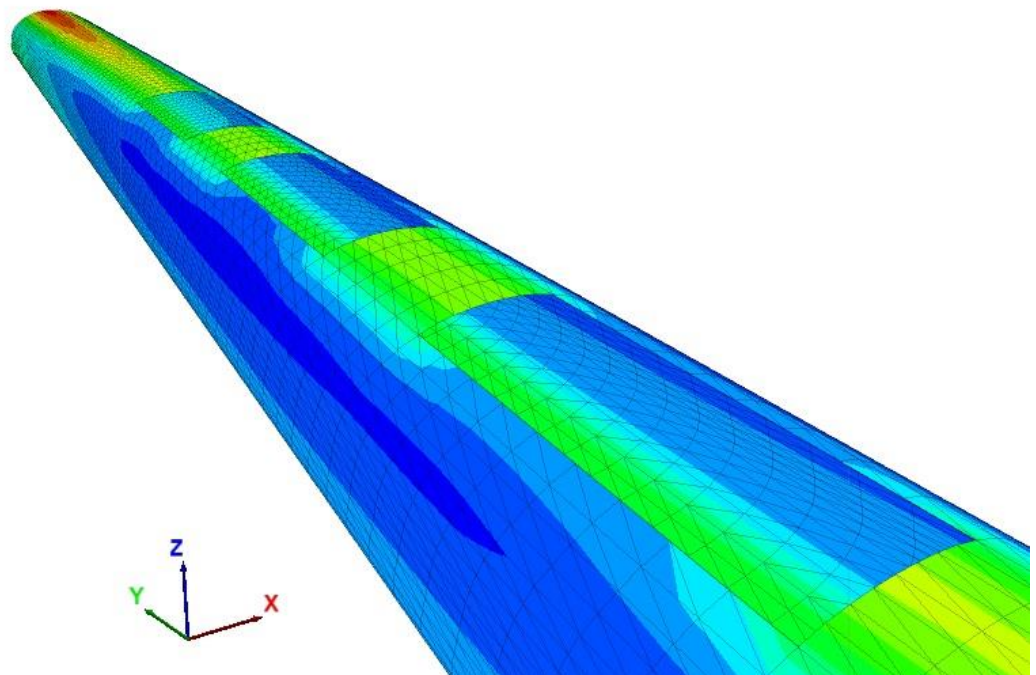
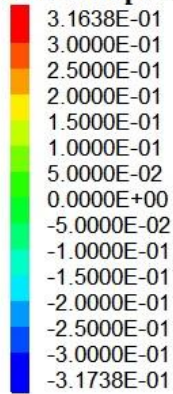


Figura 6-27. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 152x51 mm

6.4.1.2 Perfil de corrugación 381x140 mm

- **10 capas de relleno estructural**

Con 10 capas de relleno estructural colocadas y compactadas, el tubo de acero con corrugación 381x140 mm experimenta una deformación vertical menor a 0,002 metros en todas las secciones.

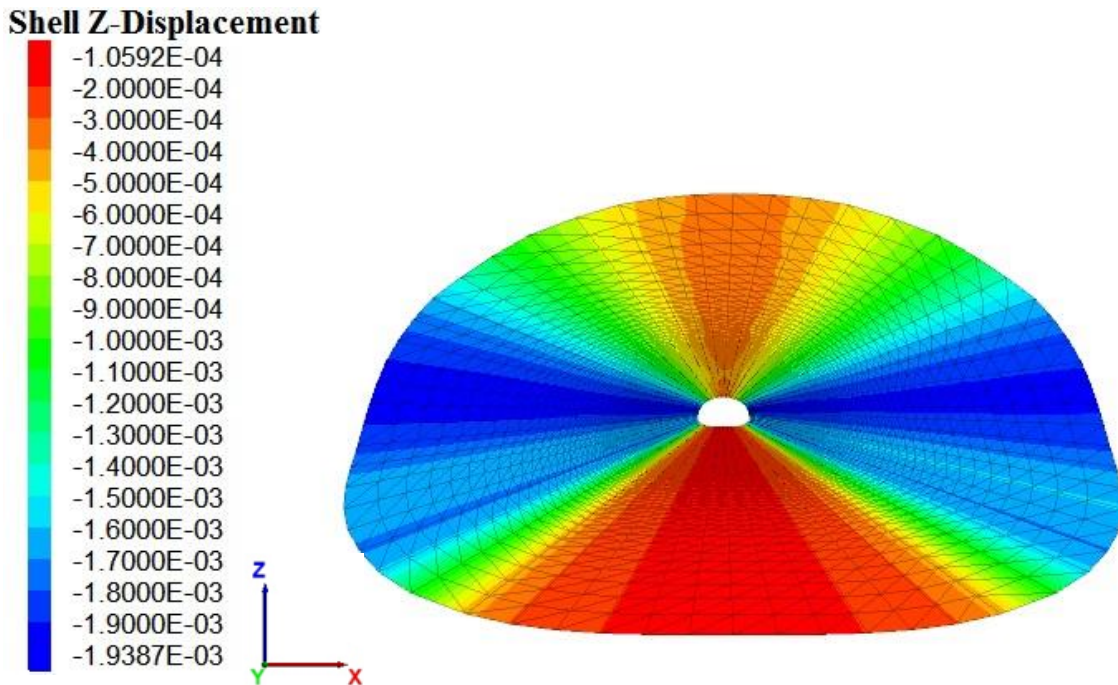


Figura 6-28. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

- **20 capas de relleno estructural**

Luego, al cubrir el túnel en su totalidad con el relleno estructural, la deformación vertical aumenta, con un valor máximo aproximado de 0,04 metros.

Shell Z-Displacement

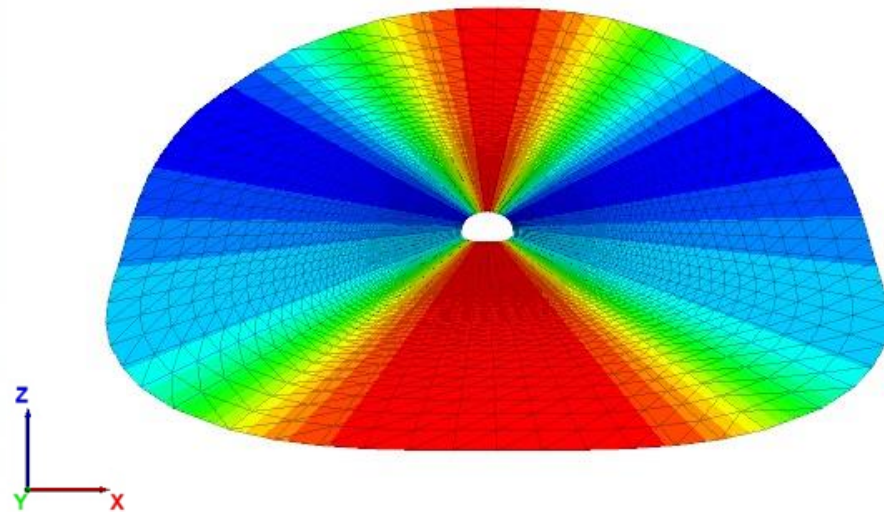
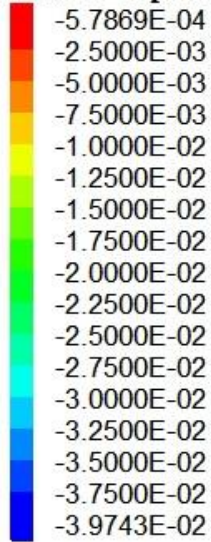


Figura 6-29. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

- **Altura mínima de recubrimiento**

Al finalizar el proceso constructivo del túnel con un perfil de corrugación 381x140 mm, se tiene una deformación vertical menor a 0,052 metros en todas las secciones del túnel.

Shell Z-Displacement

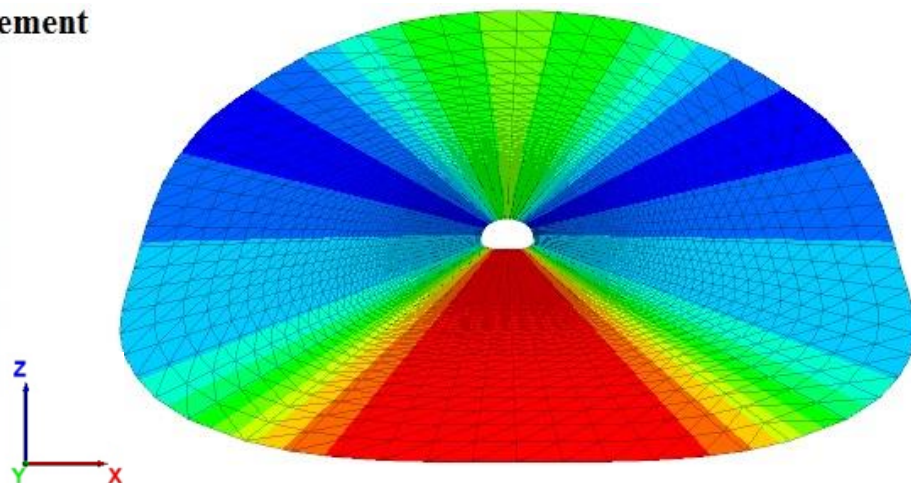
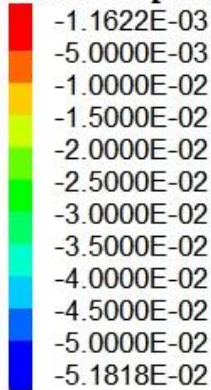


Figura 6-30. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 381x140 mm

- **Pila de acopio y bocas de alimentación**

Por último, la deformación vertical del túnel aumenta considerablemente en la sección que se encuentra bajo la pila de acopio (ver figura 6-31), llegando a un máximo de 0,24 metros. Con la presencia de las bocas de alimentación en esta sección, la deformación disminuye ligeramente, pero continúa siendo aproximadamente 0,24 metros (ver figura 6-32).

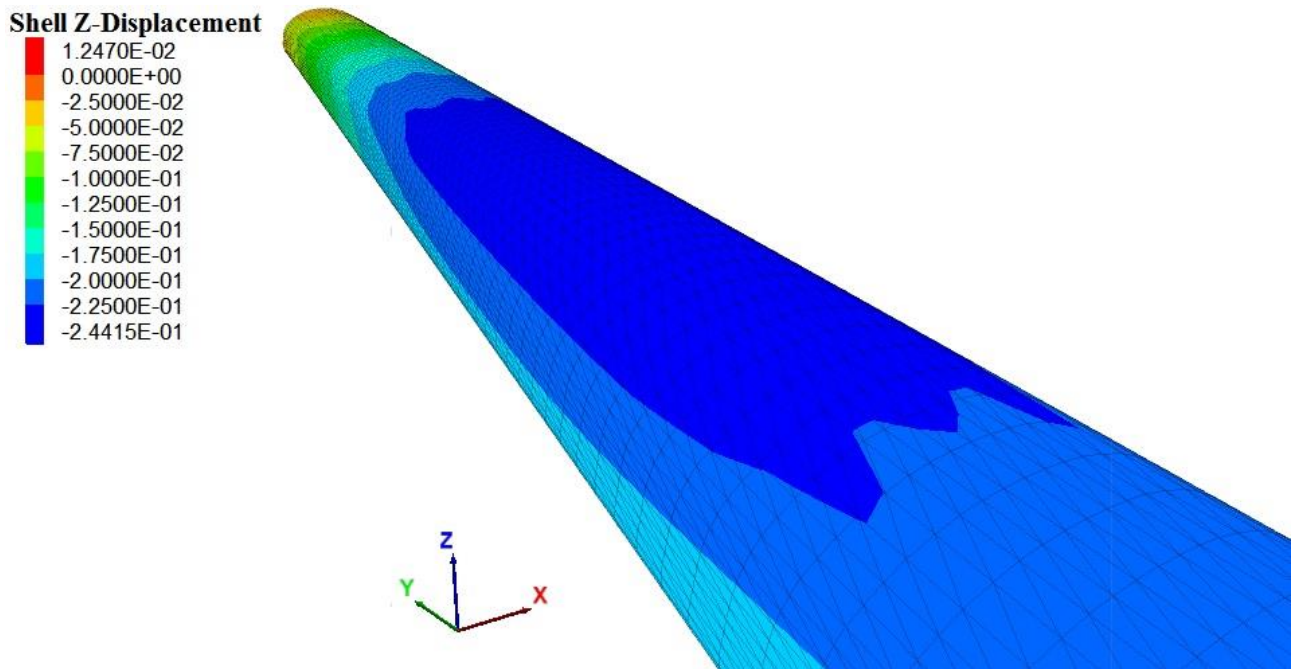


Figura 6-31. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 381x140 mm

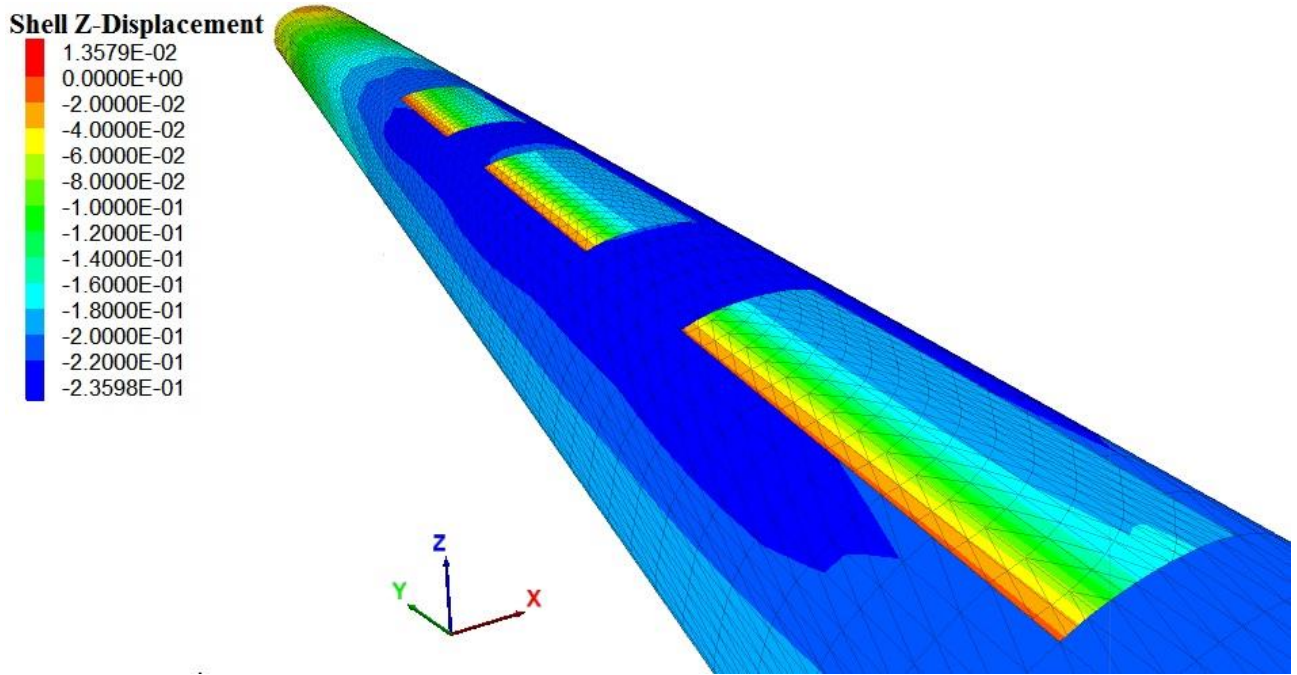


Figura 6-32. Diagrama de desplazamiento vertical [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 381x140 mm

6.4.2 Deformación horizontal

La deformación horizontal no debe superar el 2% del radio horizontal del túnel:

$$\Delta Z_{max} = \frac{2}{100} \cdot 7,4 [m] = 0,148 [m]$$

6.4.2.1 Perfil de corrugación 152x51 mm

- **10 capas de relleno estructural**

Para 10 capas de relleno estructural, la deformación vertical de las paredes del túnel de recuperación es de 0,01 metros (zona roja y azul de la figura 6-33).

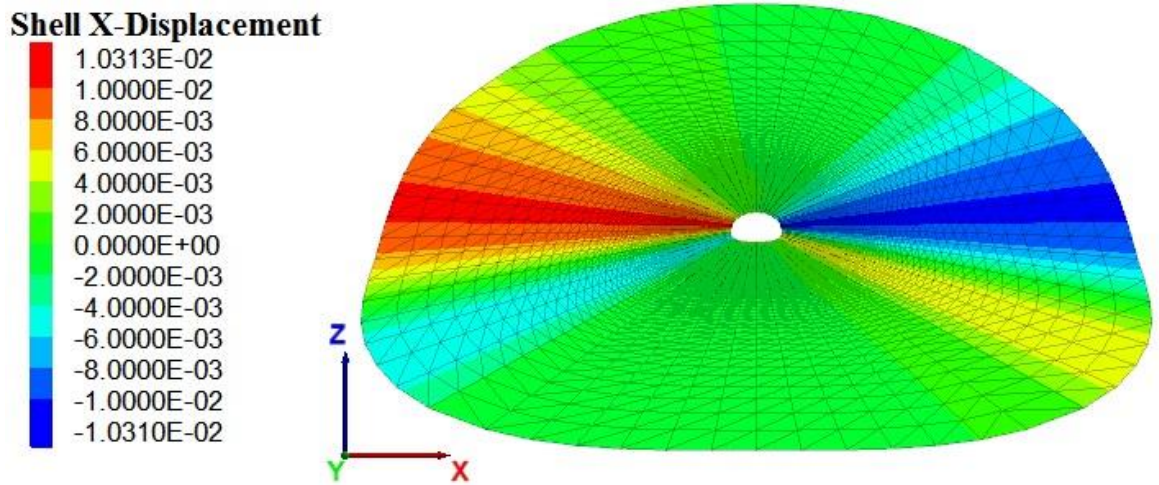


Figura 6-33. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

- **20 capas de relleno estructural**

Al tener el túnel de recuperación cubierto por el relleno estructural, se tiene un aumento de la deformación horizontal de las paredes del túnel, la cual alcanza un valor de 0,184 metros.

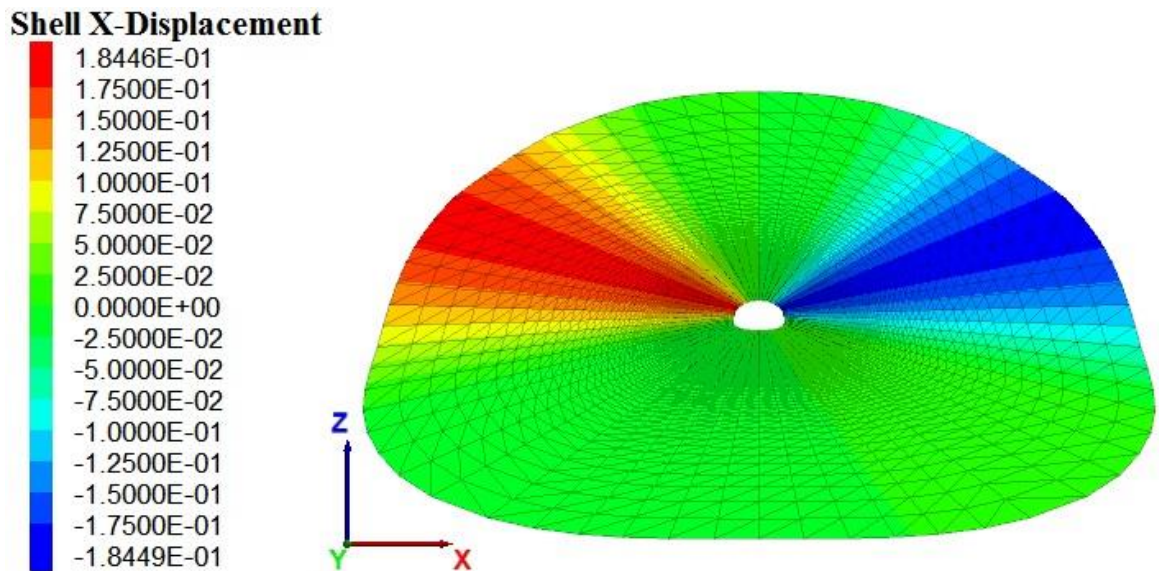


Figura 6-34. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

- **Altura mínima de recubrimiento**

La máxima deformación horizontal de las paredes del túnel de recuperación disminuye a 0,17 metros al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural.

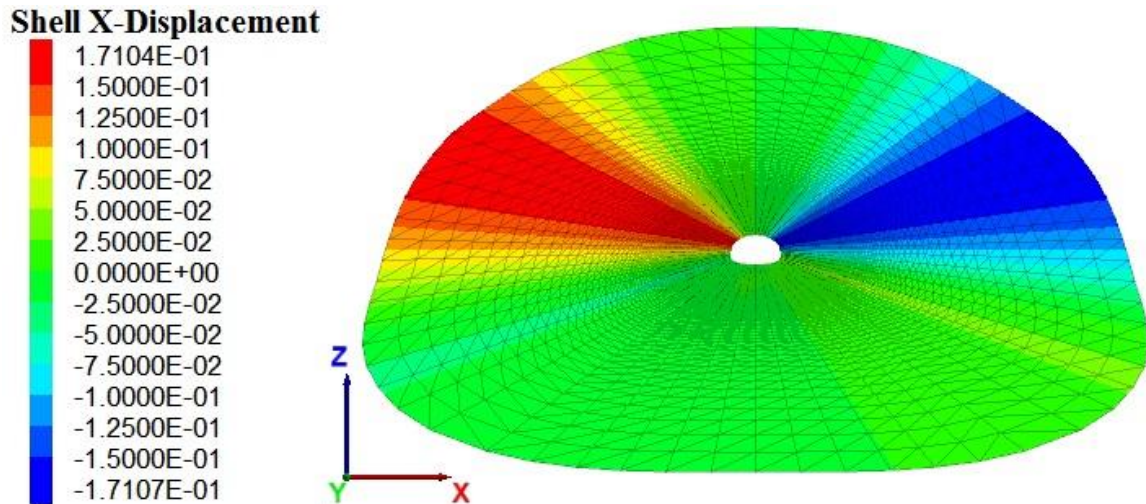


Figura 6-35. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 152x51 mm

- **Pila de acopio y bocas de alimentación**

Por último, con la pila de acopio y las bocas de alimentación, la deformación horizontal de las paredes del túnel no varía considerablemente y se mantiene con un valor máximo de 0,17 metros (ver figuras 6-36 y 6-37).

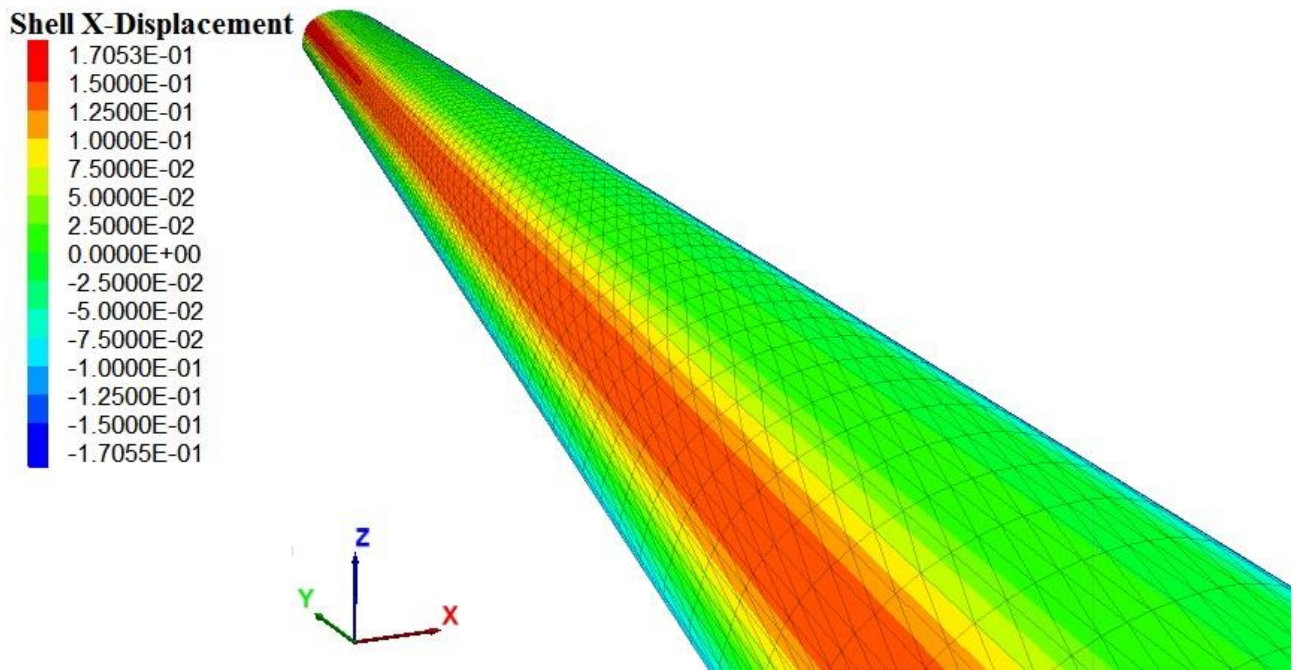


Figura 6-36. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 152x51 mm

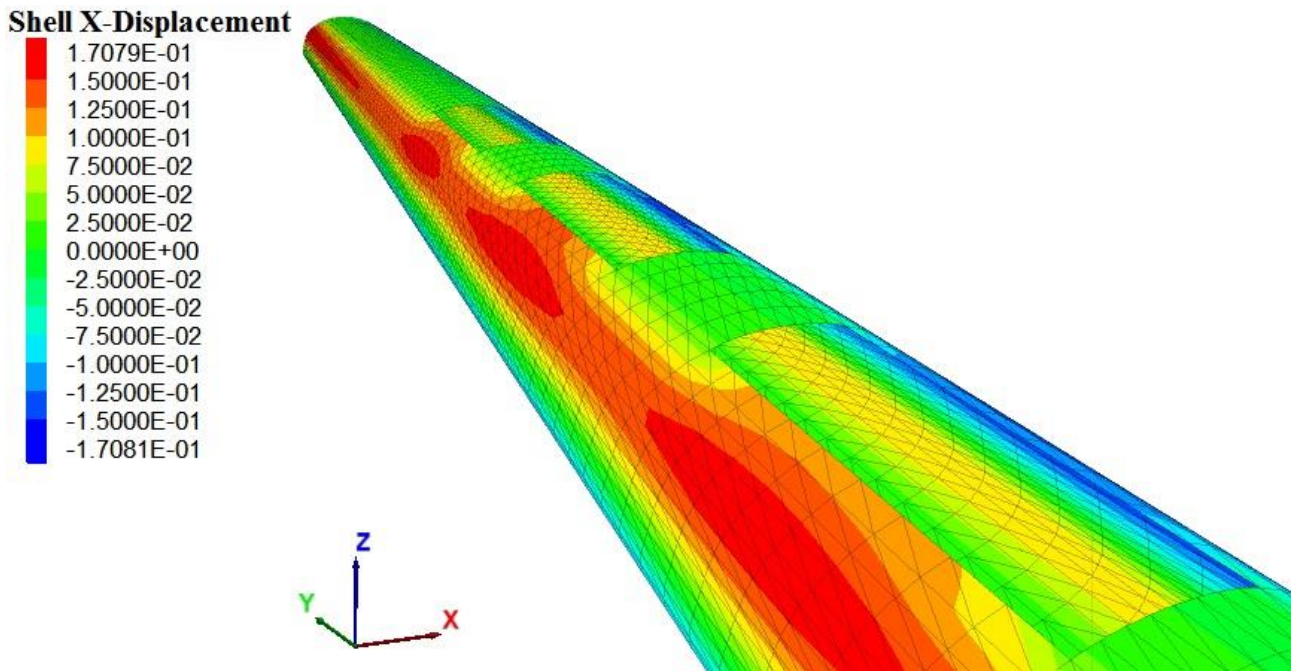


Figura 6-37. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 152x51 mm

6.4.2.2 Perfil de corrugación 381x140 mm

- **10 capas de relleno estructural**

La deformación horizontal de las paredes del túnel con un perfil de corrugación 381x140 mm es de aproximadamente 0,0011 metros.

