

---

## Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivo General.....	3
1.2. Objetivos específicos .....	3
1.3. Alcances.....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Mecanismos de deterioro asociados al depósito de relaves .....	5
2.2. Depósito de relaves Mina Chépica .....	7
2.2.1. Depositación de relaves Mina Chépica .....	9
2.2.2. Embalse Mina Chépica .....	10
2.3. Consolidación de suelos y asentamientos en el tiempo .....	11
2.3.1. Tipos de consolidación .....	13
2.3.2. Nivel de preconsolidación en suelos .....	14
2.3.3. Velocidad de consolidación .....	16
2.3.4. Asentamientos por consolidación .....	17
2.4. Métodos numéricos y modelos constitutivos .....	21
2.4.1. Modelos elásticos .....	22
2.4.2. Modelos elastoplásticos .....	22
2.4.3. Modelo Mohr – Coulomb .....	24
2.4.4. Modelo Hardening Soil.....	24
2.4.5. Modelo constitutivo Cam Clay Modificado (MCC) .....	24
2.4.6. Modelo Soft – Soil.....	26
3. METODOLOGÍA .....	27
3.1. Levantamiento de información .....	27
3.2. Extracción de muestras en terreno .....	27
3.3. Ensayos para determinar la granulometría.....	29
3.4. Ensayo para determinar límites de Atterberg.....	30
3.4.1. Límite líquido .....	30
3.4.2. Límite plástico .....	30
3.5. Ensayo de consolidación.....	31
3.6. Estimación de asentamientos de manera analítica .....	31
3.6.1. SIGMA/W .....	32
3.6.2. MIDAS NTS NX.....	33

---

4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	34
4.1.	Caracterización de materiales en la zona del embalse de relaves Mina Chépica ..	34
4.1.1.	Clasificación de suelos .....	38
4.1.2.	Respuesta de los materiales al asentamiento .....	39
4.2.	Modelamiento del embalse de relaves Mina Chépica.....	56
4.2.1.	Selección de modelos constitutivos .....	56
4.3.	Modelamiento del embalse de relaves Mina Chépica.....	59
4.3.1.	Perfiles transversales MIDAS GTS NX.....	62
4.3.2.	Perfil longitudinal MIDAS GTS NX .....	70
4.3.3.	Perfiles transversales SIGMA/W .....	79
4.3.4.	Perfil longitudinal SIGMA/W .....	88
4.3.5.	Análisis comparativo entre softwares MIDAS GTS NX y SIGMA/W .....	97
5.	CONCLUSIONES .....	109
	RECOMENDACIONES .....	112
	REFERENCIAS .....	113
6.	ANEXOS.....	116
6.1.	Ensayos de clasificación de suelos .....	116
6.2.	Ensayos de consolidación de muestras .....	120
6.3.	Procedimiento estándar de cálculo de los índices de compresibilidad y descompresión .....	125
6.4.	Determinación del coeficiente de consolidación .....	127
6.5.	Determinación del módulo de elasticidad para materiales del sitio en estudio ...	129
6.5.1.	Validación del módulo de elasticidad .....	132
6.6.	Estimación analítica de asentamientos totales .....	135
6.7.	Licencias softwares de modelamiento numérico .....	137