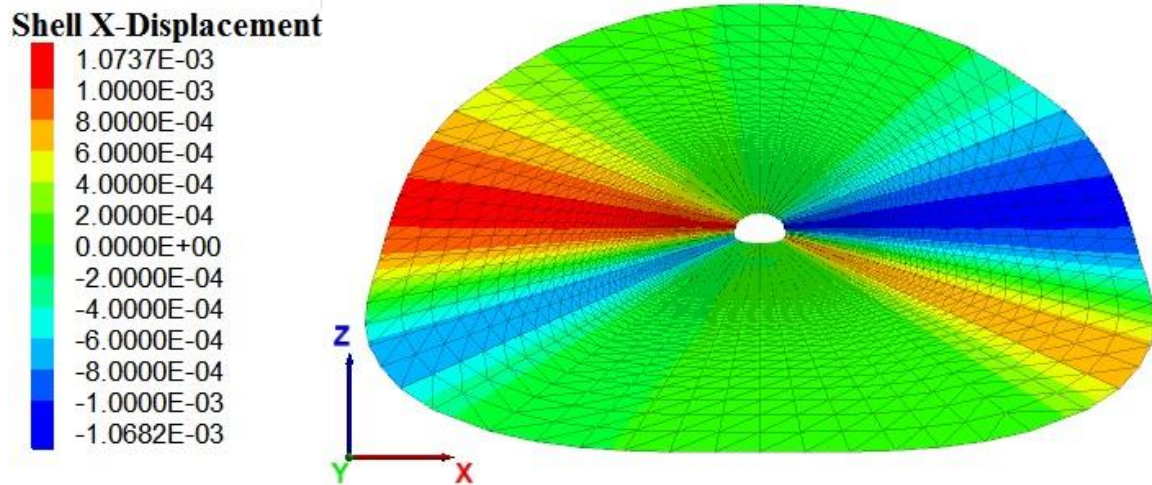


Figura 6-38. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 10 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

- **20 capas de relleno estructural**

Luego, para 20 capas colocadas y compactadas de relleno estructural, la deformación horizontal aumenta a 0,014 metros aproximadamente, la cual se encuentra en un punto más alto de la pared del túnel (ver figura 6-39).

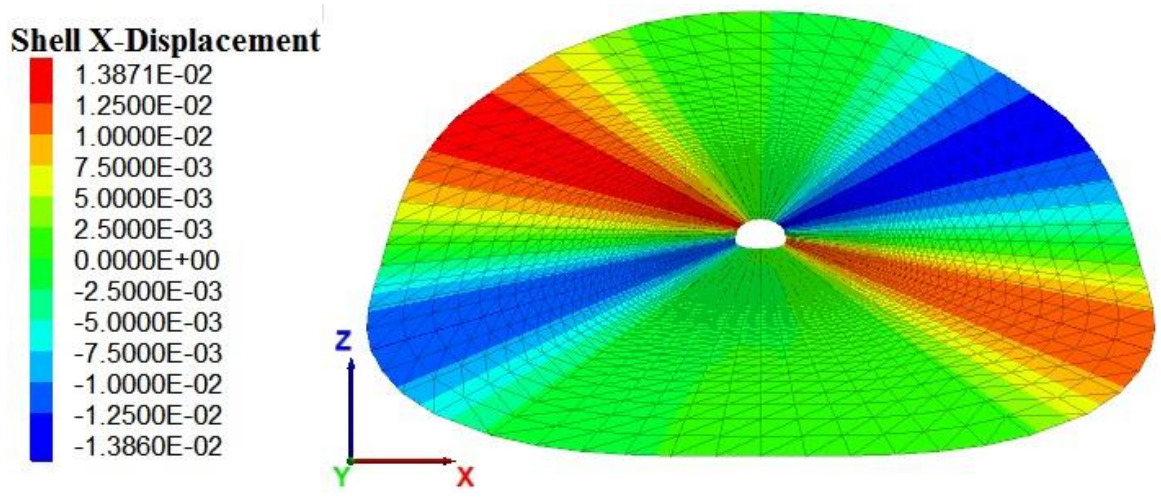


Figura 6-39. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con 20 capas de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

- **Altura mínima de recubrimiento**

Con la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural, la deformación horizontal de las paredes del túnel aumenta ligeramente, con un valor máximo de 0,0174 metros en los riñones o costados del túnel.

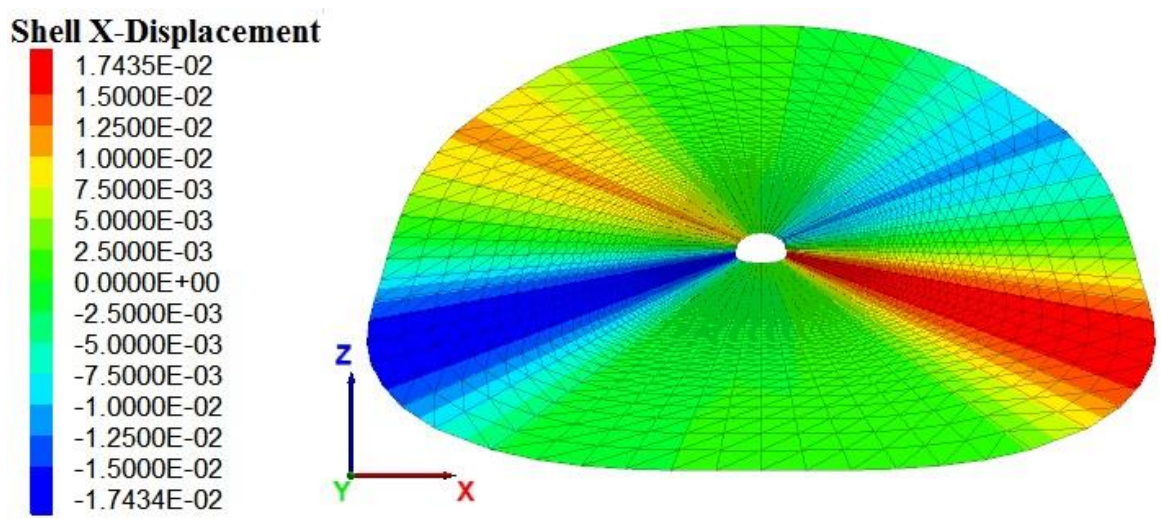


Figura 6-40. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la altura mínima de recubrimiento. Perfil de corrugación 381x140 mm

- **Pila de acopio y bocas de alimentación**

Finalmente, en las figuras 6-41 y 6-42 se presenta el desplazamiento horizontal de las paredes del túnel con la pila de acopio y las bocas de alimentación respectivamente. Con la pila de acopio sobre el túnel de recuperación, la deformación horizontal de los riñones o costados del túnel aumenta considerablemente, alcanzando un valor máximo de 0,0812 metros. Con las bocas de alimentación, este valor disminuye a 0,0781 metros en la misma zona del túnel.

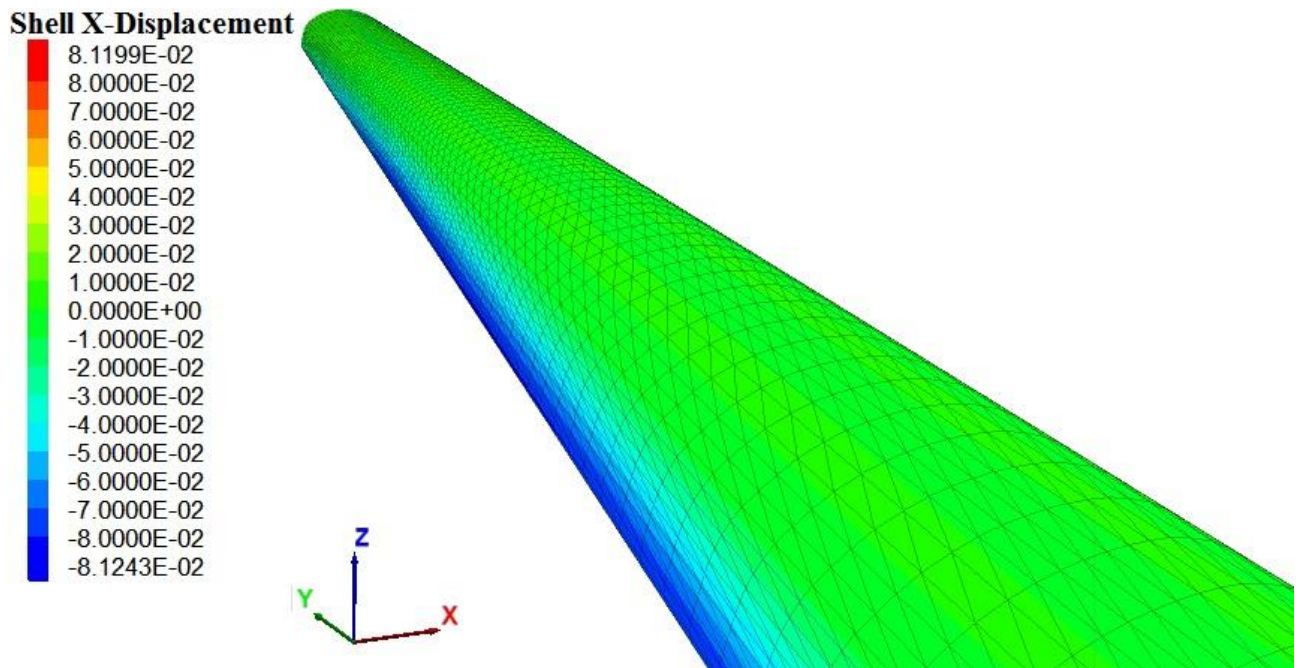


Figura 6-41. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio. Perfil de corrugación 381x140 mm

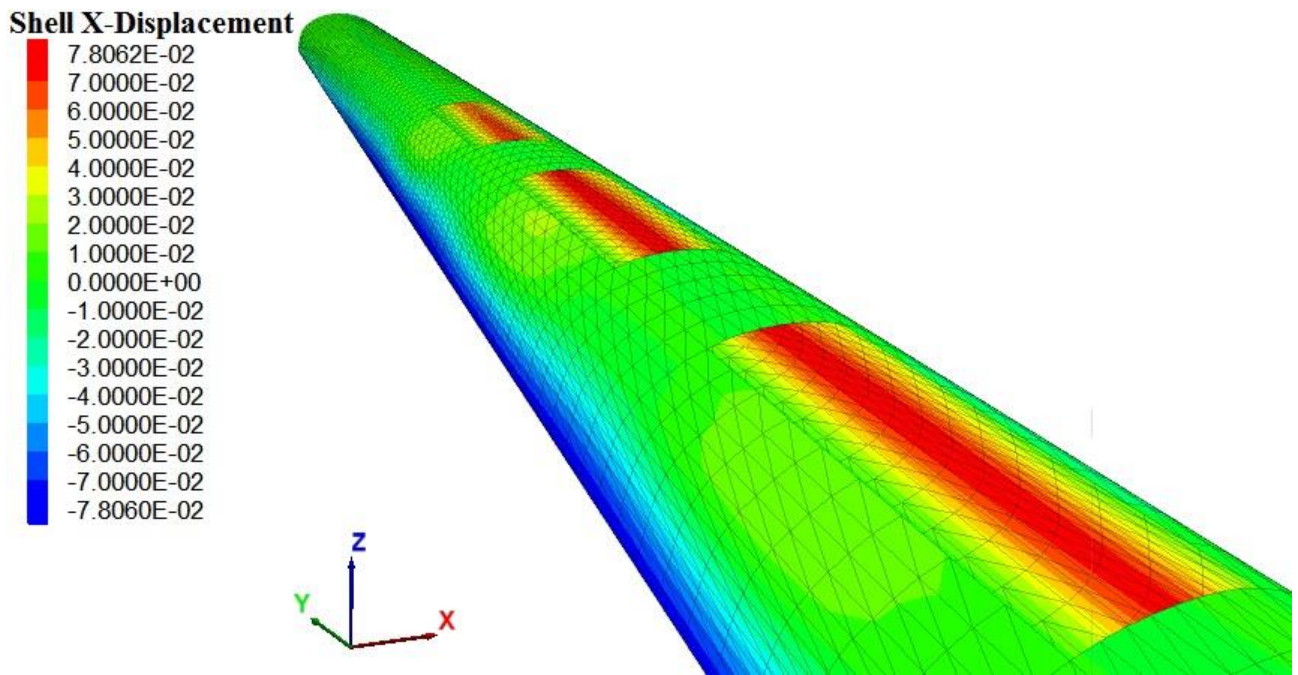


Figura 6-42. Diagrama de desplazamiento horizontal [m] del túnel de recuperación con la pila de acopio y bocas de alimentación. Perfil de corrugación 381x140 mm

7. Diseño estructural

7.1 Introducción general

El diseño estructural se lleva a cabo utilizando los esfuerzos internos obtenidos a partir del modelo analizado en el programa FLAC3D, los cuales se presentan en el capítulo anterior. Estos esfuerzos se amplifican según el procedimiento CHBDC detallado en el capítulo 6 del manual canadiense *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction*, para luego diseñar.

En el manual canadiense también se presenta una manera simple y aproximada de calcular los esfuerzos de compresión y de momento necesarios para diseñar estructuralmente el túnel de recuperación. Sin embargo se opta por utilizar los esfuerzos entregados por el programa, ya que permite modelar y considerar las cargas de suelo y de la pila de acopio de mejor manera.

En las secciones posteriores de este capítulo se presentan los parámetros de diseño de la propuesta, los esfuerzos de diseño utilizados junto con el diseño estructural del túnel y un análisis de costos del diseño con tubos de acero corrugado, realizando una comparación con el diseño de hormigón armado.

7.2 Parámetros de diseño

Según lo estipulado en el manual canadiense y considerando el modelo a analizar, los parámetros o factores a diseñar son los siguientes:

7.2.1 Altura de recubrimiento de suelo

El túnel debe tener una altura mínima de recubrimiento de suelo, la que depende de las dimensiones de la sección transversal del túnel. Esta altura mínima aporta resistencia y rigidez al tubo de acero corrugado por lo que es muy importante que se cumpla al momento de la construcción. Además, permite controlar la deformación vertical y horizontal del túnel generada por el mismo proceso constructivo.

7.2.2 Resistencia del tubo a compresión

Se determina el esfuerzo de compresión del tubo en el estado límite último (*ULS: Ultimate Limit State*) para los 3 radios del túnel y el esfuerzo de falla a compresión. El esfuerzo de compresión en el estado límite último de cada radio no debe ser mayor al esfuerzo de falla a compresión del tubo.

7.2.3 Resistencia del tubo durante la construcción

El tubo de acero corrugado debe resistir los efectos combinados del esfuerzo axial y de momento generados por el suelo circundante al túnel, es decir, este efecto combinado no debe exceder la capacidad de momento plástico de la sección durante todo el proceso constructivo. Se analizan 3 etapas del proceso constructivo con distintas alturas de recubrimiento de suelo.

7.2.4 Resistencia del tubo para corrugaciones profundas

Una verificación adicional se debe realizar para estructuras con corrugaciones profundas. En caso de tener una profundidad de onda elevada, se debe analizar la resistencia de la estructura considerando los efectos combinados del esfuerzo axial y de momento. Estos esfuerzos corresponden a los esfuerzos máximos generados en el tubo con el modelo completo, es decir, considerando la pila de acopio.

7.2.5 Resistencia de las conexiones

Las conexiones del tubo de acero corrugado deben resistir el máximo esfuerzo axial obtenido del análisis. Se diseña el tipo y número de pernos que debe tener cada conexión.

7.2.6 Radio de curvatura

Los radios de curvatura del túnel no deben ser mayor a 0,2 veces el radio de la zona superior.

7.3 Diseño estructural túnel sin bocas de alimentación

En primer lugar se diseña estructuralmente considerando el tubo de acero con un perfil de corrugación 152x51 mm. Se obtiene como resultado que el diseño con este tipo de corrugación no cumple con todos los requerimientos de resistencia, específicamente para la resistencia a compresión del radio de la zona superior del túnel, y tampoco cumple con la deformación admisible, por lo que se procede a utilizar un tubo de acero con corrugación 381x140 mm; con valores mayores de espesor, profundidad de onda y longitud entre ondas. En esta sección se presenta un resumen del diseño estructural realizado para ambos perfiles de corrugación, según lo expuesto en la sección 2.6 del presente trabajo sobre diseño estructural de túneles con tubo de acero corrugado.

7.3.1 Altura de recubrimiento de suelo

La altura mínima de recubrimiento de suelo para estructuras diseñadas con el método CHBDC es el máximo valor de:

a) 0,6 m

b) $\frac{D_h}{6} \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^{\frac{1}{2}}$ m

c) $0,4 \left(\frac{D_h}{D_v} \right)^2$ m

Dónde:

D_h : Dimensión horizontal de la estructura según lo definido en la figura 2-12 (figura 6.11 del manual canadiense) [m].

D_v : Dimensión vertical de la estructura según lo definido en la figura 2-12 (figura 6.11 del manual canadiense) [m].

Según la figura 2-12, para un tubo de acero corrugado con forma de bóveda, los valores para D_h y D_v son los siguientes:

$$D_h = 7,4 \text{ m} ; D_v = 6 \text{ m}$$

Así, se obtienen los valores para determinar la altura mínima de recubrimiento.

- a) 0,6 m
- b) 1,37 m
- c) 0,61 m

Se utiliza una altura mínima de recubrimiento de suelo de 1,4 metros por sobre el punto más alto del túnel.

7.3.2 Resistencia del tubo a compresión

La resistencia a compresión del tubo se verifica para los 3 radios del túnel detallados anteriormente, para cada uno de estos casos se utiliza el mayor esfuerzo de compresión entregado por el programa.

7.3.2.1 Zona superior

Tal como se presenta en las tablas 6-1 y 6-2 se utiliza el mismo esfuerzo de compresión tanto para la zona superior como para el costado del túnel.

Esfuerzo de compresión perfil 152x51: $T_{D_{152}} = 1.235 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión perfil 381x140: $T_{D_{381}} = 1.138,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de carga muerta: $\alpha_{DL} = 1,25$

Esfuerzo de compresión amplificado perfil 152x51: $T_{f_{152}} = 1.543,75 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión amplificado perfil 381x140: $T_{f_{381}} = 1.422,875 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de diseño perfil 152x51:

$$\sigma_{152} = \frac{T_{f_{152}}}{\text{Área}} = 179,92 [MPa]$$

Esfuerzo de diseño perfil 381x140:

$$\sigma_{381} = \frac{T_{f_{381}}}{\text{Área}} = 126,70 [MPa]$$

Radio:

$$R = 4.200 \text{ mm}$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 152x51:

$$f_{b_{152}} = 96,42 [MPa]$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 381x140:

$$f_{b_{381}} = 142,13 [MPa]$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{152} = 179,92 \text{ MPa} < 96,42 \text{ MPa} = f_{b_{152}}$$

NO CUMPLE

$$\sigma_{381} = 126,7 \text{ MPa} < 142,13 \text{ MPa} = f_{b_{381}}$$

CUMPLE

Se tiene que el tubo de acero con corrugación 152x51 mm no resiste el esfuerzo de compresión en la zona superior del túnel, a diferencia del perfil de corrugación 381x140 mm.

7.3.2.2 Costado o riñón

Análogamente al procedimiento descrito para la zona superior, se verifica el cumplimiento del requisito para la compresión.

Esfuerzo de compresión perfil 152x51:

$$T_{D_{152}} = 1.235 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión perfil 381x140:

$$T_{D_{381}} = 1.138,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Factor de carga muerta:

$$\alpha_{DL} = 1,25$$

Esfuerzo de compresión amplificado perfil 152x51:

$$T_{f_{152}} = 1.543,75 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión amplificado perfil 381x140:

$$T_{f_{381}} = 1.422,875 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de diseño perfil 152x51:

$$\sigma_{152} = \frac{T_{f,152}}{\text{Área}} = 179,92 [MPa]$$

Esfuerzo de diseño perfil 381x140:

$$\sigma_{381} = \frac{T_{f,381}}{\text{Área}} = 126,70 [MPa]$$

Radio:

$$R = 1.000 \text{ mm}$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 152x51:

$$f_{b,152} = 175,19 [MPa]$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 381x140:

$$f_{b,381} = 189,97 [MPa]$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{152} = 179,92 \text{ MPa} < 175,19 \text{ MPa} = f_{b,152} \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\sigma_{381} = 126,7 \text{ MPa} < 189,97 \text{ MPa} = f_{b,381} \quad \text{CUMPLE}$$

Al igual que para la zona superior del túnel, sólo el perfil con corrugación 381x140 mm resiste el esfuerzo de compresión amplificado.

7.3.2.3 Zona inferior o fondo

Por último, se verifica la compresión en el tubo para la zona inferior con su respectivo radio.

Esfuerzo de compresión perfil 152x51:

$$T_{D,152} = 460 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión perfil 381x140:

$$T_{D,381} = 402 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Factor de carga muerta:

$$\alpha_{DL} = 1,25$$

Esfuerzo de compresión amplificado perfil 152x51:

$$T_{f,152} = 575 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión amplificado perfil 381x140: $T_{f_{381}} = 502,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de diseño perfil 152x51: $\sigma_{152} = \frac{T_{f_{152}}}{\text{Área}} = 67,02 \text{ [MPa]}$

Esfuerzo de diseño perfil 381x140: $\sigma_{381} = \frac{T_{f_{381}}}{\text{Área}} = 44,75 \text{ [MPa]}$

Radio: $R = 8.900 \text{ mm}$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 152x51: $f_{b_{152}} = 125,98 \text{ [MPa]}$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 381x140: $f_{b_{381}} = 170,08 \text{ [MPa]}$

Por lo tanto:

$$\sigma_{152} = 67,02 \text{ MPa} < 125,98 \text{ MPa} = f_{b_{152}} \quad \text{CUMPLE}$$

$$\sigma_{381} = 44,75 \text{ MPa} < 170,08 \text{ MPa} = f_{b_{381}} \quad \text{CUMPLE}$$

Para la zona inferior del túnel de recuperación, ambos perfiles de corrugación cumplen con el requerimiento de resistencia para el esfuerzo de compresión.

7.3.3 Resistencia del tubo durante la construcción

Se utilizan los resultados presentados en la sección 6.1 durante la construcción del túnel para ambos perfiles de corrugación y se verifica el cumplimiento de la resistencia para cada una de estas etapas.

7.3.3.1 Etapa 1: 10 capas de suelo

Con 10 capas de suelo colocadas y compactadas se tiene una altura de 2 metros y los esfuerzos de compresión (P) y de momento (M).

Esfuerzo de compresión sin amplificar perfil 152x51: $P_{152} = 71,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión sin amplificar perfil 381x140: $P_{381} = 75,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de resistencia formación eje plástico: $\phi_{hc} = 0,9$

Resistencia a compresión reducida perfil 152x51: $P_{Pf_{152}} = 1.930,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 381x140: $P_{Pf_{381}} = 2.526,75 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de momento sin amplificar perfil 152x51: $M_{152} = 5,77 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de momento sin amplificar perfil 381x140: $M_{381} = 5,702 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico sin reducir perfil 152x51: $M_{P_{152}} = 26,25 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico sin reducir perfil 381x140: $M_{P_{381}} = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 152x51: $M_{Pf_{152}} = 23,625 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 381x140: $M_{Pf_{381}} = 89,019 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Así, el efecto combinado del esfuerzo axial y de momento se calcula como:

$$\left(\frac{P_{152}}{P_{Pf_{152}}} \right)^2 + \left| \frac{M_{152}}{M_{Pf_{152}}} \right| = 0,246 \leq 1 \quad \text{CUMPLE}$$

$$\left(\frac{P_{381}}{P_{Pf_{381}}} \right)^2 + \left| \frac{M_{381}}{M_{Pf_{381}}} \right| = 0,065 \leq 1 \quad \text{CUMPLE}$$

En consecuencia, ambos perfiles de corrugación cumplen con el requerimiento de resistencia para las primeras 10 capas del proceso constructivo.