---

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Agrietamiento ocasionado por asentamientos diferenciales dentro del cuerpo de la presa (Avendaño , 2018).....	5
Figura 2.2. Deterioro de la presa por consolidación en suelo de fundación, pérdida de revancha (Ferrer, 2006). .....	6
Figura 2.3. Fallas en el suelo de fundación del talud aguas abajo por sobreesfuerzos efectivos (Novak, 2001). .....	6
Figura 2.4. Vista en planta del depósito de relaves Mina Chépica (Sociedad Legal Minera Arno de los Muermos, 2003). .....	7
Figura 2.5. Vista satelital de Pencahue y ubicación de la Mina Chépica (Google Maps, 2019). .....	8
Figura 2.6. Vista satelital del depósito de relaves (Google Maps, 2019) .....	8
Figura 2.7. Sistema de descarga del depósito de relaves Mina Chépica (Google Maps, 2019). .....	9
Figura 2.8. Presa del embalse de relaves. ....	10
Figura 2.9. Método de construcción aguas abajo. ....	11
Figura 2.10. Gráfica de explicación de consolidación a través del tiempo (Das, 2013). ....	14
Figura 2.11. Gráfica representativa de un ensayo de consolidación, Índice de vacíos $v/s$ Presión efectiva (Das, 2013). .....	15
Figura 2.12. Procedimiento gráfico para obtener la presión de preconsolidación (Das, 2013). .....	16
Figura 2.13. Grado de consolidación $U$ , en función del factor de profundidad ( $zH_{dr}$ ) y factor de tiempo $T_v$ . .....	17
Figura 2.14. Variación del índice de vacíos en función del tiempo (escala log) bajo un incremento de carga dado (Das, 2013). .....	20
Figura 2.15. Presa del embalse de relaves Mina Chépica dividida un número discreto de elementos finitos, MIDAS GTS NX. ....	21
Figura 2.16. Gráfica esfuerzo - deformación de un material con comportamiento elástico (Lade, 2005). .....	22
Figura 2.17. Gráfica esfuerzo – deformación de un material con comportamiento elastoplástico (Lade, 2005). .....	23
Figura 2.18. Curvas representativas del modelo Cam Clay Modificado (Sánchez, 2016). ..	26
Figura 2.19. Gráfica de la superficie de fluencia del modelo Soft Soil; Mohr - Coulomb (traza roja) y Soft Soil (traza azul). .....	26
Figura 3.1. Vista satelital de los sitios desde donde se extrajeron las muestras. ....	28
Figura 3.2. Representación de los perfiles transversales y perfil longitudinal del embalse de relaves Mina Chépica. ....	32
Figura 3.3. Visualización del perfil transversal de la zona en estudio, SIGMA/W. ....	33
Figura 3.4. Visualización del perfil transversal de la zona en estudio, MIDAS GTS NX. ..	33
Figura 4.1. Mapa geológico de la zona de estudio Chépica (Rivas, 2015). ....	35
Figura 4.2. Columna estratigráfica de la zona de estudio Chépica (Rivas, 2015). .....	36

Figura 4.3. Suelo de fundación donde se emplaza el depósito de relaves (Elaboración propia). .....	37
Figura 4.4. Andesita en zona de lixiviación (Rivas, 2015).....	37
Figura 4.5. Columna estratigráfica de la zona de estudio: 1- Columna estratigráfica original; 2- Columna estratigráfica para el modelamiento.....	38
Figura 4.6. Probeta tipo para ensayos edométricos [Probeta M1-SF]. ....	40
Figura 4.7. Gráfica índice de vacíos vs esfuerzo vertical efectivo (escala logarítmica) de todas las probetas. ....	41
Figura 4.8. Gráfica de asentamientos vs tensión vertical efectiva para todas las probetas para el ciclo completo del ensayo edométrico.....	42
Figura 4.9. Gráfica de asentamientos vs tensión vertical efectiva para todas las probetas en el ciclo de compresión. ....	42
Figura 4.10. Gráfica de asentamientos vs tensión vertical efectiva para todas las probetas en el ciclo de descompresión. ....	43
Figura 4.11. Gráfica de asentamientos vs tensión vertical efectiva para todas las probetas en el ciclo de recompresión. ....	43
Figura 4.12. Gráfica índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para el suelo de fundación [M1-SF] por el método Casagrande. ....	45
Figura 4.13. Gráfica para obtener valores de $C_c$ y $C_s$ por el método de Terzaghi para el suelo de fundación [M1-SF]. ....	46
Figura 4.14. Gráfica que representa la deformación vs el tiempo para el suelo de fundación, a través del método de Casagrande.....	49
Figura 4.15. Gráfica que representa la deformación vs el tiempo para el suelo de fundación, a través del método de Taylor.....	51
Figura 4.16. Gráfica coeficiente de consolidación para los materiales presentes en sitio en estudio.....	52
Figura 4.17. Gráfica permeabilidad ( $k$ ) promedio para cada material.....	54
Figura 4.18. Dimensiones de la geometría de la zona de simulación.....	56
Figura 4.19. Asentamientos a través de modelamiento en MIDAS GTS NX. ....	58
Figura 4.20. Asentamientos a través de modelamiento en SIGMA/W. ....	59
Figura 4.21. Perfiles del embalse de relaves Mina Chépica. ....	62
Figura 4.22. Perfil transversal 1era etapa correspondiente al estribo derecho del depósito de relaves MIDAS GTS NX.....	63
Figura 4.23. Perfil transversal 1era etapa correspondiente al centro del depósito de relaves MIDAS GTS NX. ....	63
Figura 4.24. Perfil transversal 1era etapa correspondiente al estribo izquierdo del depósito de relaves MIDAS GTS NX.....	63
Figura 4.25. Perfil transversal 2da etapa correspondiente al estribo derecho del depósito de relaves MIDAS GTS NX.....	64
Figura 4.26. Perfil transversal 2da etapa correspondiente al centro del depósito de relaves MIDAS GTS NX. ....	64
Figura 4.27. Perfil transversal 2da etapa correspondiente al estribo izquierdo del depósito de relaves MIDAS GTS NX.....	64