7.3.3.2 Etapa 2: 20 capas de suelo

Con 20 capas de suelo colocadas y compactadas se tiene una altura de 4 metros, los esfuerzos de compresión (P) y de momento (M) se presentan a continuación.

Esfuerzo de compresión sin amplificar perfil 152x51: $P_{152} = 465 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión sin amplificar perfil 381x140: $P_{381} = 402,59 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de resistencia formación eje plástico: $\phi_{hc} = 0,9$

Resistencia a compresión reducida perfil 152x51: $P_{Pf_{152}} = 1.930,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 381x140: $P_{Pf_{381}} = 2.526,75 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de momento sin amplificar perfil 152x51: $M_{152} = 30,62 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de momento sin amplificar perfil 381x140: $M_{381} = 40,54 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico sin reducir perfil 152x51: $M_{P_{152}} = 26,25 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico sin reducir perfil 381x140: $M_{P_{381}} = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 152x51: $M_{Pf_{152}} = 23,625 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 381x140: $M_{Pf_{381}} = 89,019 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Así, el efecto combinado del esfuerzo axial y de momento se calcula como:

$$\left(\frac{P_{152}}{P_{Pf_{152}}} \right)^2 + \left| \frac{M_{152}}{M_{Pf_{152}}} \right| = 1,354 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\left(\frac{P_{381}}{P_{Pf_{381}}}\right)^2 + \left|\frac{M_{381}}{M_{Pf_{381}}}\right| = 0,481 \leq 1 \quad \text{CUMPLE}$$

El requerimiento de resistencia para 20 capas de suelo se cumple para el tubo de acero con corrugación 381x140 mm satisfactoriamente, no así para el perfil 152x51 mm.

7.3.3.3 Etapa 3: Altura mínima de recubrimiento de suelo

Por último, se verifica la resistencia una vez que se ha alcanzado la altura mínima de recubrimiento de suelo igual a 1,4 metros.

Esfuerzo de compresión sin amplificar perfil 152x51: $P_{152} = 691 \left[\frac{kN}{m}\right]$

Esfuerzo de compresión sin amplificar perfil 381x140: $P_{381} = 571,29 \left[\frac{kN}{m}\right]$

Factor de resistencia formación eje plástico: $\phi_{hc} = 0,9$

Resistencia a compresión reducida perfil 152x51: $P_{Pf_{152}} = 1.930,5 \left[\frac{kN}{m}\right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 381x140: $P_{Pf_{381}} = 2.526,75 \left[\frac{kN}{m}\right]$

Esfuerzo de momento sin amplificar perfil 152x51: $M_{152} = 29 \left[\frac{kNm}{m}\right]$

Esfuerzo de momento sin amplificar perfil 381x140: $M_{381} = 49,301 \left[\frac{kNm}{m}\right]$

Capacidad de momento plástico sin reducir perfil 152x51: $M_{P_{152}} = 26,25 \left[\frac{kNm}{m}\right]$

Capacidad de momento plástico sin reducir perfil 381x140: $M_{P_{381}} = 98,91 \left[\frac{kNm}{m}\right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 152x51: $M_{Pf_{152}} = 23,625 \left[\frac{kNm}{m}\right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 381x140: $M_{Pf_381} = 89,019 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Así, el efecto combinado del esfuerzo axial y de momento se calcula como:

$$\left(\frac{P_{152}}{P_{Pf_152}} \right)^2 + \left| \frac{M_{152}}{M_{Pf_152}} \right| = 1,372 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\left(\frac{P_{381}}{P_{Pf_381}} \right)^2 + \left| \frac{M_{381}}{M_{Pf_381}} \right| = 0,605 \leq 1 \quad \text{CUMPLE}$$

Por lo tanto, el perfil de corrugación 381x140 mm cumple con los requerimientos de resistencia para todas las etapas del proceso constructivo analizadas, mientras que el perfil 152x51 mm sólo cumple el requerimiento para las primeras 10 capas.

7.3.4 Resistencia del tubo para corrugaciones profundas

Se verifica la resistencia del tubo de acero con corrugación 381x140 mm para el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de momento en los puntos críticos. En total son 3 puntos en los cuales se analizan ambos esfuerzos: el punto donde se tiene la mayor compresión, el mayor momento negativo y donde se tiene el mayor momento positivo.

7.3.4.1 Punto 1: Máxima compresión

Se obtienen los esfuerzos de compresión y de momento del análisis del programa, los cuales se presentan en el capítulo 6, y se amplifican por el factor de carga muerta para luego diseñar con estos valores.

Máximo esfuerzo de compresión: $T_D = 1.138,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de momento asociado: $M_D = -11,081 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Factor de carga muerta: $\alpha_{DL} = 1,25$

Máximo esfuerzo de compresión amplificado: $T_f = 1.593,62 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de momento amplificado: $M_f = -15,51 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Factor de resistencia formación eje plástico: $\phi_h = 0,85$

Resistencia a compresión reducida: $P_{Pf} = 2.386,38 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico: $M_P = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido: $M_{Pf} = 84,07 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto, el efecto combinado de ambos esfuerzos se calcula como:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf}} \right| = 0,63 \leq 1 \quad \text{CUMPLE}$$

El requerimiento de resistencia considerando el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de momento se cumple para el punto o zona donde se tiene la máxima compresión.

7.3.4.2 Punto 2: Máximo momento negativo

De la misma manera en que se verifica el efecto combinado en la zona de máxima compresión, se realiza ahora para el punto o zona donde se tiene el mayor momento negativo.

Máximo esfuerzo de momento: $M_D = -68,064 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión asociado: $T_D = 990,735 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de carga muerta:	$\alpha_{DL} = 1,25$
Máximo esfuerzo de momento amplificado:	$M_f = -95,29 \left[\frac{kNm}{m} \right]$
Esfuerzo de compresión amplificado:	$T_f = 1.387,03 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Factor de resistencia formación eje plástico:	$\phi_h = 0,85$
Resistencia a compresión reducida:	$P_{Pf} = 2.386,38 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Capacidad momento plástico:	$M_p = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$
Capacidad de momento plástico reducido:	$M_{Pf} = 84,07 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto, el efecto combinado de ambos esfuerzos se calcula como:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf}} \right| = 1,47 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

El requerimiento de resistencia considerando el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de momento no se cumple para el punto o zona donde se tiene el máximo momento negativo, por lo que se procede a utilizar los perfiles de corrugación 381x140 mm y 400x150 mm de 10 mm de espesor considerando los mismos esfuerzos.

Máximo esfuerzo de momento amplificado:	$M_f = -95,29 \left[\frac{kNm}{m} \right]$
Esfuerzo de compresión amplificado:	$T_f = 1.387,03 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Resistencia a compresión reducida perfil 381x140:	$P_{Pf_{381}} = 2.996,25 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Resistencia a compresión reducida perfil 400x150:	$P_{Pf_{400}} = 2.928,25 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 381x140: $M_{P_{381}} = 124,38 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 400x150: $M_{P_{400}} = 129,41 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido 381x140: $M_{P_{f_{381}}} = 105,725 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 400x150: $M_{P_{f_{400}}} = 109,99 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_{381}}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf_{381}}} \right| = 1,12 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_{400}}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf_{400}}} \right| = 1,09 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

En el punto o zona donde se tiene el valor máximo del momento negativo, tampoco se cumple el requerimiento de resistencia para los perfiles 381x140 mm y 400x150 mm de 10 mm de espesor.

7.3.4.3 Punto 3: Máximo momento positivo

Ahora para la zona con mayor momento positivo se tiene lo siguiente:

Máximo esfuerzo de momento: $M_D = 147,69 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión asociado: $T_D = 920,12 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de carga muerta: $\alpha_{DL} = 1,25$

Máximo esfuerzo de momento amplificado: $M_f = 206,766 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión amplificado: $T_f = 1.288,162 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de resistencia formación eje plástico: $\phi_h = 0,85$

Resistencia a compresión reducida: $P_{Pf} = 2.386,38 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico: $M_P = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido: $M_{Pf} = 84,07 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto, el efecto combinado de ambos esfuerzos se calcula como:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf}} \right| = 2,75 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

Así, para la zona de máximo momento positivo tampoco se cumple el requerimiento de resistencia considerando el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de momento. Análogamente al caso anterior, se utilizan los perfiles de corrugación 381x140 mm y 400x150 mm de 10 mm de espesor.

Máximo esfuerzo de momento amplificado: $M_f = 206,766 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión amplificado: $T_f = 1.288,162 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 381x140: $P_{Pf_{381}} = 2.996,25 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 400x150: $P_{Pf_{400}} = 2.928,25 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 381x140: $M_{P_{381}} = 124,38 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 400x150: $M_{P_{400}} = 129,41 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido 381x140: $M_{Pf_{381}} = 105,725 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 400x150: $M_{Pf_{400}} = 109,99 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_{381}}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf_{381}}} \right| = 2,14 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_{400}}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf_{400}}} \right| = 2,07 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

Al igual que para el caso anterior, no se cumple el requerimiento de resistencia para la zona con máximo momento positivo aun cuando se utilizan perfiles 381x140 mm y 400x150 mm de 10 mm de espesor.

7.3.5 Resistencia de las conexiones

La resistencia longitudinal reducida de las conexiones no debe ser menor al máximo esfuerzo de compresión amplificado.

Factor de resistencia de las conexiones: $\phi_j = 0,7$

Resistencia axial de la conexión longitudinal perfil 152x51: $S_{S_{152}} = 2.660 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia axial de la conexión longitudinal perfil 381x140: $S_{S_{381}} = 2.298 \left[\frac{kN}{m} \right]$

El valor de la resistencia axial para el perfil de corrugación 152x51 mm se obtiene de la figura 2-14 (tabla 6.4b del manual canadiense) que corresponde a 3 pernos de 19 mm de diámetro. Para obtener el valor de la resistencia axial de la conexión longitudinal para el perfil de corrugación 381x140, primero se determina la ecuación de la recta a partir de los 2 últimos valores de la figura 2-15 (tabla 6.4c del manual canadiense). Luego, con la ecuación de la recta se estima la resistencia axial

para la conexión de un tubo de acero corrugado de 8 mm de espesor. Este valor corresponde a 6 pernos por corrugación, con un diámetro de 19 mm.

Máximo esfuerzo de compresión amplificado perfil 152x51: $T_{f_{152}} = 1.543,75 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Máximo esfuerzo de compresión amplificado perfil 381x140: $T_{f_{381}} = 1.422,87 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia de la conexión longitudinal reducida perfil 152x51: $\phi_j \cdot S_{S_{152}} = 1.862 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia de la conexión longitudinal reducida perfil 381x140: $\phi_j \cdot S_{S_{381}} = 1.608 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Por lo tanto, se cumple el requerimiento para la resistencia de las conexiones para ambos perfiles de corrugación:

$$T_{f_{152}} = 1.543,75 \left[\frac{kN}{m} \right] < 1.862 \left[\frac{kN}{m} \right] = \phi_j \cdot S_{S_{152}} \quad \text{CUMPLE}$$

$$T_{f_{381}} = 1.422,87 \left[\frac{kN}{m} \right] < 1.608 \left[\frac{kN}{m} \right] = \phi_j \cdot S_{S_{381}} \quad \text{CUMPLE}$$

7.3.6 Radio de curvatura

Por último se verifica que los radios de la sección transversal del túnel no sean menores a 0,2 veces el radio de la zona superior.

Radio zona superior: $R = 4,2 [m]$

Luego:

$$0,2 \cdot R = 0,84 [m]$$

El radio menor corresponde al radio del costado o riñón del túnel, el cual tiene un valor de 1 metro, por lo que se cumple esta condición.

7.4 Análisis sísmico

En esta sección se presenta el diseño estructural considerando las cargas sísmicas en las sollicitaciones, es decir, se agregan los valores de la sección 6.2 a los esfuerzos de diseño. Se verifican los requerimientos de resistencia para los parámetros más críticos o desfavorables: para la compresión, para el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de momento del tubo con corrugación profunda y para la conexión longitudinal. Al tratarse de una carga eventual, el diseño se realizará considerando los factores de reducción de la resistencia ϕ_i con un valor igual a 1.

7.4.1 Resistencia del tubo a compresión

Análogamente al caso estático, se verifica la resistencia para cada uno de los radios que componen la sección transversal del túnel.

7.4.1.1 Zona superior

Esfuerzo de compresión perfil 152x51: $T_{D_{152}} = 1.235 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión perfil 381x140: $T_{D_{381}} = 1.138,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de carga muerta: $\alpha_{DL} = 1,25$

Aceleración vertical: $A_V = 0,267$

Esfuerzo compresión carga sísmica perfil 152x51: $T_{E_{152}} = 329,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo compresión carga sísmica perfil 381x140: $T_{E_{381}} = 303,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión total perfil 152x51:

$$T_{f_{152}} = \alpha_{DL} \cdot T_{D_{152}} + T_{E_{152}} = 1.873,1 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión total perfil 381x140:

$$T_{f_{381}} = \alpha_{DL} \cdot T_{D_{381}} + T_{E_{381}} = 1726,4 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de diseño perfil 152x51:

$$\sigma_{152} = \frac{T_{f_{152}}}{\text{Área}} = 218,31 [MPa]$$

Esfuerzo de diseño perfil 381x140:

$$\sigma_{381} = \frac{T_{f_{381}}}{\text{Área}} = 155,73 [MPa]$$

Radio:

$$R = 4.200 \text{ mm}$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 152x51:

$$f_{b_{152}} = 120,52 [MPa]$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 381x140:

$$f_{b_{381}} = 177,66 [MPa]$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{152} = 218,31 \text{ MPa} < 120,52 \text{ MPa} = f_{b_{152}} \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\sigma_{381} = 155,73 \text{ MPa} < 177,66 \text{ MPa} = f_{b_{381}} \quad \text{CUMPLE}$$

El perfil de corrugación 152x51 mm no resiste los esfuerzos generados por la acción conjunta del relleno estructural, la pila de acopio y un evento sísmico. Por otro lado, el perfil de acero con corrugación 381x140 mm sí resiste estos esfuerzos.

7.4.1.2 Costado o riñón

Esfuerzo de compresión perfil 152x51:

$$T_{D_{152}} = 1.235 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión perfil 381x140:

$$T_{D_{381}} = 1.138,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Factor de carga muerta:

$$\alpha_{DL} = 1,25$$

Aceleración vertical:

$$A_V = 0,267$$

Esfuerzo compresión carga sísmica perfil 152x51:

$$T_{E_{152}} = 329,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo compresión carga sísmica perfil 381x140:

$$T_{E_{381}} = 303,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión total perfil 152x51:

$$T_{f_{152}} = \alpha_{DL} \cdot T_{D_{152}} + T_{E_{152}} = 1.873,1 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión total perfil 381x140:

$$T_{f_{381}} = \alpha_{DL} \cdot T_{D_{381}} + T_{E_{381}} = 1.726,4 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de diseño perfil 152x51:

$$\sigma_{152} = \frac{T_{f_{152}}}{\text{Área}} = 218,31 [MPa]$$

Esfuerzo de diseño perfil 381x140:

$$\sigma_{381} = \frac{T_{f_{381}}}{\text{Área}} = 153,73 [MPa]$$

Radio:

$$R = 4.200 \text{ mm}$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 152x51:

$$f_{b_{152}} = 218,99 [MPa]$$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 381x140:

$$f_{b_{381}} = 237,46 [MPa]$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{152} = 218,31 \text{ MPa} < 218,99 \text{ MPa} = f_{b_{152}} \quad \text{CUMPLE}$$

$$\sigma_{381} = 153,73 \text{ MPa} < 237,46 \text{ MPa} = f_{b_{381}} \quad \text{CUMPLE}$$

En este caso, ambos perfiles de corrugación resisten los esfuerzos generados por el relleno estructural, la pila de acopio y un evento sísmico para el costado o riñón del túnel de recuperación.

7.4.1.3 Zona inferior o fondo

Esfuerzo de compresión perfil 152x51:

$$T_{D_{152}} = 460 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión perfil 381x140:

$$T_{D_{381}} = 402 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Factor de carga muerta: $\alpha_{DL} = 1,25$

Aceleración vertical: $A_V = 0,267$

Esfuerzo compresión carga sísmica perfil 152x51: $T_{E_{152}} = 122,7 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo compresión carga sísmica perfil 381x140: $T_{E_{381}} = 107,2 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión total perfil 152x51:

$$T_{f_{152}} = \alpha_{DL} \cdot T_{D_{152}} + T_{E_{152}} = 697,7 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión total perfil 381x140:

$$T_{f_{381}} = \alpha_{DL} \cdot T_{D_{381}} + T_{E_{381}} = 609,7 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de diseño perfil 152x51: $\sigma_{152} = \frac{T_{f_{152}}}{Área} = 81,31 [MPa]$

Esfuerzo de diseño perfil 381x140: $\sigma_{381} = \frac{T_{f_{381}}}{Área} = 54,29 [MPa]$

Radio: $R = 4.200 \text{ mm}$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 152x51: $f_{b_{152}} = 157,48 [MPa]$

Esfuerzo de falla a compresión perfil 381x140: $f_{b_{381}} = 212,6 [MPa]$

Por lo tanto:

$$\sigma_{152} = 81,31 \text{ MPa} < 157,48 \text{ MPa} = f_{b_{152}} \quad \text{CUMPLE}$$

$$\sigma_{381} = 54,29 \text{ MPa} < 212,6 \text{ MPa} = f_{b_{381}} \quad \text{CUMPLE}$$

Al igual que para el costado del túnel de recuperación, ambos perfiles de corrugación resisten los esfuerzos generados en la zona inferior del túnel debido al relleno estructural, la pila de acopio y un evento sísmico.

7.4.2 Resistencia del tubo para corrugaciones profundas

Se agregan las solicitaciones sísmicas a los esfuerzos de compresión y de momento estáticos y se evalúa la resistencia considerando el efecto combinado de estos esfuerzos, para los mismos puntos o zonas críticas.

7.4.2.1 Punto 1: Máxima compresión

Máximo esfuerzo de compresión:	$T_D = 1.138,3 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Esfuerzo de momento asociado:	$M_D = -11,08 \left[\frac{kNm}{m} \right]$
Factor de carga muerta:	$\alpha_{DL} = 1,25$
Aceleración vertical:	$A_V = 0.267$
Esfuerzo compresión carga sísmica:	$T_E = 303,55 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Esfuerzo de compresión total:	$T_f = 1.726,4 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Esfuerzo de momento carga sísmica:	$M_E = -2,95 \left[\frac{kNm}{m} \right]$
Esfuerzo de momento total:	$M_f = -16,81 \left[\frac{kNm}{m} \right]$
Factor de resistencia formación eje plástico:	$\phi_h = 1$
Resistencia a compresión:	$P_{Pf} = 2.807,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$
Capacidad momento plástico:	$M_p = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido:

$$M_{Pf} = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$$

Por lo tanto, el efecto combinado de ambos esfuerzos se calcula como:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf}} \right| = 0,55 \leq 1$$

El requerimiento de resistencia considerando las cargas sísmicas para el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de momento se cumple para el punto o zona del tubo, con corrugación 381x140 mm, donde se tiene la máxima compresión.

7.4.2.2 Punto 2: Máximo momento negativo

Máximo esfuerzo de momento:

$$M_D = -68,064 \left[\frac{kNm}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión asociado:

$$T_D = 990,735 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Factor de carga muerta:

$$\alpha_{DL} = 1,25$$

Aceleración vertical:

$$A_V = 0.267$$

Esfuerzo compresión carga sísmica:

$$T_E = 264,196 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de compresión total:

$$T_f = 1.502,6 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Esfuerzo de momento carga sísmica:

$$M_E = -18,15 \left[\frac{kNm}{m} \right]$$

Esfuerzo de momento total:

$$M_f = -103,23 \left[\frac{kNm}{m} \right]$$

Factor de resistencia formación eje plástico:

$$\phi_h = 1$$

Resistencia a compresión: $P_{Pf} = 2.807,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico: $M_P = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido: $M_{Pf} = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto, el efecto combinado de ambos esfuerzos se calcula como:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf}} \right| = 1,33 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

El requerimiento de resistencia para el efecto combinado del esfuerzo axial y de momento, considerando las cargas sísmicas, no se cumple en la zona donde se tiene el máximo momento negativo. Nuevamente, se utilizan los perfiles de corrugación 381x140 mm y 400x150 mm de 10 mm de espesor considerando los mismos esfuerzos para el requerimiento de la resistencia.

Esfuerzo de compresión total: $T_f = 1.502,6 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de momento total: $M_f = -103,23 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 381x140: $P_{Pf_{381}} = 3.525 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 400x150: $P_{Pf_{400}} = 3.445 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 381x140: $M_{P_{381}} = 124,38 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 400x150: $M_{P_{400}} = 129,41 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido 381x140: $M_{Pf_{381}} = 124,38 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 400x150: $M_{Pf_400} = 129,41 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_381}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf_381}} \right| = 1,01 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_400}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf_400}} \right| = 0,98 \leq 1 \quad \text{CUMPLE}$$

Al considerar las cargas sísmicas, el perfil de corrugación 400x150 mm de 10 mm de espesor sí resiste el efecto combinado del esfuerzo axial y de momento en la zona de máximo momento negativo.

7.4.2.3 Punto 3: Máximo momento positivo

Máximo esfuerzo de momento: $M_D = 147,69 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión asociado: $T_D = 920,116 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Factor de carga muerta: $\alpha_{DL} = 1,25$

Aceleración vertical: $A_V = 0.267$

Esfuerzo compresión carga sísmica: $T_E = 245,36 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de compresión total: $T_f = 1395,51 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de momento carga sísmica: $M_E = 39,38 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Esfuerzo de momento total: $M_f = 223,99 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Factor de resistencia formación eje plástico: $\phi_h = 1$

Resistencia a compresión: $P_{Pf} = 2.807,5 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico: $M_P = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido: $M_{Pf} = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto, el efecto combinado de ambos esfuerzos se calcula como:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf}} \right)^2 + \left| \frac{M_f}{M_{Pf}} \right| = 2,51 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

En consecuencia, para la zona de máximo momento positivo tampoco se cumple el requerimiento de resistencia considerando las cargas sísmicas para el efecto combinado de los esfuerzos de compresión y de momento. Para los perfiles de corrugación 381x140 mm y 400x150 mm de 10 mm de espesor se tiene lo siguiente:

Esfuerzo de compresión total: $T_f = 1.395,51 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Esfuerzo de momento total: $M_f = -223,99 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 381x140: $P_{Pf_{381}} = 3.525 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Resistencia a compresión reducida perfil 400x150: $P_{Pf_{400}} = 3.445 \left[\frac{kN}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 381x140: $M_{P_{381}} = 124,38 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad momento plástico perfil 400x150: $M_{P_{400}} = 129,41 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido 381x140: $M_{Pf_{381}} = 124,38 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Capacidad de momento plástico reducido perfil 400x150: $M_{Pf_{400}} = 129,41 \left[\frac{kNm}{m} \right]$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_{381}}}\right)^2 + \left|\frac{M_f}{M_{Pf_{381}}}\right| = 1,96 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

$$\left(\frac{T_f}{P_{Pf_{400}}}\right)^2 + \left|\frac{M_f}{M_{Pf_{400}}}\right| = 1,89 \leq 1 \quad \text{NO CUMPLE}$$

En el caso de la zona de máximo momento positivo, ninguno de los 2 perfiles resiste el efecto combinado del esfuerzo axial y de momento.

7.4.3 Resistencia de las conexiones

De la misma forma que para el caso estático, la resistencia longitudinal de las conexiones no debe ser menor al máximo esfuerzo de compresión amplificado, donde la resistencia no es reducida ya que el sismo corresponde a una carga eventual.

Factor de resistencia de las conexiones: $\phi_j = 1$

Resistencia axial de la conexión longitudinal perfil 152x51: $S_{S_{152}} = 2.660 \left[\frac{kN}{m}\right]$

Resistencia axial de la conexión longitudinal perfil 381x140: $S_{S_{381}} = 2.298 \left[\frac{kN}{m}\right]$

El valor de la resistencia axial de la conexión longitudinal es igual al utilizado en el diseño de la conexión longitudinal para el caso estático.

Máximo esfuerzo de compresión amplificado perfil 152x51: $T_{f_{152}} = 1.873,1 \left[\frac{kN}{m}\right]$

Máximo esfuerzo de compresión amplificado perfil 381x140: $T_{f_{381}} = 1.726,4 \left[\frac{kN}{m}\right]$

Por lo tanto, para ambos perfiles de corrugación se cumple el requerimiento para la resistencia de las conexiones:

$$T_{f_{152}} = 1.873,1 \left[\frac{kN}{m} \right] < 2.660 \left[\frac{kN}{m} \right] = \phi_j \cdot S_{S_{152}} \quad \text{CUMPLE}$$

$$T_{f_{381}} = 1.726,4 \left[\frac{kN}{m} \right] < 2.298 \left[\frac{kN}{m} \right] = \phi_j \cdot S_{S_{381}} \quad \text{CUMPLE}$$

7.5 Refuerzo túnel con bocas de alimentación

Tal como se detalla en la sección 5.3.4 “Metodología de mediciones”, se realiza una comparación para las zonas cercanas a las bocas de alimentación entre los esfuerzos del túnel sin las bocas y el túnel con las bocas. A partir de los resultados presentados en las tablas de la sección 6.3 “Esfuerzos del túnel con bocas de alimentación” del capítulo “Resultados”, se observa un claro aumento de los esfuerzos en las zonas cercanas a las bocas de alimentación para los perfiles de corrugación analizados.

En particular, para los esfuerzos de compresión, tanto en la dirección transversal como en la dirección longitudinal, se experimenta un aumento considerable (mayor al doble) para la mayoría de las zonas estudiadas. También se observa un aumento en los esfuerzos de momento y de corte para la dirección transversal. Por último, si bien los esfuerzos de momento y de corte en la dirección longitudinal presentan un incremento bastante elevado con la presencia de las bocas de alimentación, estos esfuerzos representan un porcentaje muy bajo en relación a los esfuerzos en la dirección transversal (ninguno supera el 5%).

A partir de los resultados obtenidos al realizar la comparación de los esfuerzos para cada perfil de corrugación, resulta necesario colocar refuerzos en los bordes de las bocas de alimentación para resistir este incremento de los esfuerzos. Sin embargo, para efectos de este trabajo de título no se diseñará el tipo de refuerzo para las bocas de alimentación ya que sólo se busca analizar la factibilidad técnica del uso de los tubos de acero corrugado para los túneles de recuperación, sin entrar en mayor detalle.

Para poder realizar un análisis de costos de la propuesta, se considera como refuerzo una viga de acero de 250 [kg/ml], valor estándar para este tipo de estructuras.

7.6 Análisis de costos

Finalmente, se presenta el análisis de costos con el fin de determinar si esta propuesta para túneles de recuperación con tubo de acero corrugado resulta económicamente factible en comparación con el diseño tradicional de hormigón armado. El costo directo de cada material se obtiene a partir de la información del mercado, en cuanto al costo total instalado, que incluye el costo del material, transporte y montaje, se estima multiplicando el costo directo por un factor de 2,5 para cada material, excepto para el hormigón armado y el acero estructural.

A modo de resumen, en las tablas 7-1 y 7-2 se presenta la cantidad y los costos de cada material para el diseño de túnel de recuperación con hormigón armado y con tubo de acero corrugado, respectivamente.

Tabla 7-1. Cantidad y costo de cada material para diseño de túnel con hormigón armado

Material	Cantidad [Unidad]	Costo Directo [US\$/unidad]	Costo Instalado [US\$/unidad]
Hormigón armado	3.743,4 [m ³]	1.250	2.000
Relleno estructural	9.239,25 [m ³]	25	62,5

Tabla 7-2. Cantidad y costo de cada material para diseño de túnel con tubo de acero corrugado

Material	Cantidad [Unidad]	Costo Directo [US\$/unidad]	Costo Instalado [US\$/unidad]
Tubo de acero corrugado	155,33 [ton]	5.000	12.500
Relleno estructural	7.376,25 [m ³]	25	62,5
Arena	594,05 [m ³]	30	75
Radier de hormigón	110,10 [m ³]	1.250	2.000
Junta de aislamiento	88 [unid]	51	127
Acero de refuerzo estructural	34,70 [ton]	6.550	10.500

A partir de la figura 7-1 se determina la cantidad de los materiales utilizados para obtener el costo del diseño de túnel con hormigón armado. El costo directo y el costo total instalado para cada material se encuentran detallados en las tablas 7-3 y 7-4.

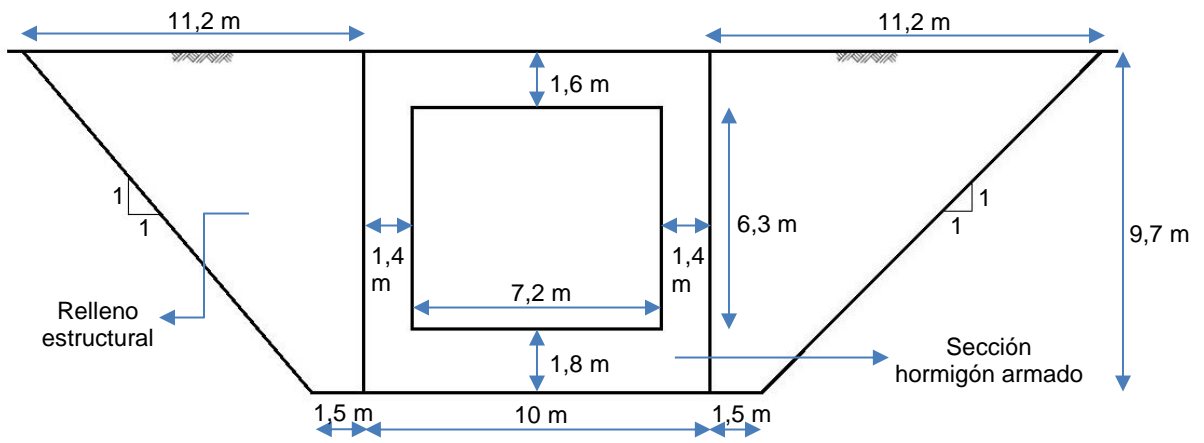


Figura 7-1. Sección transversal túnel de hormigón armado para el cálculo de costos. Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-3. Costo hormigón armado. Diseño de túnel con hormigón armado

Área sección transversal [m ² /ml]	51,64
Longitud [m]	75
Volumen bocas de alimentación [m ³]	129,6
Volumen hormigón armado [m ³]	3.743,4
Costo directo hormigón armado [US\$/m ³]	1.250
Costo hormigón armado	US\$ 4.679.250
Costo total instalado hormigón armado	US\$ 7.486.800

Tabla 7-4. Costo relleno estructural. Diseño de túnel con hormigón armado

Longitud [m]	75
Volumen relleno estructural [m ³]	9.239,25
Costo directo relleno estructural [US\$/m ³]	25
Costo relleno estructural	US\$ 230.981
Costo total instalado relleno estructural	US\$ 577.453

En la tabla 7-5 se presenta el costo total del diseño del túnel con hormigón armado, el cual corresponde a la suma de los costos presentados anteriormente.

Tabla 7-5. Costo total diseño de túnel de recuperación con hormigón armado

Costo total hormigón armado	US\$ 7.486.800
Costo total relleno estructural	US\$ 577.453
Costo total diseño hormigón armado	US\$ 8.064.253

Análogamente, a partir de la figura 7-2 se determina la cantidad de los materiales utilizados para obtener el costo del diseño de túnel con tubo de acero corrugado. Cabe mencionar que para efectos del cálculo de costos, se utiliza esta geometría para el túnel de recuperación debido a que respeta de mejor manera el espacio interior del túnel con respecto al diseño de hormigón armado.

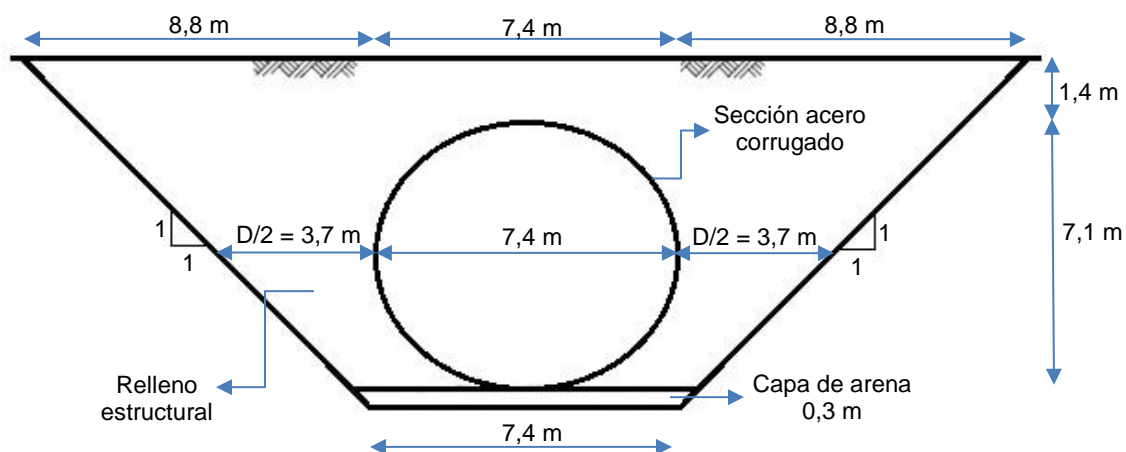


Figura 7-2. Sección transversal túnel de acero corrugado para el cálculo de costos. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7-6 se presentan las propiedades del tubo utilizadas para calcular el costo total del tubo de acero corrugado. La longitud corresponde a 120 metros ya que en la sección donde se encuentran las bocas de alimentación se considera una mayor cantidad de acero corrugado debido a la implementación de costillas o refuerzos (ver figura 7-3) para resistir el peso del chute que se encuentra apoyado en esta zona.

Tabla 7-6. Costo tubo de acero corrugado

Área sección transversal [m ² /m]	0,01123
Perímetro sección transversal [m]	23,49
Longitud [m]	120
Densidad del acero [ton/m ³]	7,85
Volumen de acero [m ³]	31,66
Toneladas de acero [ton]	248,54
Costo directo tubo de acero corrugado [US\$/ton]	5.000
Costo tubo de acero corrugado	US\$ 1.242.675
Costo total instalado tubo de acero corrugado	US\$ 3.479.491

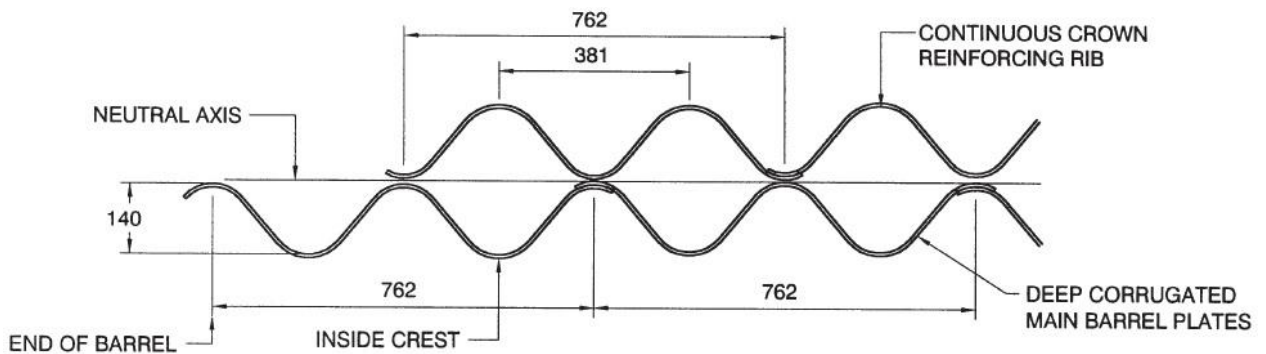


Figura 7-3. Refuerzo o costilla para tubos de acero corrugado. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)

En la tabla 7-2 se presentan las propiedades consideradas para calcular el costo de los refuerzos en las bocas de alimentación.

Tabla 7-7. Costo vigas de refuerzo

Longitud refuerzo boca [m]	144
Peso vigas de refuerzo [Kg/m]	250
Peso total vigas de refuerzo [ton]	36
Costo directo acero estructural [US\$/ton]	6.550
Costo vigas de refuerzo	US\$ 235.800
Costo total instalado vigas de refuerzo	US\$ 378.000

Además, se considera una estructura metálica ubicada al interior del túnel de recuperación cuya función es soportar el peso de la plataforma y de la correa transportadora, las cuales, en el caso del diseño con hormigón armado, se encuentran ancladas a la estructura de hormigón. En la tabla 7-8 se presenta el cálculo del costo asociado a esta estructura metálica.

Tabla 7-8. Costo estructura metálica

Columnas de refuerzo por boca de alimentación	8
Total columnas de refuerzo	24
Longitud columnas de refuerzo [m]	126,24
Longitud vigas de refuerzo [m]	145,33
Peso acero de refuerzo [Kg/m]	300
Peso total acero de refuerzo [ton]	81,471
Costo directo acero estructural [US\$/ton]	6.550
Costo acero de refuerzo	US\$ 533.633
Costo total instalado acero de refuerzo	US\$ 855.442

Luego, se incluye en el análisis de costos el relleno estructural necesario para el diseño con tubos de acero corrugado. En la tabla 7-9 se presenta el costo del relleno estructural determinado a partir de la figura 7-2.

Tabla 7-9. Costo relleno estructural

Longitud [m]	75
Volumen relleno estructural [m ³]	7.332
Costo directo relleno estructural [US\$/m ³]	25
Costo relleno estructural	US\$ 183.309
Costo total instalado relleno estructural	US\$ 513.266

A partir de la figura 7-2 se calcula la cantidad de arena necesaria para el diseño con tubo de acero corrugado, para luego determinar el costo asociado.

Tabla 7-10. Costo arena

Longitud [m]	75
Volumen arena [m ³]	340
Costo directo arena [US\$/m ³]	30
Costo arena	US\$ 10.193
Costo total instalado arena	US\$ 25.481

Por último, en la tabla 7-11 se presenta el costo total del relleno interior del túnel de recuperación con tubo de acero corrugado, el cual es necesario ya que permite la operación al interior del túnel. El relleno interior del túnel incluye el relleno de fondo de un material no granular, el radier de hormigón ubicado sobre el relleno de fondo y un material flexible que trabaja como junta de aislamiento para minimizar la transferencia de carga horizontal desde el radier al tubo de acero corrugado.

Tabla 7-11. Costo relleno interior

Volumen relleno de fondo [m ³]	416,3
Costo directo relleno de fondo [US\$/m ³]	30
Volumen radier interior [m ³]	110
Costo directo hormigón armado [US\$/m ³]	1.250
Junta de aislamiento [unid.]	88
Costo directo junta de aislamiento [US\$/unid.]	127
Costo relleno interior	US\$ 161.302
Costo total instalado relleno interior	US\$ 266.354

Así, se obtiene el costo total de la propuesta para túneles de recuperación con tubos de acero corrugado.

Tabla 7-12. Costo total diseño túnel de recuperación con tubos de acero corrugado

Costo total tubo de acero corrugado	US\$ 3.479.491
Costo total acero de refuerzo	US\$ 1.233.442
Costo total relleno estructural	US\$ 513.266
Costo total arena	US\$ 25.481
Costo total relleno interior	US\$ 266.354
Costo total diseño con tubo de acero corrugado	US\$ 5.518.034

En la tabla 7-13 se presenta la comparación económica entre la propuesta del túnel utilizando tubos de acero corrugado y el diseño tradicional con hormigón armado.

Tabla 7-13. Comparación de diseños para túnel de recuperación

	Tubo de acero corrugado	Hormigón armado con forma rectangular
Costo total	US\$ 5.518.034	US\$ 8.064.253

Por lo tanto, se tiene que el diseño para túneles de recuperación con tubo de acero corrugado resulta ser una alternativa más económica que el diseño tradicional con hormigón armado. El costo total del diseño con tubo de acero corrugado corresponde aproximadamente al 68% del costo total del diseño con hormigón armado.

8. Comentarios y conclusiones

El principal objetivo de este trabajo de título se cumple satisfactoriamente, utilizando el programa de análisis de interacción suelo-estructura FLAC3D, se realiza un análisis de factibilidad técnica para el uso de tubos de acero corrugado en túneles de recuperación bajo la clave de una pila de acopio de 50 metros de altura. El análisis considera el procedimiento de diseño estructural detallado en el capítulo 6 del manual canadiense *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction*.

Además, como se explica a continuación, se determina parcialmente la aplicabilidad de los tubos de acero corrugado en túneles de recuperación debido a que los requerimientos de diseño para la resistencia y las deformaciones no se cumplen en todas las secciones del túnel del modelo analizado. Sin embargo, se aporta información relevante para futuros diseños de túneles de recuperación con tubo de acero corrugado.

8.1 Estudio de las cargas estáticas y dinámicas

El correcto estudio de las cargas que actúan sobre cualquier tipo de estructura resulta fundamental para lograr un diseño adecuado, en particular, para los túneles de recuperación la carga que controla el diseño es aquella generada por la pila de acopio, por lo que es muy importante considerarla correctamente. Según lo estudiado en la literatura, la diferencia entre considerar correctamente esta carga y considerar un perfil hidrostático de presiones puede llegar a ser de un 60% en la zona central de la pila. Si bien, durante el desarrollo de este trabajo no fue necesario agregar esta carga de manera explícita (FLAC3D permite modelar la pila de acopio como suelo), el considerar de manera correcta la distribución de presiones bajo la pila de acopio fue de gran utilidad al momento de interpretar los resultados entregados por el programa.

Las cargas generadas por un evento sísmico se consideraron por separado a las cargas estáticas y según lo estipulado en el manual canadiense para tubos de acero corrugado *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction* se agregan como un factor por las cargas estáticas, el cual depende de la aceleración horizontal del suelo donde se ubique la estructura. Al utilizar el método detallado en el manual canadiense las solicitaciones considerando estas cargas sísmicas no aumentan considerablemente con respecto a las solicitaciones estáticas.

8.2 Comparación de resultados con diseño de hormigón armado

La principal diferencia con respecto a los diseños de hormigón armado con forma de arco y rectangular estudiados en el año 2017 por Nicolás Alvarado et al. en su memoria para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile “Análisis comparativo de túnel de recuperación minero en forma rectangular y de arco”, consiste en que el diseño con tubo de acero corrugado presenta esfuerzos axiales y de momento de gran magnitud, no así para el esfuerzo de corte, lo cual ocurre en todas las secciones del túnel. Esto se debe a la geometría con forma de bóveda y la flexibilidad que presenta el diseño con tubo de acero corrugado, que permite que las cargas se transmitan como esfuerzos axiales principalmente, y de momento en el caso de corrugación profundas. Además, se tiene una diferencia considerable entre los esfuerzos del perfil de corrugación 152x51 mm y el perfil 381x140 mm, el primero presenta un esfuerzo de compresión mayor al segundo en un 8% aproximadamente, en tanto que el esfuerzo de momento aumenta en torno a un 166% en el perfil 381x140 mm debido a la corrugación profunda que le otorga una mayor rigidez

En el diseño de hormigón armado, para el caso con forma rectangular se generan esfuerzos de momento y de corte de gran magnitud en la losa superior e inferior principalmente, mientras que el esfuerzo axial se concentra en las paredes del túnel tanto para la forma rectangular como la forma de arco. Para el diseño con forma de arco los esfuerzos de momento y de corte son significativamente menores en la losa superior (forma de arco) con respecto al diseño con forma rectangular, sin embargo, se generan grandes esfuerzos de momento y de corte en la base del túnel, incluso mayores a los esfuerzos para el túnel rectangular.

8.3 Análisis de la propuesta

Por un lado, esta propuesta utilizando tubo de acero corrugado presenta la ventaja constructiva de que al no necesitar grandes cantidades de material, como ocurre en el diseño tradicional de hormigón armado independiente de la forma que tenga el túnel, el proceso de instalación es más simple y mucho más rápido.

Por otro lado, para el diseño con tubo de acero corrugado debe respetarse el proceso constructivo de manera estricta, este proceso es de suma importancia ya que le entrega la resistencia y la rigidez necesaria al sistema suelo-estructura, por lo que el construirlo de manera incorrecta podría provocar el colapso del túnel. El proceso constructivo consiste en la colocación y compactación de las capas de suelo a ambos lados del túnel al mismo tiempo, hasta alcanzar la altura mínima de recubrimiento de suelo.

En cuanto a la factibilidad técnica, no es posible determinar la aplicabilidad del tubo de acero corrugado en toda la longitud del túnel de recuperación debido a que no se cumplen todos los requerimientos de resistencia en el tramo del túnel que se encuentra bajo la clave de la pila de acopio o *stock pile*. En la tabla 8-1 se presenta un resumen de los requerimientos de resistencia para el diseño del tubo de acero corrugado a partir de los resultados obtenidos.

Tabla 8-1. Requerimientos de resistencia para el diseño del tubo de acero corrugado

Requerimiento de resistencia	Perfil de corrugación 152x51 mm	Perfil de corrugación 381x140 mm
Resistencia a la compresión	No cumple	Cumple
Formación eje plástico durante construcción	No cumple	Cumple
Efecto combinado para corrugaciones profundas	-	No cumple
Resistencia de la conexión longitudinal	Cumple	Cumple

En su mayoría, los requerimientos de resistencia no se cumplen para el perfil de corrugación 152x51 mm de 8 mm de espesor, por lo que sería necesario utilizar un perfil con corrugación profunda. Si bien, para el perfil con corrugación profunda 381x140 mm de 8 mm de espesor tampoco se cumplen en su totalidad los requerimientos de resistencia, aun si se aumenta el espesor del tubo o se cambia a una corrugación 400x150 mm de 10 mm de espesor, a partir del análisis es posible establecer que sólo una sección del túnel no resiste las sollicitaciones en el tramo bajo la pila de acopio, la cual corresponde al riñón o costado del tubo de acero corrugado al considerar el efecto combinado del esfuerzo axial y de momento.

Luego, en las tablas 8-2 y 8-3 se presenta de manera resumida el cumplimiento de la deformación vertical y horizontal respectivamente, con respecto a la deformación admisible para ambos perfiles de corrugación durante el proceso constructivo. Cabe destacar que las deformaciones corresponden al tramo del túnel más desfavorable, es decir, bajo la clave de la pila de acopio.

Tabla 8-2. Deformación vertical para el diseño del tubo de acero corrugado

Etapa constructiva	Perfil de corrugación 152x51 mm	Perfil de corrugación 381x140 mm
10 capas de relleno estructural	Cumple	Cumple
20 capas de relleno estructural	No cumple (364% mayor)	Cumple
Altura mínima	No cumple (281% mayor)	Cumple
Pila de acopio	No cumple (281% mayor)	No cumple (180% mayor)

Tabla 8-3. Deformación horizontal para el diseño del tubo de acero corrugado

Etapa constructiva	Perfil de corrugación 152x51 mm	Perfil de corrugación 381x140 mm
10 capas de relleno estructural	Cumple	Cumple
20 capas de relleno estructural	No cumple (24% mayor)	Cumple
Altura mínima	No cumple (15% mayor)	Cumple
Pila de acopio	No cumple (15% mayor)	Cumple

La deformación vertical del tubo de acero con corrugación 152x51 mm durante el proceso constructivo supera a la deformación admisible para tubos de acero corrugado considerablemente, lo cual prácticamente se mantiene al agregar la pila de acopio y las bocas de alimentación. La deformación horizontal del tubo con el mismo perfil de corrugación excede en un 24% a la deformación admisible durante el proceso constructivo, para luego disminuir a un 15% por sobre la deformación máxima permitida al agregar la pila y las bocas de alimentación. Esto reafirma que el diseño de túnel de recuperación con perfil de corrugación 152x51 mm no es técnicamente factible para un sistema con estas características. Por su parte, el tubo con corrugación 381x140 mm presenta una deformación horizontal que no supera el 50% de la deformación admisible en ningún momento del análisis. Sin embargo, la deformación vertical del túnel con corrugación 381x140 mm excede en un 180% la deformación máxima permitida al agregar la pila de acopio.

Por último, a partir del análisis de costos se confirma que el diseño de túnel de recuperación con tubo de acero corrugado es una alternativa más económica, la cual representa aproximadamente un 68% del costo total estimado para el diseño de hormigón armado.

Tabla 8-4. Comparación de diseños para túnel de recuperación

	Tubo de acero corrugado	Hormigón armado con forma rectangular
Costo total	US\$ 5.518.034	US\$ 8.064.253

Considerando los antecedentes expuestos, esta propuesta con acero corrugado requiere un análisis más exhaustivo ya que no se cumplen todos los parámetros técnicos para asegurar un diseño eficiente y seguro. Se puede optar por un diseño combinado de hormigón armado para el tramo del túnel que se encuentra bajo la clave de 50 metros de la pila de acopio y para el resto de los tramos utilizar tubo de acero corrugado. O bien, agregar un perfil de acero corrugado al ya existente perfil 381x140 mm de 8 mm de espesor como refuerzo o costilla (ver figura 8-1) en las secciones donde no se cumplan los requerimientos de resistencia y de deformación. En ambos casos se genera un cambio en la resistencia y la rigidez de la sección, por lo que antes de materializarse, se debe realizar un nuevo análisis de factibilidad técnica debido a una posible redistribución de los esfuerzos internos y una comparación económica considerando estas modificaciones en el modelo.

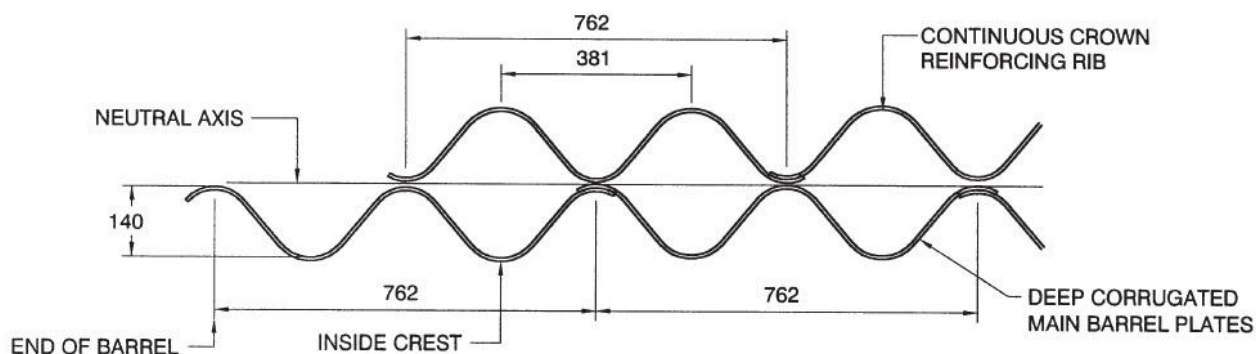


Figura 8-1. Refuerzo o costilla para tubos de acero corrugado. Fuente: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (2007)

La motivación para seguir estudiando el diseño de túneles de recuperación con tubo de acero corrugado es la disminución en el tiempo de construcción y la utilización de una menor cantidad de materiales lo que conlleva a una disminución en los costos para este tipo de estructuras, ya que, si bien se realiza un análisis aproximado de los costos totales, estos corresponden aproximadamente al 68% del costo total estimado para el diseño de hormigón armado.

A modo de recomendación, resulta de gran interés analizar la factibilidad técnica y económica del modelo con tubo de acero corrugado considerando la sección utilizada para el análisis de costos, la cual, además de respetar de mejor manera el espacio interior del túnel de recuperación, presenta una geometría más circular y un valor de luz igual a la sección analizada en FLAC3D, por lo que se espera que el esfuerzo de momento que se genera en los riñones o costados de la sección abovedada sea significativamente menor. De esta forma, se podrían cumplir los requerimientos de resistencia y deformación para el diseño estructural del modelo con dicha sección.

8.4 Consideraciones a tener en cuenta

En cuanto a la modelación del sistema se tienen varias consideraciones asociadas al uso del programa de análisis FLAC3D. Entre ellas se puede mencionar la forma elegida para representar la descarga del material al interior del túnel a través de las bocas de alimentación (detallada en la sección 5.3.2), la cual corresponde a la manera más idónea teniendo en cuenta la información y la experiencia que se tenía al momento de desarrollar este trabajo.

Además, el tamaño y número de las zonas utilizadas para representar los distintos materiales granulares (suelo de fundación, relleno estructural y pila de acopio) podría no ser el adecuado para obtener el nivel de precisión requerido para este tipo de estructuras. El criterio utilizado para determinar el tamaño y el número de zonas consiste en tener una mayor precisión en las zonas de interés cercanas al túnel de recuperación sin afectar la estabilidad numérica del programa de análisis, esto afecta directamente el tiempo de análisis empleado por el programa. Para determinar si se utiliza un adecuado criterio para el tamaño y número de zonas, se podría analizar el modelo para distintas configuraciones y estudiar las variaciones que se producen.

Por último, las eventuales cargas debido a un evento sísmico fueron consideradas de manera simple según lo estipulado en el manual canadiense, como un factor por las cargas estáticas que luego fueron agregadas a estas últimas. Esta consideración podría no ser del todo correcta ya que no se tiene normativa vigente ni mayor información sobre cómo modelar el sismo o sobre los efectos que tienen los sismos en este tipo de estructuras enterradas.

Bibliografía

- Brockbank, R., Huntley, J. & Ball, R. (1997). Contact Force Distribution Beneath a Three-Dimensional Granular Pile. *Journal de Physique II*, pp. 1521-1532.
- McBride, W. (2006). Base Pressure Measurements under a Scale Model Stockpile. *Particulate Science and Technology*, pp. 59-70.
- Ooi, J., Ai, J., Zhong, Z., Chen, J. & Rotter, J. (2008). Progressive pressure measurements beneath a granular pile with and without base deflection. *Structures and Granular Solids: Dorm Scientific Principles to Engineering Application*, pp. 87-92.
- Conley, H. (2012). *Presiones en la base de un stockpile*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles.
- Alvarado, N., Parra, E., Canteros, C. & Pinochet, H. (2017). *Análisis comparativo de túnel de recuperación minero en forma rectangular y de arco*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Schmitz, E., Cordova, S. & Baeza, M. (2001). *Recomendaciones para el análisis y diseño de tuberías de acero corrugado*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- AASHTOO. (2014). *LRFD Bridge Design Specifications* (Séptima ed.).
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). *NCh 2369.Of2003 – Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas. (2002). *Manual de Carreteras*. Dirección de vialidad.
- Corrugated Steel Pipe Institute. (2007). *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction*, Canadian Edition.
- Itasca Consulting Group Inc. (2012). *Manual FLAC3D version 5.0*.
- Parra, E. & Pinochet, H. (2017). *Conversaciones privadas*. Santiago, Chile.
- Minería Chilena. (2017, 13 marzo). Participación de Chile en mercado mundial del cobre cae 8,4 puntos en una década. Recuperado de <http://www.mch.cl/2017/03/13/participacion-chile-mercado-mundial-del-cobre-cae-84-puntos-una-decada/>

Minería chilena. (2018, 5 febrero). Tributación minera repunta en 2017, pero se ubica como el segundo peor año desde 2006. Recuperado de

<http://www.mch.cl/2018/02/05/tributacion-minera-repunta-2017-se-ubica-segundo-peor-ano-desde-2006/>

Comisión Chilena del Cobre. (s.f.). [Estadísticas de la minería chilena]. Recuperado 23 marzo, 2018, de <http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/>

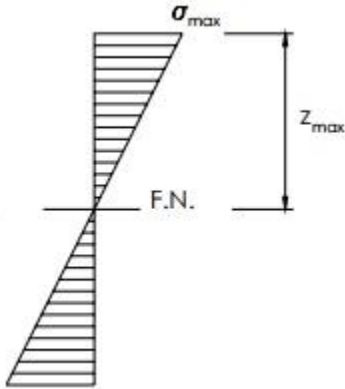
Comisión Chilena del Cobre. (2017). *Inversión en la minería chilena – Cartera de proyectos 2017-2026*. Recuperado de

<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2017%2008%2010%20Cartera%20de%20proyectos%202017%20-%202026%20vf.pdf>

Anexo A. Cálculo momento plástico M_p

A1. Cálculo de momento plástico M_p tubo de acero corrugado 152x51 mm de 7 mm de espesor

El momento plástico se calcula considerando una sección compacta, luego:



$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} \rightarrow M_p = \sigma_y \cdot W$$

$$W = \frac{I}{z_{max}}$$

Dónde:

M_p : Momento plástico [kNm/m].

σ_y : Límite de fluencia del acero [MPa].

W : Módulo resistente elástico [mm³/mm].

I : Momento de inercia [mm⁴/mm].

z_{max} : Distancia a la fibra más alejada [mm].

Se calcula el módulo resistente elástico:

$$W = \frac{I}{z_{max}} = \frac{2.672 \left[\frac{mm^4}{mm} \right]}{\frac{50,9}{2} [mm]} = 104,99 \left[\frac{mm^3}{mm} \right]$$

Así, el momento plástico:

$$M_p = \sigma_y \cdot W = 250 [MPa] \cdot 104,99 \left[\frac{mm^3}{mm} \right] = 26,25 \left[\frac{kNm}{m} \right]$$

A2. Cálculo de momento plástico M_P tubo de acero corrugado 381x140 mm de 8 mm de espesor

Se obtiene el momento plástico análogamente al tubo de acero con corrugación 152x51mm:

$$W = \frac{I}{z_{max}} = \frac{27.695 \left[\frac{mm^4}{mm} \right]}{\frac{140}{2} [mm]} = 395,64 \left[\frac{mm^3}{mm} \right]$$

Luego:

$$M_P = \sigma_y \cdot W = 250 [MPa] \cdot 395,64 \left[\frac{mm^3}{mm} \right] = 98,91 \left[\frac{kNm}{m} \right]$$

Anexo B. Equipo de compactación

Propiedades Vibrocompactador o Placa compactadora

Marca: Alfamaq
Modelo:HCR80-N

Peso: 98 Kg

Fuerza De Impacto: 10 KN

Altura Del Salto: 6.5 Cm

Velocidad de giro: 4.000 Rpm

Velocidad de Viaje: 15 m/min

Ruido 60 Dba

Tamaño del plato: 33 x 29 cm



Figura 0-1. Equipo utilizado para la compactación del relleno estructural en la modelación del proceso constructivo

Anexo C. Resultados modelo FLAC3D

C1. Diagramas de máximos esfuerzos

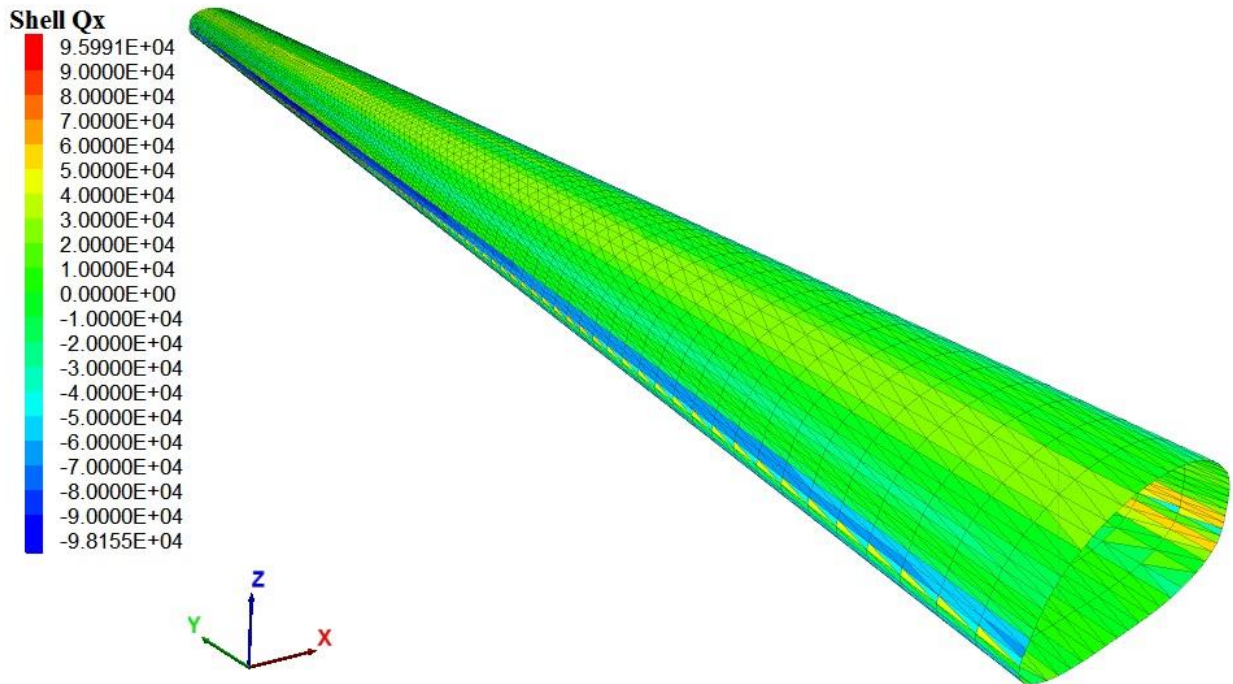


Figura 0-1. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección transversal. Perfil de corrugación 152x51 mm

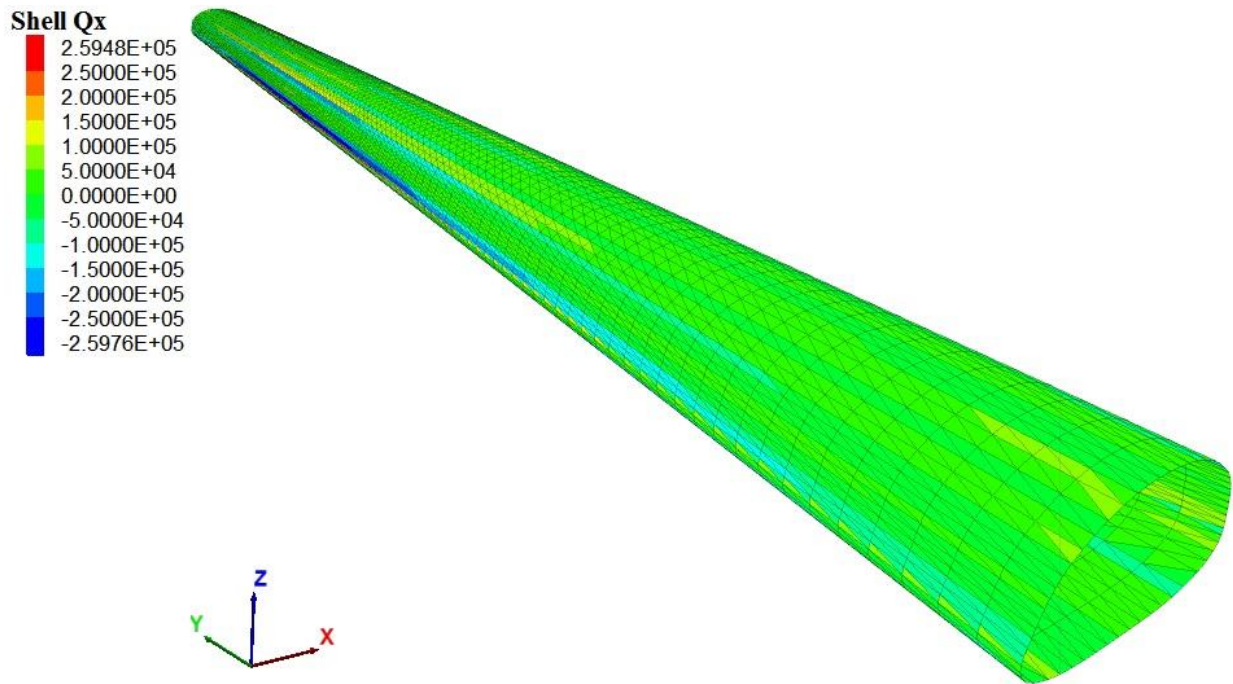


Figura 0-2. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección transversal. Perfil de corrugación 381x140 mm

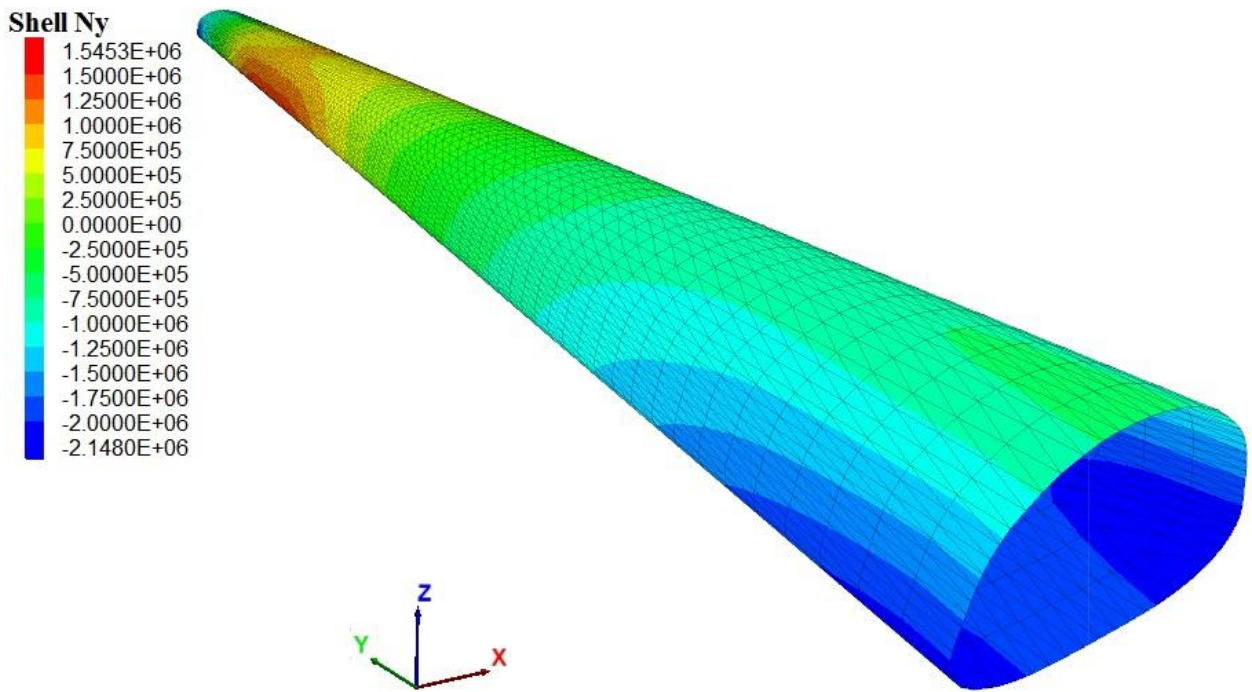


Figura 0-3. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm

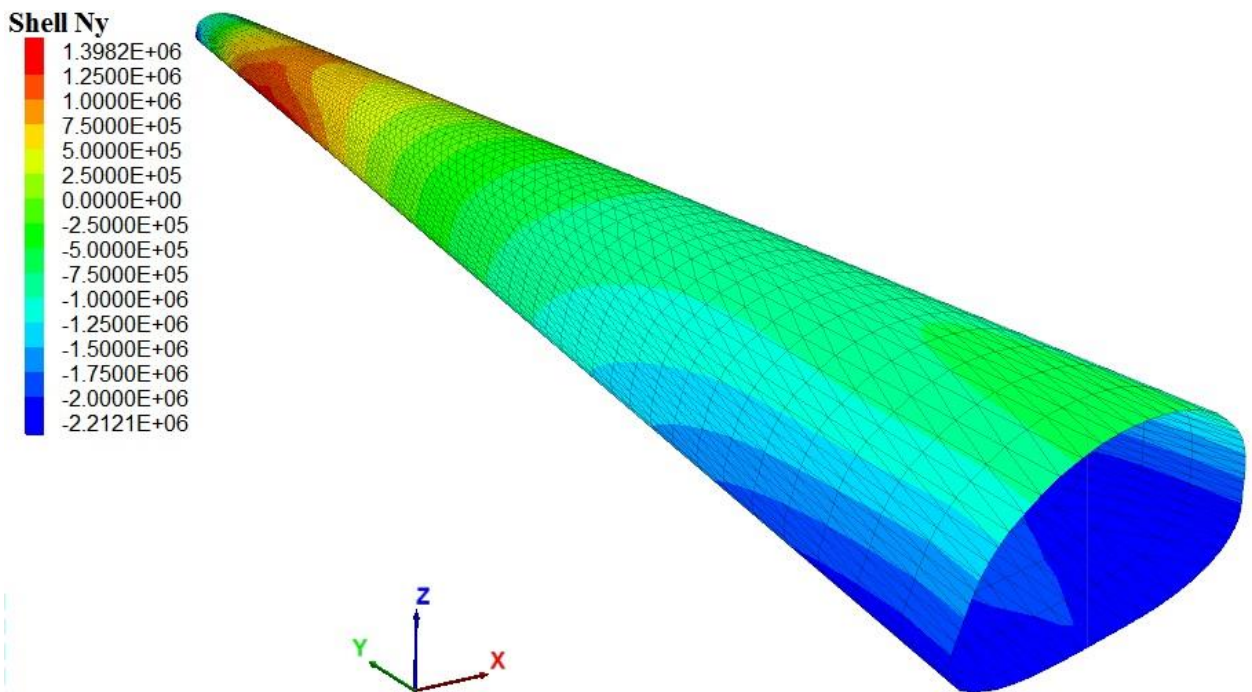


Figura 0-4. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm

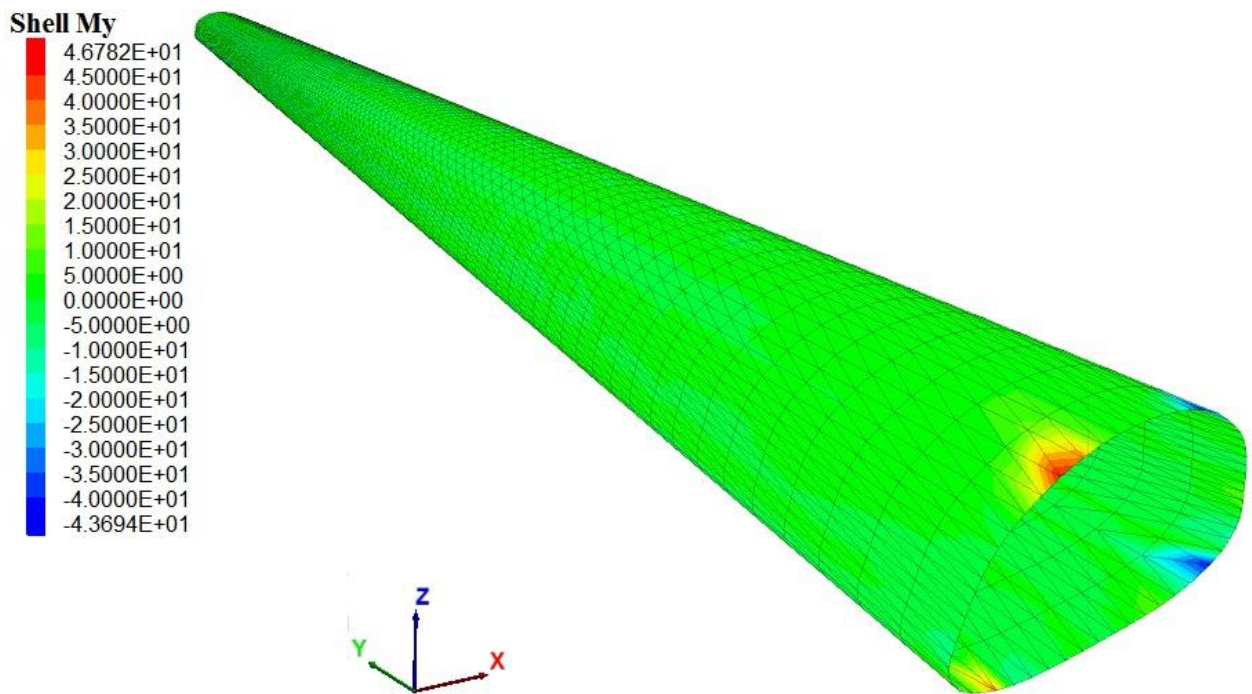


Figura 0-5. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm

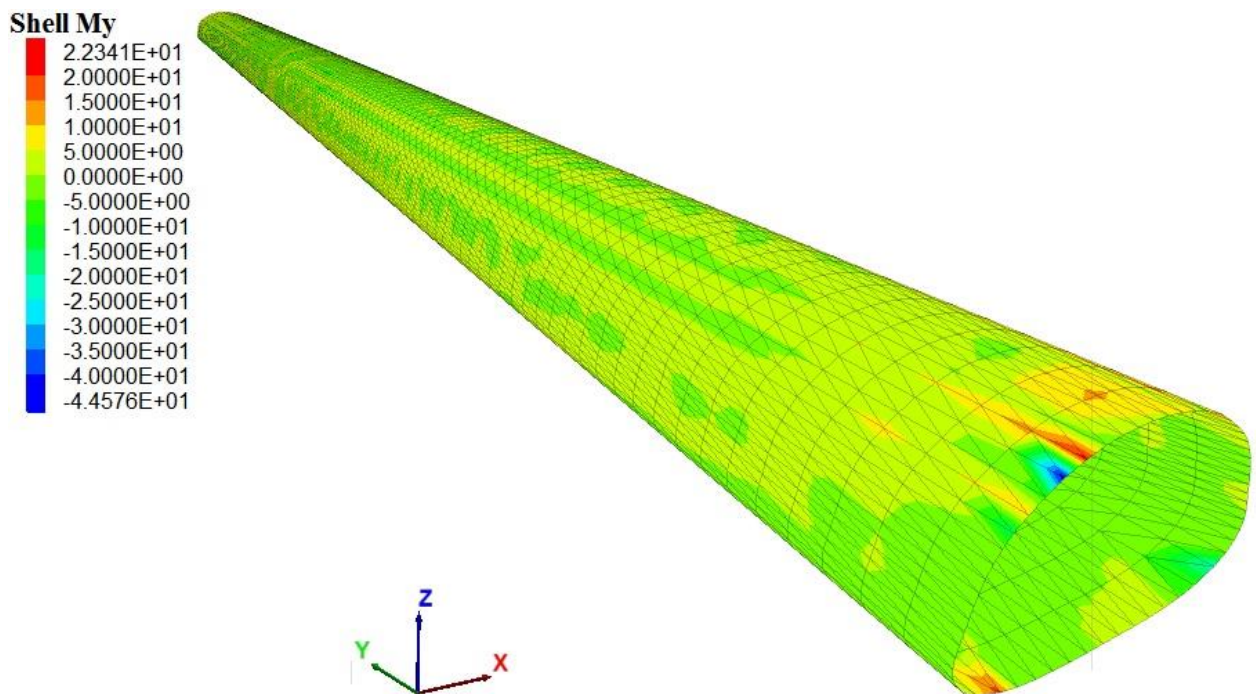


Figura 0-6. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm

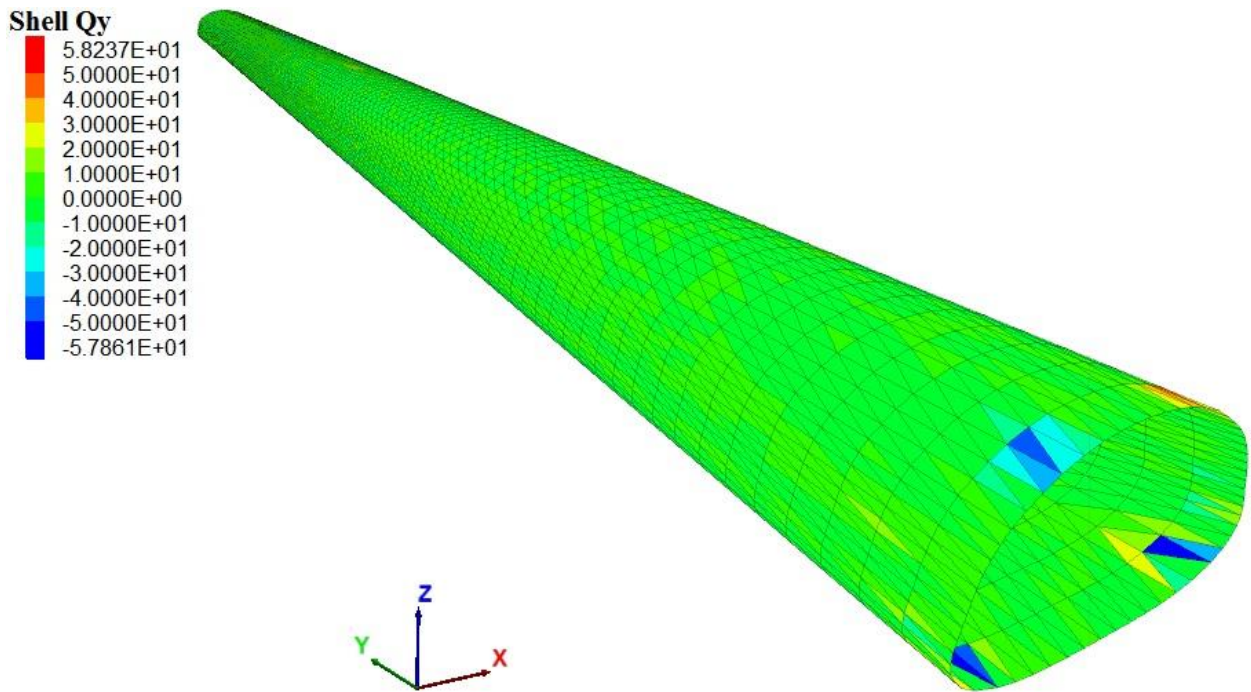


Figura 0-7. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 152x51 mm

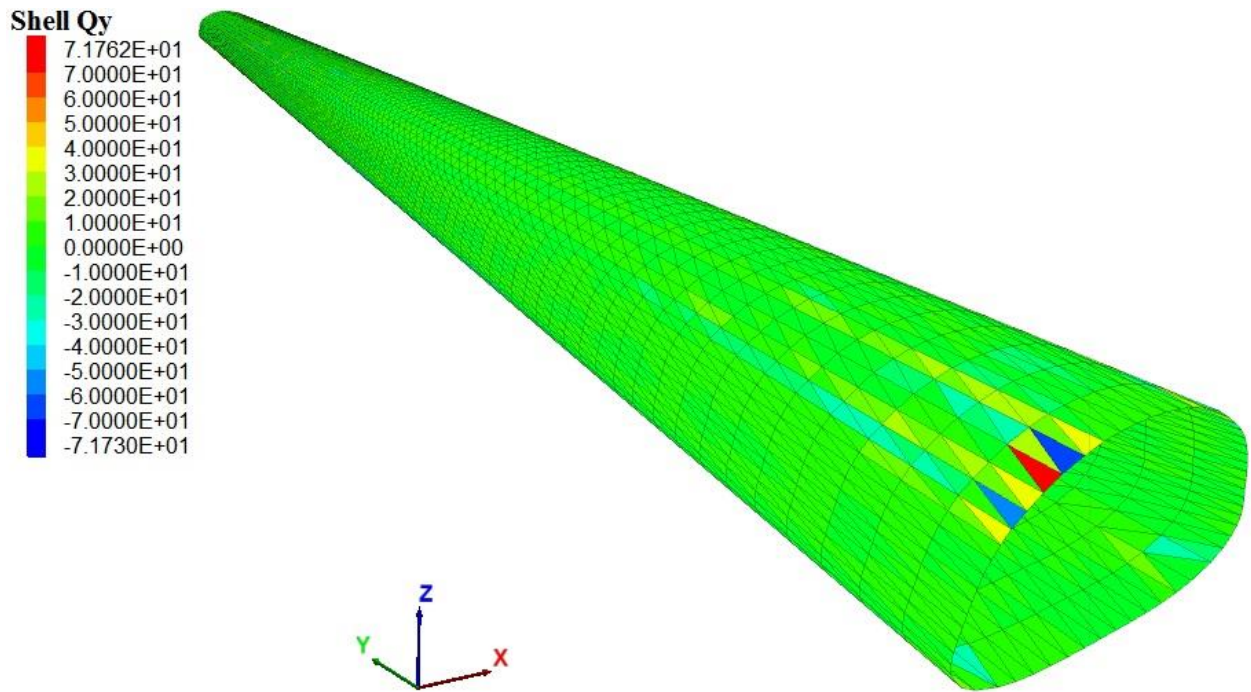


Figura 0-8. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m]. Dirección longitudinal. Perfil de corrugación 381x140 mm

C2. Diagramas de esfuerzos durante la construcción del túnel. Dirección transversal

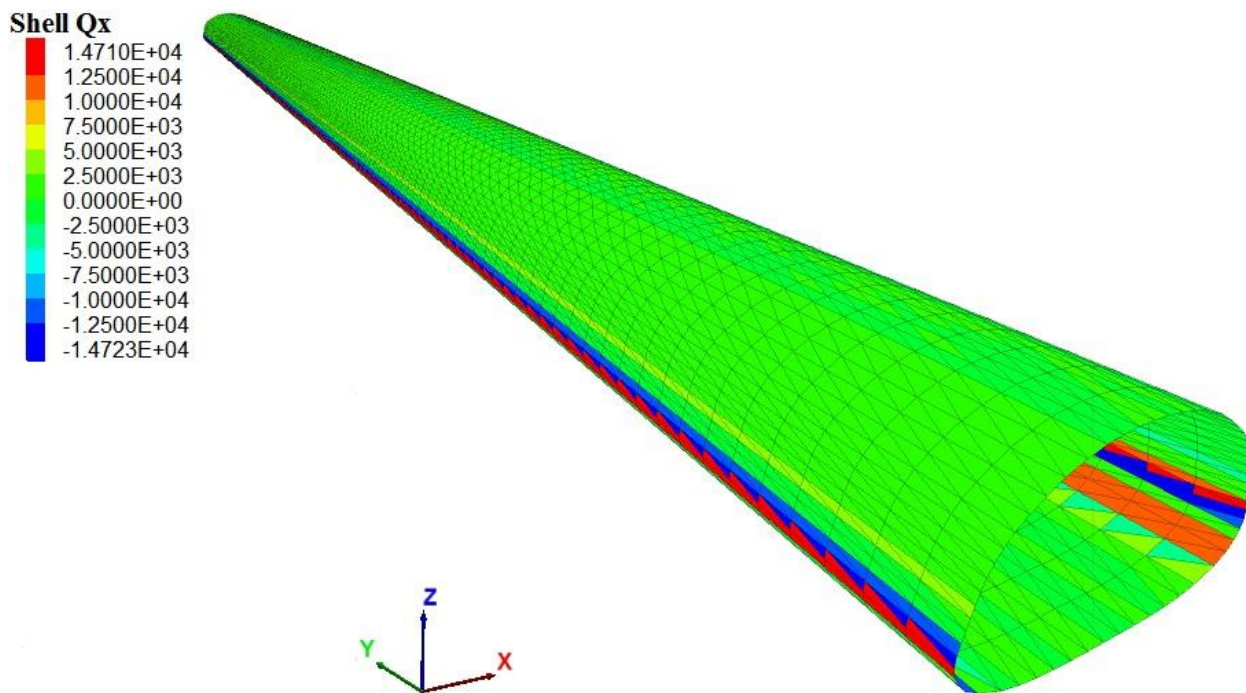


Figura 0-9. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

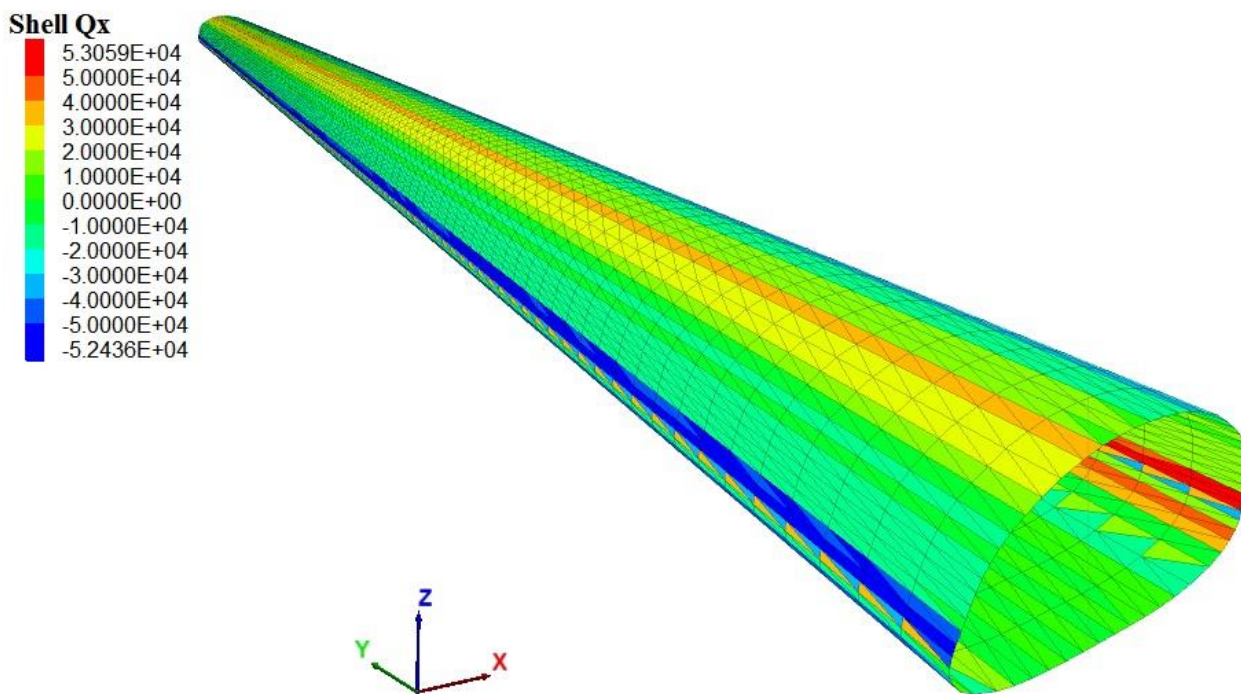


Figura 0-10. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

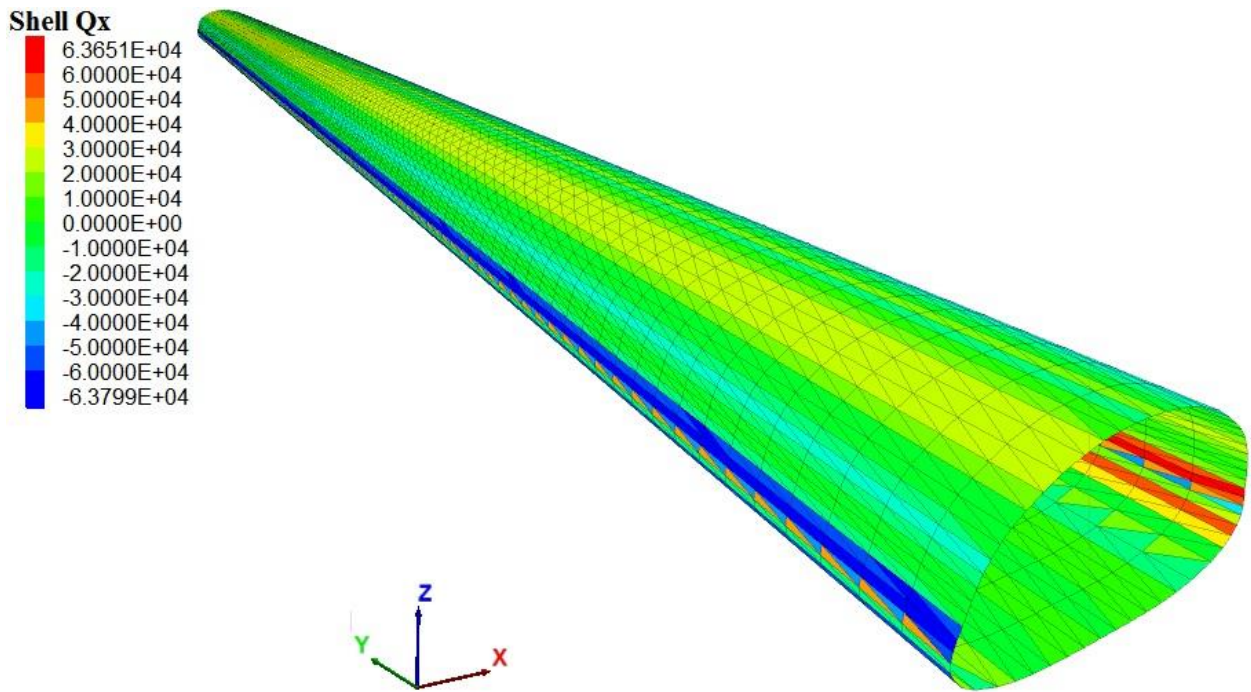


Figura 0-11. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 152x51 mm

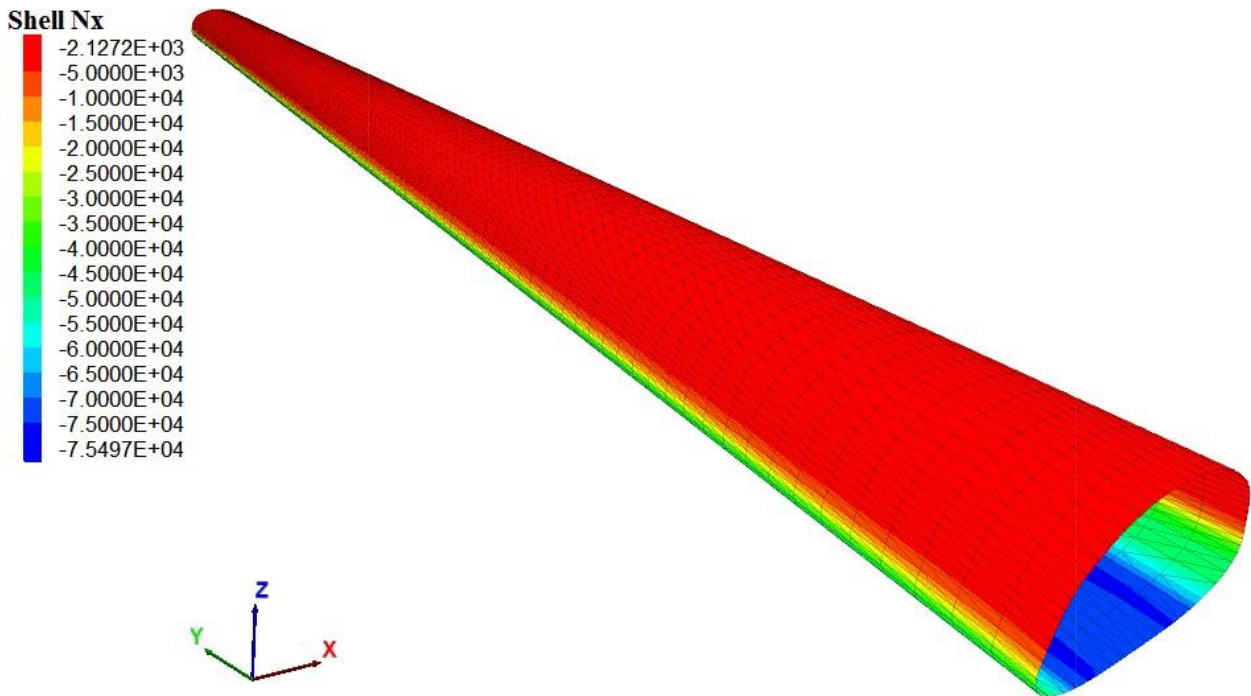


Figura 0-12. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

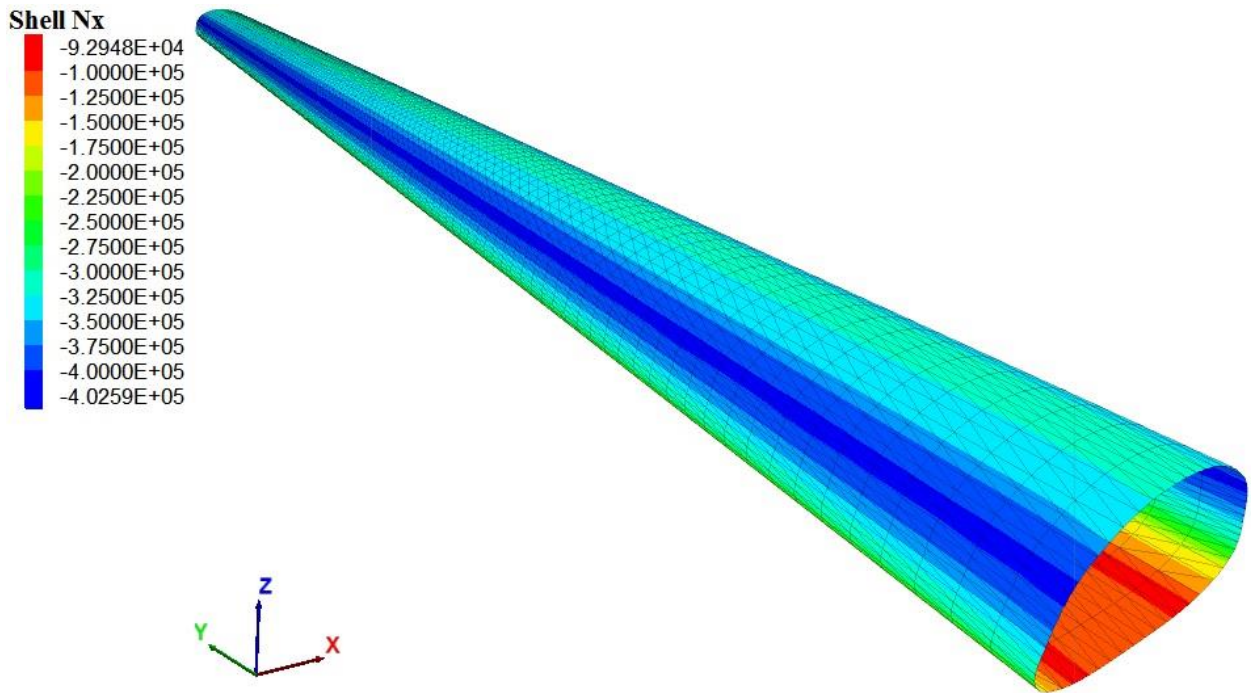


Figura 0-13. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

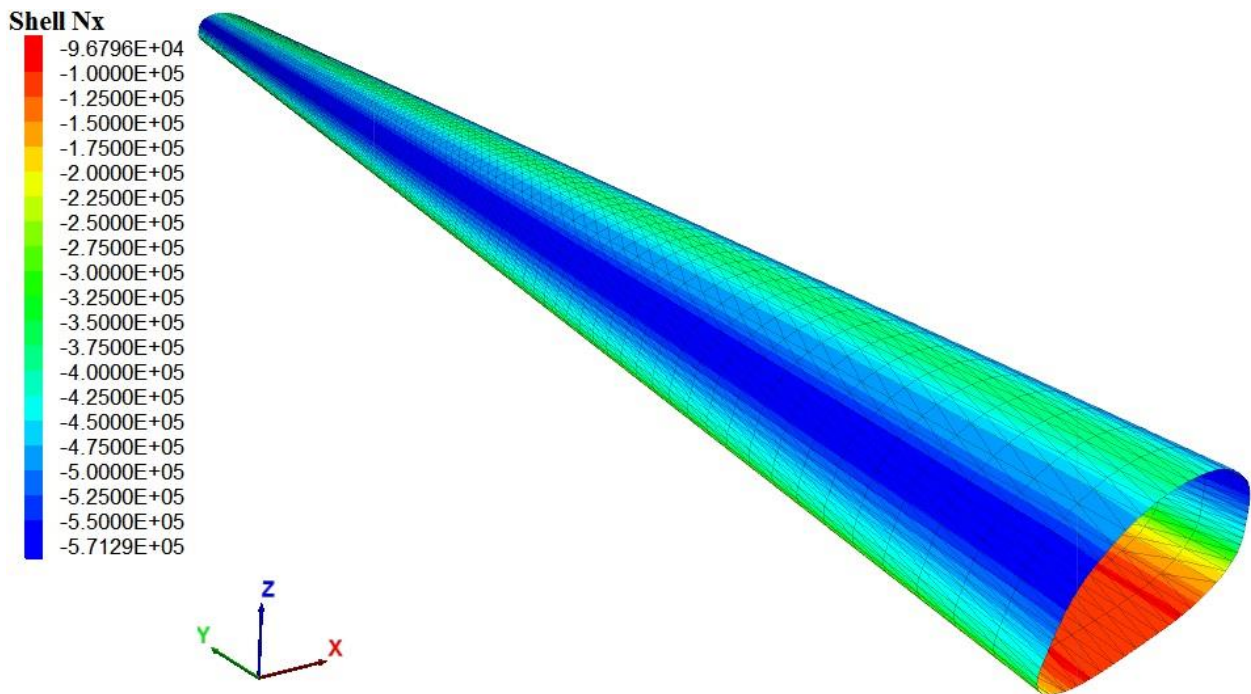


Figura 0-14. Diagrama del esfuerzo axial [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

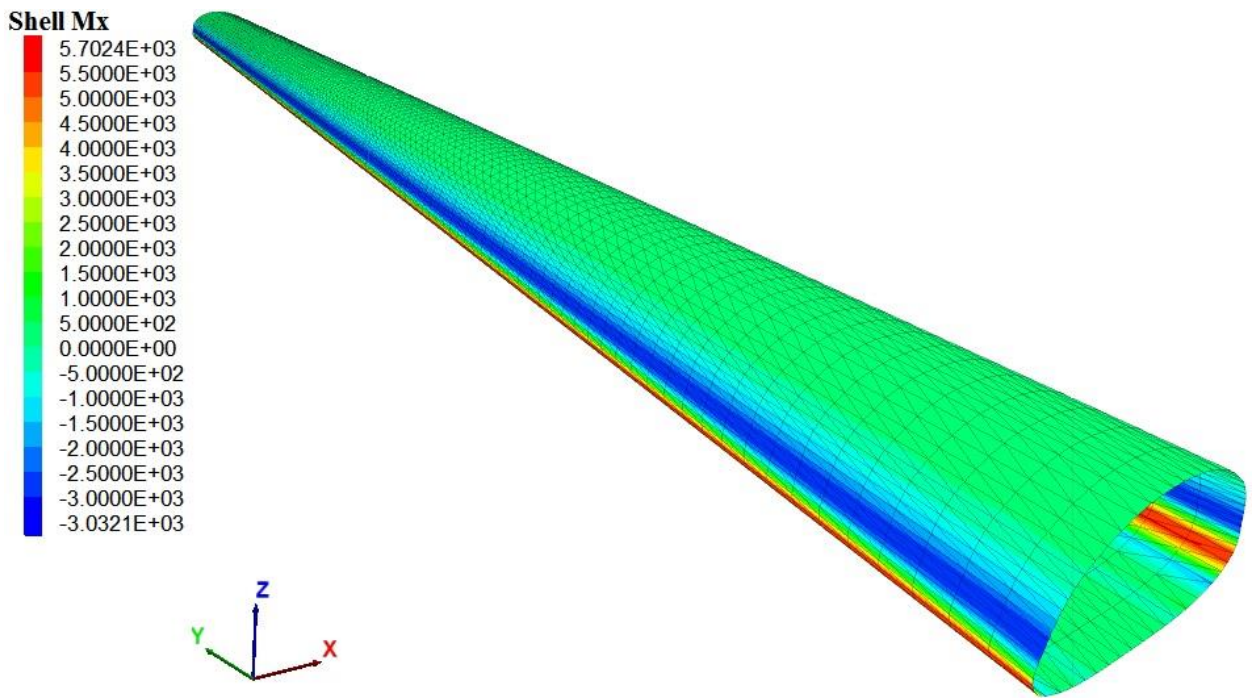


Figura 0-15. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

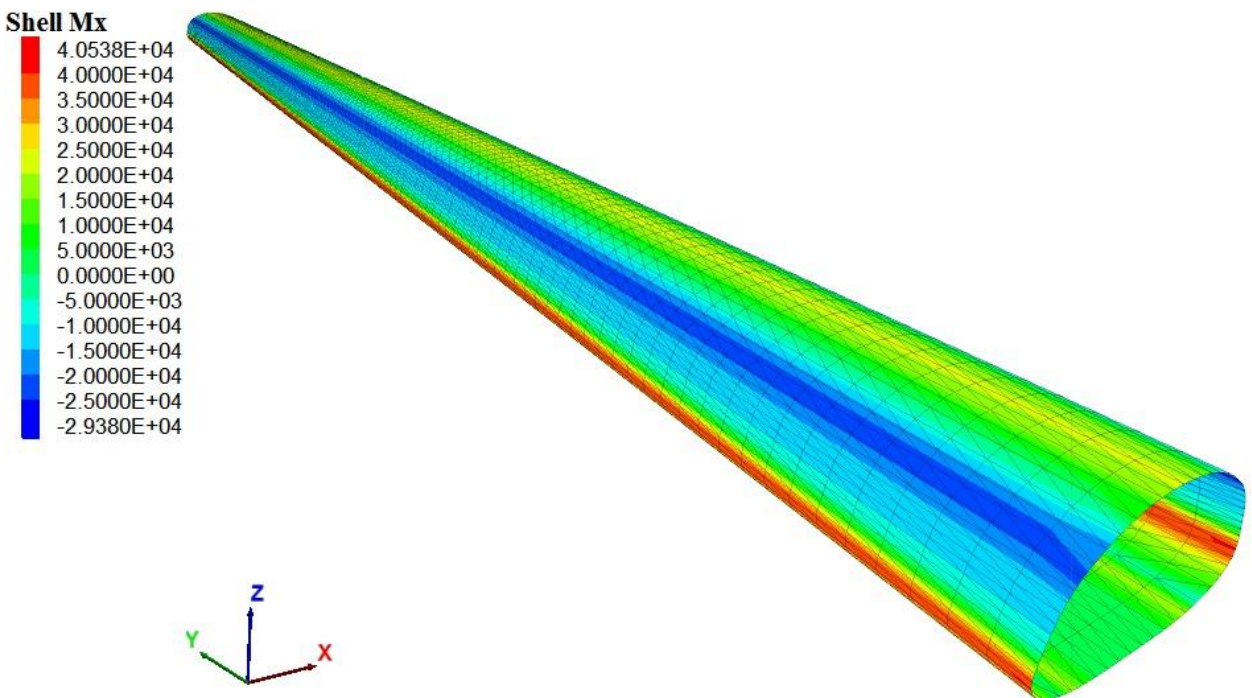


Figura 0-16. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

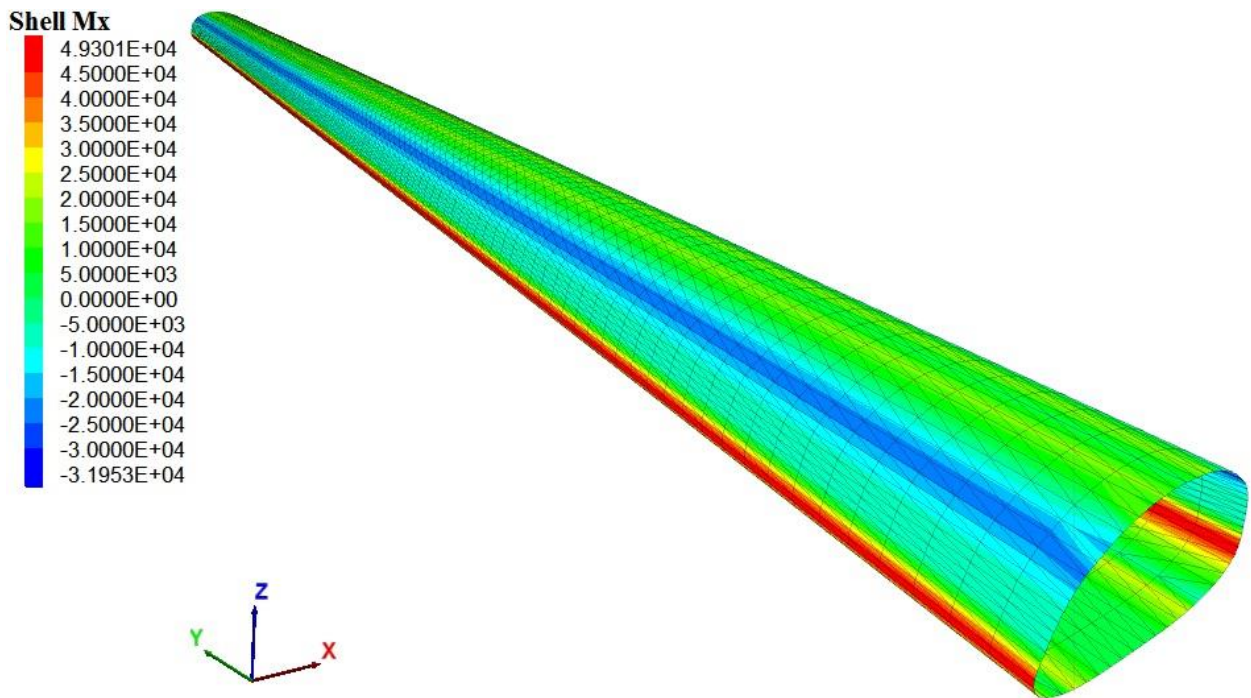


Figura 0-17. Diagrama del esfuerzo de momento [kNm/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

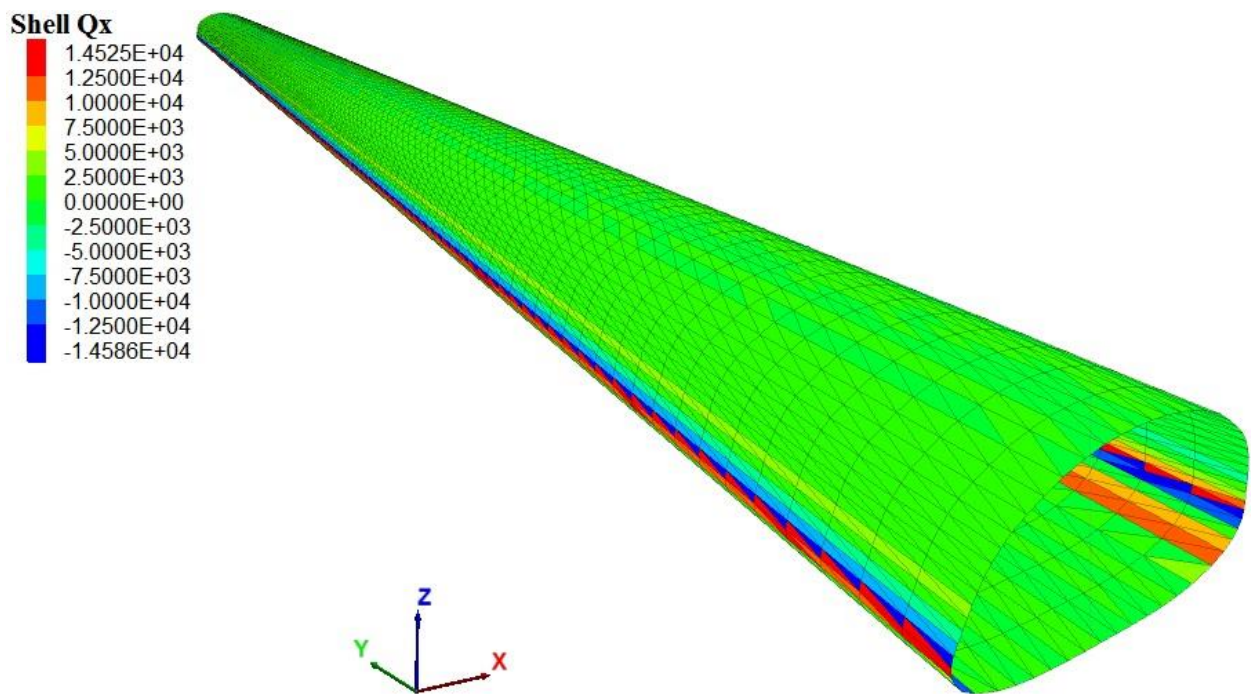


Figura 0-18. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 10 capas o 2 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

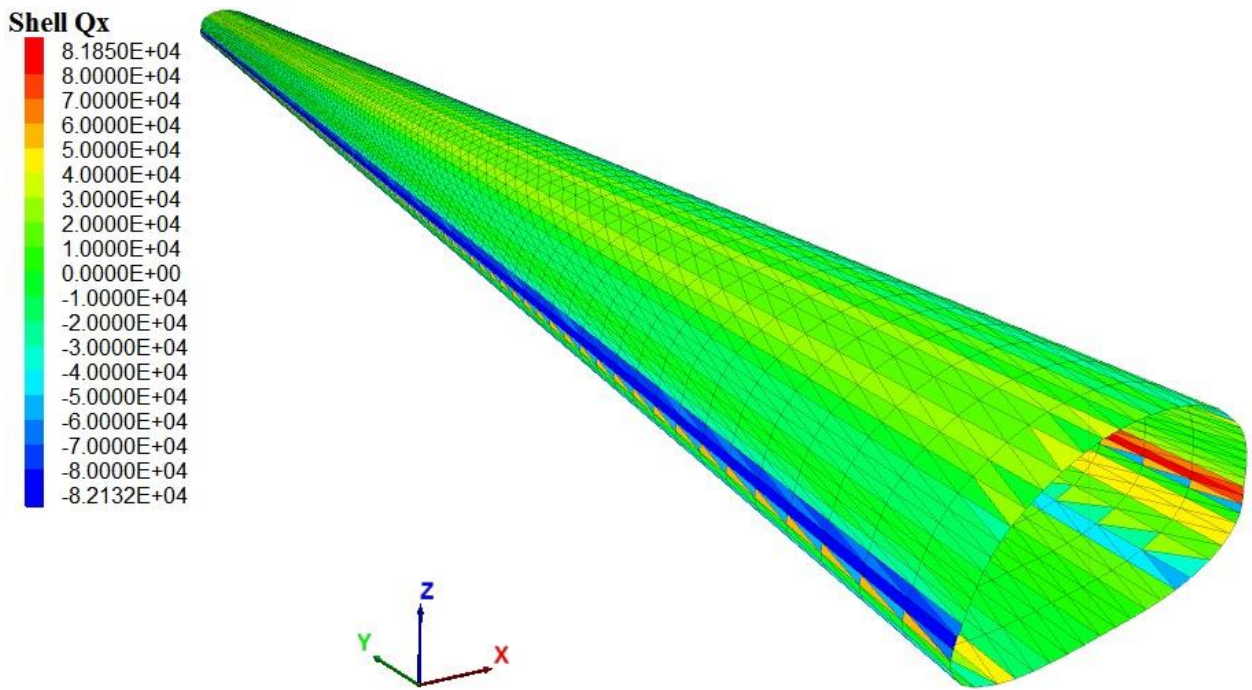


Figura 0-19. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción para 20 capas o 4 metros de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

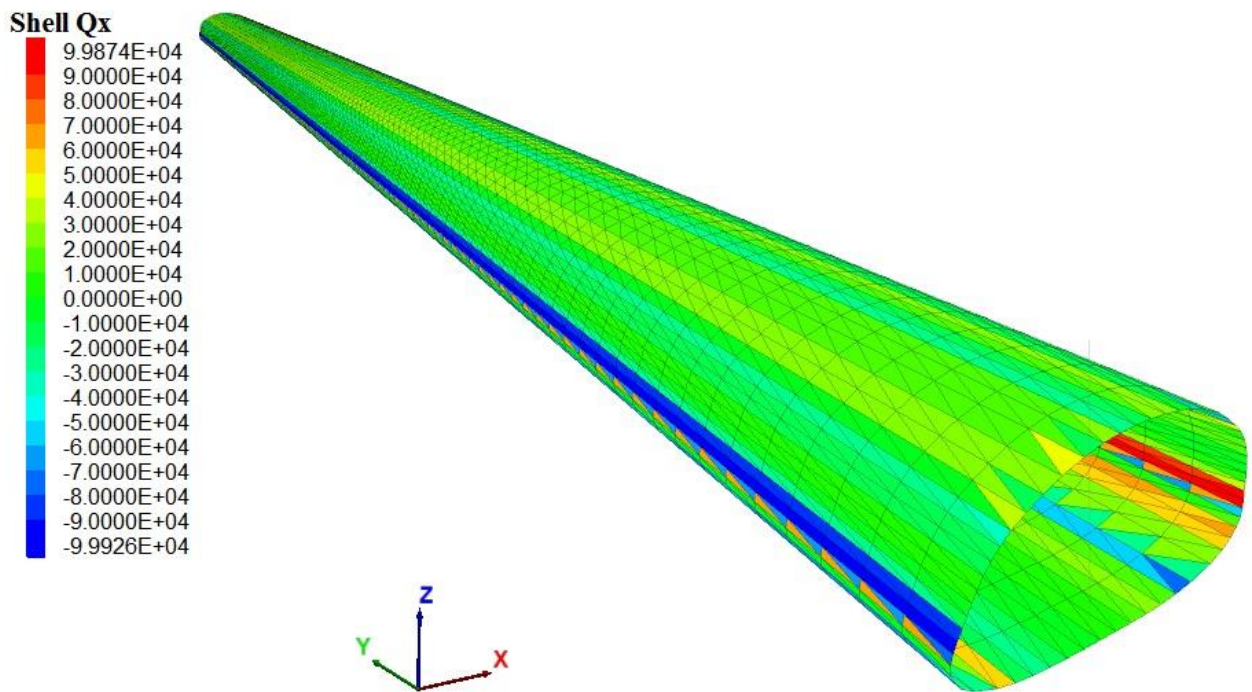


Figura 0-20. Diagrama del esfuerzo de corte [kN/m] durante la construcción al alcanzar la altura mínima de recubrimiento de relleno estructural. Perfil de corrugación 381x140 mm

Anexo D. Código modelo FLAC3D

D1. Modelo completo túnel de recuperación

new

title

Tunel de Recuperación (tubo de acero corrugado)

;Suelo Base

```
gen zone brick size 1 140 4 p0 (0,0,-6.9) p1 (0.472,0,-6.9) p2 (0,140,-6.9) p3 (0,0,-1.9) ...
p6 (0.423,0,-1.9) p7 (0.423,140,-1.9) group Suelo
gen zone brick size 1 140 4 p0 (0.472,0,-6.9) p1 (0.991,0,-6.9) p2 (0.472,140,-6.9) p3 (0.423,0,-1.9) ...
p6 (0.848,0,-1.896) p7 (0.848,140,-1.896) group Suelo
gen zone brick size 1 140 4 p0 (0.991,0,-6.9) p1 (1.563,0,-6.9) p2 (0.991,140,-6.9) p3 (0.848,0,-1.896) ...
p6 (1.276,0,-1.883) p7 (1.276,140,-1.883) group Suelo
gen zone brick size 1 140 4 p0 (1.563,0,-6.9) p1 (2.191,0,-6.9) p2 (1.563,140,-6.9) p3 (1.276,0,-1.883) ...
p6 (1.693,0,-1.853) p7 (1.693,140,-1.853) group Suelo
gen zone brick size 1 140 4 p0 (2.191,0,-6.9) p1 (2.882,0,-6.9) p2 (2.191,140,-6.9) p3 (1.693,0,-1.853) ...
p6 (2.118,0,-1.797) p7 (2.118,140,-1.797) group Suelo
gen zone brick size 1 140 4 p0 (2.882,0,-6.9) p1 (3.643,0,-6.9) p2 (2.882,140,-6.9) p3 (2.118,0,-1.797) ...
p6 (2.544,0,-1.7) p7 (2.544,140,-1.7) group Suelo
gen zone brick size 30 140 4 p0 (3.643,0,-6.9) p1 (70,0,-6.9) p2 (3.643,140,-6.9) p3 (2.544,0,-1.7) ...
p6 (70,0,-1.7) p7 (70,140,-1.7) rat 1.1 1 1 group Suelo
```

;Tubo de Acero Corrugado

```
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (2.544,0,-1.7) p2 (0,140,0) p3 (3.074,0,-1.5) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.074,0,-1.5) p2 (0,140,0) p3 (3.382,0,-1.3) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.382,0,-1.3) p2 (0,140,0) p3 (3.562,0,-1.1) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.562,0,-1.1) p2 (0,140,0) p3 (3.673,0,-0.9) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.673,0,-0.9) p2 (0,140,0) p3 (3.712,0,-0.7) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.712,0,-0.7) p2 (0,140,0) p3 (3.695,0,-0.5) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.695,0,-0.5) p2 (0,140,0) p3 (3.644,0,-0.3) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.644,0,-0.3) p2 (0,140,0) p3 (3.58,0,-0.1) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.58,0,-0.1) p2 (0,140,0) p3 (3.525,0,0.1) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.525,0,0.1) p2 (0,140,0) p3 (3.465,0,0.3) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.465,0,0.3) p2 (0,140,0) p3 (3.395,0,0.5) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.395,0,0.5) p2 (0,140,0) p3 (3.31,0,0.7) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.31,0,0.7) p2 (0,140,0) p3 (3.196,0,0.9) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.196,0,0.9) p2 (0,140,0) p3 (3.05,0,1.1) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (3.05,0,1.1) p2 (0,140,0) p3 (2.87,0,1.3) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (2.87,0,1.3) p2 (0,140,0) p3 (2.6,0,1.5) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (2.6,0,1.5) p2 (0,140,0) p3 (2.3,0,1.7) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (2.3,0,1.7) p2 (0,140,0) p3 (1.95,0,1.9) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (1.95,0,1.9) p2 (0,140,0) p3 (1.5,0,2.07) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (1.5,0,2.07) p2 (0,140,0) p3 (1.1,0,2.19) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (1.1,0,2.19) p2 (0,140,0) p3 (0.732,0,2.252) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (0.732,0,2.252) p2 (0,140,0) p3 (0.369,0,2.288) group Tunel
gen zone cyl size 1 140 1 p0 (0,0,0) p1 (0.369,0,2.288) p2 (0,140,0) p3 (0,0,2.3) group Tunel
```

gen zone reflect dip 90 dd 90

model mech mohr

prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3

;SEL

group zone Tunel range x -2.6 2.6 z -3 -1.9

sel shell id=1 range group Tunel

```
sel delete shell range y 0
sel delete shell range y 140
sel delete shell range x -2.5 2.5 z -1.6 0.2
sel shell id=1 prop ortho matx (0, 1, 0) stiff=(1.7311e11, 0, 2.441e13, 6.0586e10) thick=0.008 dens=7850
model mech null range group Tunnel z -1.9 2.3
```

;Capas

```
gen zone brick size 30 140 1 p0 (2.544,0,-1.7) p1 (70,0,-1.7) p2 (2.544,140,-1.7) p3 (3.074,0,-1.5) ...
p6 (70,0,-1.5) p7 (70,140,-1.5) rat 1.1 1 1 group Capa1
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa1
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.074,0,-1.5) p1 (70,0,-1.5) p2 (3.074,140,-1.5) p3 (3.382,0,-1.3) ...
p6 (70,0,-1.3) p7 (70,140,-1.3) rat 1.1 1 1 group Capa2
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa2
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.382,0,-1.3) p1 (70,0,-1.3) p2 (3.382,140,-1.3) p3 (3.562,0,-1.1) ...
p6 (70,0,-1.1) p7 (70,140,-1.1) rat 1.1 1 1 group Capa3
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa3
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.562,0,-1.1) p1 (70,0,-1.1) p2 (3.562,140,-1.1) p3 (3.673,0,-0.9) ...
p6 (70,0,-0.9) p7 (70,140,-0.9) rat 1.1 1 1 group Capa4
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa4
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.673,0,-0.9) p1 (70,0,-0.9) p2 (3.673,140,-0.9) p3 (3.712,0,-0.7) ...
p6 (70,0,-0.7) p7 (70,140,-0.7) rat 1.1 1 1 group Capa5
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa5
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.712,0,-0.7) p1 (70,0,-0.7) p2 (3.712,140,-0.7) p3 (3.695,0,-0.5) ...
p6 (70,0,-0.5) p7 (70,140,-0.5) rat 1.1 1 1 group Capa6
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa6
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.695,0,-0.5) p1 (70,0,-0.5) p2 (3.695,140,-0.5) p3 (3.644,0,-0.3) ...
p6 (70,0,-0.3) p7 (70,140,-0.3) rat 1.1 1 1 group Capa7
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa7
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.644,0,-0.3) p1 (70,0,-0.3) p2 (3.644,140,-0.3) p3 (3.58,0,-0.1) ...
p6 (70,0,-0.1) p7 (70,140,-0.1) rat 1.1 1 1 group Capa8
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa8
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.58,0,-0.1) p1 (70,0,-0.1) p2 (3.58,140,-0.1) p3 (3.525,0,0.1) ...
p6 (70,0,0.1) p7 (70,140,0.1) rat 1.1 1 1 group Capa9
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa9
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.525,0,0.1) p1 (70,0,0.1) p2 (3.525,140,0.1) p3 (3.465,0,0.3) ...
p6 (70,0,0.3) p7 (70,140,0.3) rat 1.1 1 1 group Capa10
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa10
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.465,0,0.3) p1 (70,0,0.3) p2 (3.465,140,0.3) p3 (3.395,0,0.5) ...
p6 (70,0,0.5) p7 (70,140,0.5) rat 1.1 1 1 group Capa11
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa11
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.395,0,0.5) p1 (70,0,0.5) p2 (3.395,140,0.5) p3 (3.31,0,0.7) ...
p6 (70,0,0.7) p7 (70,140,0.7) rat 1.1 1 1 group Capa12
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa12
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.31,0,0.7) p1 (70,0,0.7) p2 (3.31,140,0.7) p3 (3.196,0,0.9) ...
p6 (70,0,0.9) p7 (70,140,0.9) rat 1.1 1 1 group Capa13
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa13
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.196,0,0.9) p1 (70,0,0.9) p2 (3.196,140,0.9) p3 (3.05,0,1.1) ...
p6 (70,0,1.1) p7 (70,140,1.1) rat 1.1 1 1 group Capa14
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa14
gen zone brick size 30 140 1 p0 (3.05,0,1.1) p1 (70,0,1.1) p2 (3.05,140,1.1) p3 (2.87,0,1.3) ...
p6 (70,0,1.3) p7 (70,140,1.3) rat 1.1 1 1 group Capa15
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa15
gen zone brick size 30 140 1 p0 (2.87,0,1.3) p1 (70,0,1.3) p2 (2.87,140,1.3) p3 (2.6,0,1.5) ...
p6 (70,0,1.5) p7 (70,140,1.5) rat 1.1 1 1 group Capa16
gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa16
gen zone brick size 30 140 1 p0 (2.6,0,1.5) p1 (70,0,1.5) p2 (2.6,140,1.5) p3 (2.3,0,1.7) ...
```

p6 (70,0,1.7) p7 (70,140,1.7) rat 1.1 1 1 group Capa17
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa17
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (2.3,0,1.7) p1 (70,0,1.7) p2 (2.3,140,1.7) p3 (1.95,0,1.9) ...
 p6 (70,0,1.9) p7 (70,140,1.9) rat 1.1 1 1 group Capa18
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa18
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (1.95,0,1.9) p1 (70,0,1.9) p2 (1.95,140,1.9) p3 (1.5,0,2.07) ...
 p6 (70,0,2.07) p7 (70,140,2.07) rat 1.1 1 1 group Capa19
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa19
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (1.5,0,2.07) p1 (70,0,2.07) p2 (1.5,140,2.07) p3 (1.1,0,2.19) ...
 p6 (70,0,2.19) p7 (70,140,2.19) rat 1.1 1 1 group Capa20
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (1.1,0,2.19) p1 (70,0,2.19) p2 (1.1,140,2.19) p3 (0.732,0,2.252) ...
 p6 (70,0,2.252) p7 (70,140,2.252) rat 1.1 1 1 group Capa20
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0.732,0,2.252) p1 (70,0,2.252) p2 (0.732,140,2.252) p3 (0.369,0,2.288)
 ...
 p6 (70,0,2.288) p7 (70,140,2.288) rat 1.1 1 1 group Capa20
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0.369,0,2.288) p1 (70,0,2.288) p2 (0.369,140,2.288) p3 (0,0,2.3) ...
 p6 (70,0,2.3) p7 (70,140,2.3) rat 1.1 1 1 group Capa20
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa20
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0,0,2.3) p1 (70,0,2.3) p2 (0,140,2.3) p3 (0,0,2.5) ...
 p6 (70,0,2.5) p7 (70,140,2.5) rat 1.1 1 1 group Capa21
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa21
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0,0,2.5) p1 (70,0,2.5) p2 (0,140,2.5) p3 (0,0,2.7) ...
 p6 (70,0,2.7) p7 (70,140,2.7) rat 1.1 1 1 group Capa22
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa22
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0,0,2.7) p1 (70,0,2.7) p2 (0,140,2.7) p3 (0,0,2.9) ...
 p6 (70,0,2.9) p7 (70,140,2.9) rat 1.1 1 1 group Capa23
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa23
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0,0,2.9) p1 (70,0,2.9) p2 (0,140,2.9) p3 (0,0,3.1) ...
 p6 (70,0,3.1) p7 (70,140,3.1) rat 1.1 1 1 group Capa24
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa24
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0,0,3.1) p1 (70,0,3.1) p2 (0,140,3.1) p3 (0,0,3.3) ...
 p6 (70,0,3.3) p7 (70,140,3.3) rat 1.1 1 1 group Capa25
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa25
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0,0,3.3) p1 (70,0,3.3) p2 (0,140,3.3) p3 (0,0,3.5) ...
 p6 (70,0,3.5) p7 (70,140,3.5) rat 1.1 1 1 group Capa26
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa26
 gen zone brick size 30 140 1 p0 (0,0,3.5) p1 (70,0,3.5) p2 (0,140,3.5) p3 (0,0,3.7) ...
 p6 (70,0,3.7) p7 (70,140,3.7) rat 1.1 1 1 group Capa27
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Capa27

;Stockpile

gen zone cylinder size 60 10 8 p0 (0,70,13.7) p1 (48,70,13.7) p2 (0,70,3.7) ...
 p3 (0,118,13.7) p4 (60,70,3.7) p5 (0,130,3.7) group Pila
 gen zone cylinder size 48 10 8 p0 (0,70,23.7) p1 (36,70,23.7) p2 (0,70,13.7) ...
 p3 (0,106,23.7) p4 (48,70,13.7) p5 (0,118,13.7) group Pila
 gen zone cylinder size 36 10 8 p0 (0,70,33.7) p1 (24,70,33.7) p2 (0,70,23.7) ...
 p3 (0,94,33.7) p4 (36,70,23.7) p5 (0,106,23.7) group Pila
 gen zone cylinder size 24 10 8 p0 (0,70,43.7) p1 (12,70,43.7) p2 (0,70,33.7) ...
 p3 (0,82,43.7) p4 (24,70,33.7) p5 (0,94,33.7) group Pila
 gen zone cylinder size 12 10 8 p0 (0,70,53.7) p1 (0,1,70,53.7) p2 (0,70,43.7) ...
 p3 (0,70,1,53.7) p4 (12,70,43.7) p5 (0,82,43.7) group Pila
 gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Pila
 gen zone reflect dip 90 dd 0 origin (0,70,3.7) range group Pila

gen merge
 attach face

```
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
fix z range z -6.9
```

```
set grav 0,0,-9.81
```

D2. Colocación y compactación capas de relleno estructural 1 a 5

```
model mech null range group Capa1
model mech null range group Capa2
model mech null range group Capa3
model mech null range group Capa4
model mech null range group Capa5
model mech null range group Capa6
model mech null range group Capa7
model mech null range group Capa8
model mech null range group Capa9
model mech null range group Capa10
model mech null range group Capa11
model mech null range group Capa12
model mech null range group Capa13
model mech null range group Capa14
model mech null range group Capa15
model mech null range group Capa16
model mech null range group Capa17
model mech null range group Capa18
model mech null range group Capa19
model mech null range group Capa20
model mech null range group Capa21
model mech null range group Capa22
model mech null range group Capa23
model mech null range group Capa24
model mech null range group Capa25
model mech null range group Capa26
model mech null range group Capa27
model mech null range group Pila
```

```
hist add id=1 unbal ;unbalanced force
apply szz=-119366 range x 3.1 8.1 z -1.69 -1.71
apply szz=-119366 range x -3.1 -8.1 z -1.69 -1.71
```

```
solve ratio 2e-5
save sueloytunel_381
```

```
apply remove szz range x 3.1 8.1 z -1.69 -1.71
apply remove szz range x -3.1 -8.1 z -1.69 -1.71
init xdisp 0.0 ydisp 0.0 zdisp 0.0
```

```
;Capas compactadas 1-5
;Capa 1
model mech mohr range group Capa1
```

```

prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa1
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.0 3.1 z -1.51 -1.49
sel link net range x -3.0 -3.1 z -1.51 -1.49
sel link attach xrdir free range x 3.0 3.1 z -1.51 -1.49
sel link attach yrdir free range x 3.0 3.1 z -1.51 -1.49
sel link attach zrdir free range x 3.0 3.1 z -1.51 -1.49
sel link attach xrdir free range x -3.0 -3.1 z -1.51 -1.49
sel link attach yrdir free range x -3.0 -3.1 z -1.51 -1.49
sel link attach zrdir free range x -3.0 -3.1 z -1.51 -1.49

apply szz=-119366 range x 3.6 8.6 z -1.51 -1.49
apply szz=-119366 range x -3.6 -8.6 z -1.51 -1.49
solve
save Capas1_381

```

```

apply remove szz range x 3.6 8.6 z -1.51 -1.49
apply remove szz range x -3.6 -8.6 z -1.51 -1.49

```

```

;Capa 2
model mech mohr range group Capa2
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa2
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.3 3.4 z -1.31 -1.29
sel link net range x -3.3 -3.4 z -1.31 -1.29
sel link attach xrdir free range x 3.3 3.4 z -1.31 -1.29
sel link attach yrdir free range x 3.3 3.4 z -1.31 -1.29
sel link attach zrdir free range x 3.3 3.4 z -1.31 -1.29
sel link attach xrdir free range x -3.3 -3.4 z -1.31 -1.29
sel link attach yrdir free range x -3.3 -3.4 z -1.31 -1.29
sel link attach zrdir free range x -3.3 -3.4 z -1.31 -1.29

apply szz=-119366 range x 3.9 8.9 z -1.31 -1.29
apply szz=-119366 range x -3.9 -8.9 z -1.31 -1.29
solve
save Capas2_381

```

```

apply remove szz range x 3.9 8.9 z -1.31 -1.29
apply remove szz range x -3.9 -8.9 z -1.31 -1.29

```

```

;Capa 3
model mech mohr range group Capa3
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa3
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.5 3.6 z -1.11 -1.09
sel link net range x -3.5 -3.6 z -1.11 -1.09
sel link attach xrdir free range x 3.5 3.6 z -1.15 -1.05

```

```
sel link attach yrdir free range x 3.5 3.6 z -1.15 -1.05
sel link attach zrdir free range x 3.5 3.6 z -1.15 -1.05
sel link attach xrdir free range x -3.5 -3.6 z -1.15 -1.05
sel link attach yrdir free range x -3.5 -3.6 z -1.15 -1.05
sel link attach zrdir free range x -3.5 -3.6 z -1.15 -1.05
```

```
apply szz=-119366 range x 4.1 9.1 z -1.11 -1.09
apply szz=-119366 range x -4.1 -9.1 z -1.11 -1.09
solve
save Capas3_381
```

```
apply remove szz range x 4.1 9.1 z -1.11 -1.09
apply remove szz range x -4.1 -9.1 z -1.11 -1.09
```

```
;Capa 4
model mech mohr range group Capa4
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa4
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.6 3.7 z -0.91 -0.89
sel link net range x -3.6 -3.7 z -0.91 -0.89
sel link attach xrdir free range x 3.6 3.7 z -0.95 -0.85
sel link attach yrdir free range x 3.6 3.7 z -0.95 -0.85
sel link attach zrdir free range x 3.6 3.7 z -0.95 -0.85
sel link attach xrdir free range x -3.6 -3.7 z -0.95 -0.85
sel link attach yrdir free range x -3.6 -3.7 z -0.95 -0.85
sel link attach zrdir free range x -3.6 -3.7 z -0.95 -0.85
```

```
apply szz=-119366 range x 4.2 9.2 z -0.91 -0.89
apply szz=-119366 range x -4.2 -9.2 z -0.91 -0.89
solve
save Capas4_381
```

```
apply remove szz range x 4.2 9.2 z -0.91 -0.89
apply remove szz range x -4.2 -9.2 z -0.91 -0.89
```

```
;Capa 5
model mech mohr range group Capa5
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa5
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.7 3.8 z -0.71 -0.69
sel link net range x -3.7 -3.8 z -0.71 -0.69
sel link attach xrdir free range x 3.7 3.8 z -0.75 -0.65
sel link attach yrdir free range x 3.7 3.8 z -0.75 -0.65
sel link attach zrdir free range x 3.7 3.8 z -0.75 -0.65
sel link attach xrdir free range x -3.7 -3.8 z -0.75 -0.65
sel link attach yrdir free range x -3.7 -3.8 z -0.75 -0.65
sel link attach zrdir free range x -3.7 -3.8 z -0.75 -0.65
```

```
apply szz=-119366 range x 4.3 9.3 z -0.71 -0.69
apply szz=-119366 range x -4.3 -9.3 z -0.71 -0.69
```

```
solve
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres
```

```
save Capas5_381
```

D3. Colocación y compactación capas de relleno estructural 6 a 10

```
restore Capas5_381
apply remove szz range x 4.3 9.3 z -0.71 -0.69
apply remove szz range x -4.3 -9.3 z -0.71 -0.69

;Capas compactadas 6-10
;Capa 6
model mech mohr range group Capa6
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa6
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.6 3.8 z -0.55 -0.45
sel link net range x -3.6 -3.8 z -0.55 -0.45
sel link attach xrdir free range x 3.6 3.8 z -0.55 -0.45
sel link attach yrdir free range x 3.6 3.8 z -0.55 -0.45
sel link attach zrdir free range x 3.6 3.8 z -0.55 -0.45
sel link attach xrdir free range x -3.6 -3.8 z -0.55 -0.45
sel link attach yrdir free range x -3.6 -3.8 z -0.55 -0.45
sel link attach zrdir free range x -3.6 -3.8 z -0.55 -0.45

apply szz=-119366 range x 4.2 9.2 z -0.55 -0.45
apply szz=-119366 range x -4.2 -9.2 z -0.55 -0.45
solve
save Capas6_381
```

```
apply remove szz range x 4.2 9.2 z -0.55 -0.45
apply remove szz range x -4.2 -9.2 z -0.55 -0.45
```

```
;Capa 7
model mech mohr range group Capa7
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa7
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.6 3.8 z -0.35 -0.25
sel link net range x -3.6 -3.8 z -0.35 -0.25
sel link attach xrdir free range x 3.6 3.8 z -0.35 -0.25
sel link attach yrdir free range x 3.6 3.8 z -0.35 -0.25
sel link attach zrdir free range x 3.6 3.8 z -0.35 -0.25
sel link attach xrdir free range x -3.6 -3.8 z -0.35 -0.25
sel link attach yrdir free range x -3.6 -3.8 z -0.35 -0.25
sel link attach zrdir free range x -3.6 -3.8 z -0.35 -0.25

apply szz=-119366 range x 4.2 9.2 z -0.35 -0.25
```

```
apply szz=-119366 range x -4.2 -9.2 z -0.4 -0.2
solve
save Capas7_381
```

```
apply remove szz range x 4.2 9.2 z -0.35 -0.25
apply remove szz range x -4.2 -9.2 z -0.35 -0.25
```

```
;Capa 8
model mech mohr range group Capa8
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa8
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.5 3.7 z -0.2 -0.0
sel link net range x -3.5 -3.7 z -0.2 -0.0
sel link attach xrdir free range x 3.5 3.7 z -0.2 -0.0
sel link attach yrdir free range x 3.5 3.7 z -0.2 -0.0
sel link attach zrdir free range x 3.5 3.7 z -0.2 -0.0
sel link attach xrdir free range x -3.5 -3.7 z -0.2 -0.0
sel link attach yrdir free range x -3.5 -3.7 z -0.2 -0.0
sel link attach zrdir free range x -3.5 -3.7 z -0.2 -0.0
```

```
apply szz=-119366 range x 4.1 8.1 z -0.15 -0.05
apply szz=-119366 range x -4.1 -8.1 z -0.15 -0.05
solve
save Capas8_381
```

```
apply remove szz range x 4.1 8.1 z -0.15 -0.05
apply remove szz range x -4.1 -8.1 z -0.15 -0.05
```

```
;Capa 9
model mech mohr range group Capa9
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa9
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.5 3.7 z 0.05 0.15
sel link net range x -3.5 -3.7 z 0.05 0.15
sel link attach xrdir free range x 3.4 3.7 z 0.05 0.2
sel link attach yrdir free range x 3.4 3.7 z 0.05 0.2
sel link attach zrdir free range x 3.4 3.7 z 0.05 0.2
sel link attach xrdir free range x -3.4 -3.7 z 0.05 0.2
sel link attach yrdir free range x -3.4 -3.7 z 0.05 0.2
sel link attach zrdir free range x -3.4 -3.7 z 0.05 0.2
```

```
apply szz=-119366 range x 4.1 8.1 z 0.05 0.15
apply szz=-119366 range x -4.1 -8.1 z 0.05 0.15
solve
save Capas9_381
```

```
apply remove szz range x 4.1 8.1 z 0.05 0.15
apply remove szz range x -4.1 -8.1 z 0.05 0.15
```

```
;Capa 10
```



```

model mech mohr range group Capa10
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa10
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.4 3.6 z 0.29 0.31
sel link net range x -3.4 -3.6 z 0.29 0.31
sel link attach xrdir free range x 3.3 3.6 z 0.25 0.4
sel link attach yrdir free range x 3.3 3.6 z 0.25 0.4
sel link attach zrdir free range x 3.3 3.6 z 0.25 0.4
sel link attach xrdir free range x -3.3 -3.6 z 0.25 0.4
sel link attach yrdir free range x -3.3 -3.6 z 0.25 0.4
sel link attach zrdir free range x -3.3 -3.6 z 0.25 0.4

apply szz=-119366 range x 4.0 8.0 z 0.25 0.35
apply szz=-119366 range x -4.0 -8.0 z 0.25 0.35
solve
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres

save Capas10_381

```

D4. Colocación y compactación capas de relleno estructural 11 a 15

```

restore Capas10_381
apply remove szz range x 4.0 8.0 z 0.25 0.35
apply remove szz range x -4.0 -8.0 z 0.25 0.35

;Capas compactadas 11-15
;Capa 11
model mech mohr range group Capa11
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa11
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.3 3.5 z 0.45 0.55
sel link net range x -3.3 -3.5 z 0.45 0.55
sel link attach xrdir free range x 3.1 3.5 z 0.45 0.55
sel link attach yrdir free range x 3.1 3.5 z 0.45 0.55
sel link attach zrdir free range x 3.1 3.5 z 0.45 0.55
sel link attach xrdir free range x -3.1 -3.5 z 0.45 0.55
sel link attach yrdir free range x -3.1 -3.5 z 0.45 0.55
sel link attach zrdir free range x -3.1 -3.5 z 0.45 0.55

apply szz=-119366 range x 3.9 8.9 z 0.45 0.55
apply szz=-119366 range x -3.9 -8.9 z 0.45 0.55
solve
save Capas11_381

apply remove szz range x 3.9 8.9 z 0.45 0.55
apply remove szz range x -3.9 -8.9 z 0.45 0.55

```

```

;Capa 12
model mech mohr range group Capa12
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa12
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 3.2 3.4 z 0.65 0.75
sel link net range x -3.2 -3.4 z 0.65 0.75
sel link attach xrdir free range x 3.0 3.4 z 0.65 0.8
sel link attach yrdir free range x 3.0 3.4 z 0.65 0.8
sel link attach zrdir free range x 3.0 3.4 z 0.65 0.8
sel link attach xrdir free range x -3.0 -3.4 z 0.65 0.8
sel link attach yrdir free range x -3.0 -3.4 z 0.65 0.8
sel link attach zrdir free range x -3.0 -3.4 z 0.65 0.8

apply szz=-119366 range x 3.9 8.9 z 0.65 0.75
apply szz=-119366 range x -3.9 -8.9 z 0.65 0.75
solve
save Capas12_381

```

```

apply remove szz range x 3.9 8.9 z 0.65 0.75
apply remove szz range x -3.9 -8.9 z 0.65 0.75

```

```

;Capa 13
model mech mohr range group Capa13
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa13
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 2.8 3.3 z 0.85 0.95
sel link net range x -2.8 -3.3 z 0.85 0.95
sel link attach xrdir free range x 2.7 3.3 z 0.85 1.1
sel link attach yrdir free range x 2.7 3.3 z 0.85 1.1
sel link attach zrdir free range x 2.7 3.3 z 0.85 1.1
sel link attach xrdir free range x -2.7 -3.3 z 0.85 1.1
sel link attach yrdir free range x -2.7 -3.3 z 0.85 1.1
sel link attach zrdir free range x -2.7 -3.3 z 0.85 1.1

apply szz=-119366 range x 3.7 8.7 z 0.85 0.95
apply szz=-119366 range x -3.7 -8.7 z 0.85 0.95
solve
save Capas13_381

```

```

apply remove szz range x 3.7 8.7 z 0.85 0.95
apply remove szz range x -3.7 -8.7 z 0.85 0.95

```

```

;Capa 14
model mech mohr range group Capa14
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa14
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 2.65 3.15 z 1.05 1.2

```

```
sel link net range x -2.65 -3.15 z 1.05 1.2
sel link attach xrdir free range x 2.65 3.15 z 1.05 1.35
sel link attach yrdir free range x 2.65 3.15 z 1.05 1.35
sel link attach zrdir free range x 2.65 3.15 z 1.05 1.35
sel link attach xrdir free range x -2.65 -3.15 z 1.05 1.35
sel link attach yrdir free range x -2.65 -3.15 z 1.05 1.35
sel link attach zrdir free range x -2.65 -3.15 z 1.05 1.35
```

```
apply szz=-119366 range x 3.6 8.6 z 1.05 1.2
apply szz=-119366 range x -3.6 -8.6 z 1.05 1.2
solve
save Capas14_381
```

```
apply remove szz range x 3.6 8.6 z 1.05 1.2
apply remove szz range x -3.6 -8.6 z 1.05 1.2
```

```
;Capa 15
model mech mohr range group Capa15
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa15
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 2.5 3.0 z 1.25 1.35
sel link net range x -2.5 -3.0 z 1.25 1.35
sel link attach xrdir free range x 2.5 3.0 z 1.2 1.55
sel link attach yrdir free range x 2.5 3.0 z 1.2 1.55
sel link attach zrdir free range x 2.5 3.0 z 1.2 1.55
sel link attach xrdir free range x -2.5 -3.0 z 1.2 1.55
sel link attach yrdir free range x -2.5 -3.0 z 1.2 1.55
sel link attach zrdir free range x -2.5 -3.0 z 1.2 1.55

apply szz=-119366 range x 3.4 8.4 z 1.25 1.35
apply szz=-119366 range x -3.4 -8.4 z 1.25 1.35
solve
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres

save Capas15_381
```

D5. Colocación y compactación capas de relleno estructural 16 a 20

```
restore Capas15_381
apply remove szz range x 3.4 8.4 z 1.25 1.35
apply remove szz range x -3.4 -8.4 z 1.25 1.35
```

```
;Capas compactadas 16-20
;Capa 16
model mech mohr range group Capa16
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa16
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
```

```
sel link net range x 2.25 2.7 z 1.4 1.7
sel link net range x -2.25 -2.7 z 1.4 1.7
sel link attach xrdir free range x 2.25 2.7 z 1.5 1.7
sel link attach yrdir free range x 2.25 2.7 z 1.5 1.7
sel link attach zrdir free range x 2.25 2.7 z 1.5 1.7
sel link attach xrdir free range x -2.25 -2.7 z 1.5 1.7
sel link attach yrdir free range x -2.25 -2.7 z 1.5 1.7
sel link attach zrdir free range x -2.25 -2.7 z 1.5 1.7
```

```
apply szz=-119366 range x 3.1 8.1 z 1.45 1.55
apply szz=-119366 range x -3.1 -8.1 z 1.45 1.55
solve
save Capas16_381
```

```
apply remove szz range x 3.1 8.1 z 1.45 1.55
apply remove szz range x -3.1 -8.1 z 1.45 1.55
```

```
;Capa 17
```

```
model mech mohr range group Capa17
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa17
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 2.2 2.4 z 1.65 1.75
sel link net range x -2.2 -2.4 z 1.65 1.75
sel link attach xrdir free range x 2.1 2.3 z 1.65 1.95
sel link attach yrdir free range x 2.1 2.3 z 1.65 1.95
sel link attach zrdir free range x 2.1 2.3 z 1.65 1.95
sel link attach xrdir free range x -2.1 -2.3 z 1.65 1.95
sel link attach yrdir free range x -2.1 -2.3 z 1.65 1.95
sel link attach zrdir free range x -2.1 -2.3 z 1.65 1.95
```

```
apply szz=-119366 range x 2.8 7.8 z 1.65 1.75
apply szz=-119366 range x -2.8 -7.8 z 1.65 1.75
solve
save Capas17_381
```

```
apply remove szz range x 2.8 7.8 z 1.65 1.75
apply remove szz range x -2.8 -7.8 z 1.65 1.75
```

```
;Capa 18
```

```
model mech mohr range group Capa18
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa18
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 1.9 2.1 z 1.85 1.95
sel link net range x -1.9 -2.1 z 1.85 1.95
sel link attach xrdir free range x 1.6 2.0 z 1.85 2.25
sel link attach yrdir free range x 1.6 2.0 z 1.85 2.25
sel link attach zrdir free range x 1.6 2.0 z 1.85 2.25
sel link attach xrdir free range x -1.6 -2.0 z 1.85 2.25
sel link attach yrdir free range x -1.6 -2.0 z 1.85 2.25
sel link attach zrdir free range x -1.6 -2.0 z 1.85 2.25
```

```
apply szz=-119366 range x 2.5 7.5 z 1.85 1.95
apply szz=-119366 range x -2.5 -7.5 z 1.85 1.95
solve
save Capas18_381
```

```
apply remove szz range x 2.5 7.5 z 1.85 1.95
apply remove szz range x -2.5 -7.5 z 1.85 1.95
```

```
;Capa 19
```

```
model mech mohr range group Capa19
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa19
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x 1.4 1.6 z 2.05 2.2
sel link net range x -1.4 -1.6 z 2.05 2.2
sel link attach xrdir free range x 1.3 1.6 z 2.15 2.65
sel link attach yrdir free range x 1.3 1.6 z 2.15 2.65
sel link attach zrdir free range x 1.3 1.6 z 2.15 2.65
sel link attach xrdir free range x -1.3 -1.6 z 2.15 2.65
sel link attach yrdir free range x -1.3 -1.6 z 2.15 2.65
sel link attach zrdir free range x -1.3 -1.6 z 2.15 2.65
```

```
apply szz=-119366 range x 2.0 7.0 z 2.05 2.2
apply szz=-119366 range x -2.0 -7.0 z 2.05 2.2
solve
save Capas19_381
```

```
apply remove szz range x 2.0 7.0 z 2.05 2.2
apply remove szz range x -2.0 -7.0 z 2.05 2.2
```

```
;Capa 20
```

```
model mech mohr range group Capa20
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa20
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
sel link net range x -1.2 1.2 z 2.15 2.4
sel link attach xrdir free range x -1.1 1.1 z 2.15 2.8
sel link attach yrdir free range x -1.1 1.1 z 2.15 2.8
sel link attach zrdir free range x -1.1 1.1 z 2.15 2.8
```

```
apply szz=-119366 range x 0.6 8 z 2.295 2.4
apply szz=-119366 range x -0.6 -8 z 2.295 2.4
solve
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres
```

```
save Capas20_381
```

D6. Colocación y compactación capas de relleno estructural 21 a 27 (Altura mínima de recubrimiento)

```
restore Capas20_381
apply remove szz range x 0.6 8.0 z 2.295 2.4
apply remove szz range x -0.6 -8.0 z 2.295 2.4
```

```
;Capa 21
model mech mohr range group Capa21
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa21
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
```

```
apply szz=-119366 range x -8.0 8.0 z 2.45 2.55
solve
save Capas21_381
```

```
apply remove szz range x -8.0 8.0 z 2.45 2.55
```

```
;Capa 22
model mech mohr range group Capa22
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa22
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
```

```
apply szz=-119366 range x -8.0 8.0 z 2.65 2.75
solve
save Capas22_381
```

```
apply remove szz range x -8.0 8.0 z 2.65 2.75
```

```
;Capa 23
model mech mohr range group Capa23
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa23
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0
```

```
apply szz=-119366 range x -8.0 8.0 z 2.85 2.95
solve
save Capas23_381
```

```
apply remove szz range x -8.0 8.0 z 2.85 2.95
```

```
;Capa 24
model mech mohr range group Capa24
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa24
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
```

fix y range y 140.0

apply szz=-119366 range x -8.0 8.0 z 3.05 3.15
solve
save Capas24_381

apply remove szz range x -8.0 8.0 z 3.05 3.15

;Capa 25
model mech mohr range group Capa25
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa25
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0

apply szz=-119366 range x -8.0 8.0 z 3.25 3.35
solve
save Capas25_381

apply remove szz range x -8.0 8.0 z 3.25 3.35

;Capa 26
model mech mohr range group Capa26
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa26
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0

apply szz=-119366 range x -8.0 8.0 z 3.45 3.55
solve
save Capas26_381

apply remove szz range x -8.0 8.0 z 3.45 3.55

;Capa 27
model mech mohr range group Capa27
prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 2.2e3 range group Capa27
fix x range x -70.0
fix x range x 70.0
fix y range y 0.0
fix y range y 140.0

apply szz=-119366 range x -8.0 8.0 z 3.65 3.75
solve

apply remove szz range x -8.0 8.0 z 3.65 3.75
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres

save Capas27_381

D7. Inclusión pila de acopio

;Stockpile

restore Capas27_381

delete zones range group Pila

gen zone cylinder size 40 10 8 p0 (0,70,13.7) p1 (54,70,13.7) p2 (0,70,3.7) ...

p3 (0,124,13.7) p4 (68,70,3.7) p5 (0,138,3.7) rat 1.05 1 1 group Pila

gen zone cylinder size 30 10 8 p0 (0,70,23.7) p1 (40.5,70,23.7) p2 (0,70,13.7) ...

p3 (0,110.5,23.7) p4 (54,70,13.7) p5 (0,124,13.7) rat 1.05 1 1 group Pila

gen zone cylinder size 20 10 8 p0 (0,70,33.7) p1 (27,70,33.7) p2 (0,70,23.7) ...

p3 (0,97,33.7) p4 (40.5,70,23.7) p5 (0,110.5,23.7) rat 1.05 1 1 group Pila

gen zone cylinder size 12 10 8 p0 (0,70,43.7) p1 (13.5,70,43.7) p2 (0,70,33.7) ...

p3 (0,83.5,43.7) p4 (27,70,33.7) p5 (0,97,33.7) rat 1.05 1 1 group Pila

gen zone cylinder size 8 10 8 p0 (0,70,53.7) p1 (0.1,70,53.7) p2 (0,70,43.7) ...

p3 (0,70.1,53.7) p4 (13.5,70,43.7) p5 (0,83.5,43.7) rat 1.05 1 1 group Pila

gen zone reflect dip 90 dd 90 range group Pila

gen zone reflect dip 90 dd 0 origin (0,70,3.7) range group Pila

gen merge

attach face

model mech mohr range group Pila

prop young 9.81e7 poisson 0.3 fric 37 dil 0 coh 2e3 dens 1.9e3 range group Pila

solve

sel recover surface surfx (1,0,0)

sel recover sres

save Stock2_381

D8. Inclusión bocas de alimentación

restore Stock2_381

;Bocas de alimentación

sel delete shell range x -1.5 1.5 y 51 60 z 2.1 2.35

sel delete shell range x -1.5 1.5 y 65 74 z 2.1 2.35

sel delete shell range x -1.5 1.5 y 79 88 z 2.1 2.35

model mech null range x -1.5 1.5 y 51 60 z 2.1 3.71

model mech null range x -1.5 1.5 y 65 74 z 2.1 3.71

model mech null range x -1.5 1.5 y 79 88 z 2.1 3.71

hist add id=2 sel recover sres Nx surfx (1,0,0) cid=5229 ;Mitad túnel por el costado

hist add id=3 sel recover sres Nx surfx (1,0,0) cid=16781 ;Lado superior primera boca

hist add id=4 sel recover sres Ny surfx (1,0,0) cid=7465 ;Esquina superior derecha primera boca

hist add id=5 sel recover sres Ny surfx (1,0,0) cid=7198 ;Lado derecho segunda boca

sel node apply force (0,0,-9016.3) range x -3.1 3.1 y -0.01 90 z 0.95 1.10

sel node apply force (0,0,-34063.7) range x -3.1 3.1 y -0.01 90 z 0.95 1.10

sel node apply force (0,0,-35167) range x -1.55 1.55 y 51 60 z 1.9 2.35

sel node apply force (0,0,-35167) range x -1.55 1.55 y 65 74 z 1.95 2.35

sel node apply force (0,0,-35167) range x -1.55 1.55 y 79 88 z 1.95 2.35

step 2500


```
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres
save Bocas2500_381
```

```
step 2500
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres
save Bocas5000_381
```

```
step 2500
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres
save Bocas7500_381
```

```
step 2500
sel recover surface surfx (1,0,0)
sel recover sres
```

```
save Bocas10000_381
```