Figura 4.28. Perfil transversal etapa final correspondiente al estribo derecho del depósito de relaves MIDAS GTS NX.....	65
Figura 4.29. Perfil transversal etapa final correspondiente al centro del depósito de relaves MIDAS GTS NX. ....	65
Figura 4.30. Perfil transversal etapa final correspondiente al estribo izquierdo del depósito de relaves MIDAS GTS NX. ....	66
Figura 4.31. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical estribo derecho, MIDAS GTS NX. ....	66
Figura 4.32. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical centro del depósito, MIDAS GTS NX. ....	67
Figura 4.33. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical estribo izquierdo, MIDAS GTS NX. ....	67
Figura 4.34. Gráfica de asentamientos de los perfiles transversales en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, MIDAS GTS NX. ....	68
Figura 4.35. Gráfica de la presión de poros de los perfiles transversales en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, MIDAS GTS NX. ....	69
Figura 4.36. Perfil longitudinal correspondiente a la primera etapa del depósito de relaves, MIDAS GTS NX. ....	70
Figura 4.37. Perfil longitudinal correspondiente a la segunda etapa del depósito de relaves, MIDAS GTS NX. ....	71
Figura 4.38. Perfil longitudinal correspondiente a la etapa final del depósito de relaves, MIDAS GTS NX. ....	71
Figura 4.39. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical del perfil longitudinal, MIDAS GTS NX. ....	72
Figura 4.40. Gráfica de asentamientos del perfil longitudinal en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, MIDAS GTS NX. ....	73
Figura 4.41. Gráfica de la presión de poros perfil longitudinal en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, MIDAS GTS NX. ....	74
Figura 4.42. Gráfica comparativa de los asentamientos en el estribo derecho entre ambos perfiles, MIDAS GTS NX. ....	75
Figura 4.43. Gráfica comparativa de la presión de poros en el estribo derecho entre ambos perfiles, MIDAS GTS NX. ....	76
Figura 4.44. Gráfica comparativa de los asentamientos en el centro del depósito entre ambos perfiles, MIDAS GTS NX. ....	77
Figura 4.45. Gráfica comparativa de la presión de poros en el centro del depósito entre ambos perfiles, MIDAS GTS NX. ....	77
Figura 4.46. Gráfica comparativa de los asentamientos en el estribo izquierdo entre ambos perfiles, MIDAS GTS NX. ....	78
Figura 4.47. Gráfica comparativa de la presión de poros en el estribo izquierdo entre ambos perfiles, MIDAS GTS NX. ....	79
Figura 4.48. Perfil transversal 1era etapa correspondiente al estribo derecho del depósito de relaves SIGMA/W. ....	80

Figura 4.49. Perfil transversal 1era etapa correspondiente al centro del depósito de relaves SIGMA/W. ....	80
Figura 4.50. Perfil transversal 1era etapa correspondiente al estribo izquierdo del depósito de relaves SIGMA/W. ....	81
Figura 4.51. Perfil transversal 2da etapa correspondiente al estribo derecho del depósito de relaves SIGMA/W. ....	81
Figura 4.52. Perfil transversal 2da etapa correspondiente al centro del depósito de relaves SIGMA/W. ....	82
Figura 4.53. Perfil transversal 2da etapa correspondiente al estribo izquierdo del depósito de relaves SIGMA/W. ....	82
Figura 4.54. Perfil transversal etapa final correspondiente al estribo derecho del depósito de relaves SIGMA/W. ....	83
Figura 4.55. Perfil transversal etapa final correspondiente al centro del depósito de relaves SIGMA/W. ....	83
Figura 4.56. Perfil transversal etapa final correspondiente al estribo izquierdo del depósito de relaves SIGMA/W. ....	83
Figura 4.57. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical estribo derecho, SIGMA/W. ....	84
Figura 4.58. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical centro del depósito, SIGMA/W. ....	84
Figura 4.59. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical estribo izquierdo, SIGMA/W. ....	85
Figura 4.60. Gráfica de asentamientos de los perfiles transversales en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, SIGMA/W. ....	86
Figura 4.61. Gráfica de la presión de poros de los perfiles transversales en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, SIGMA/W. ....	86
Figura 4.62. Perfil longitudinal correspondiente a la primera etapa del depósito de relaves SIGMA/W. ....	88
Figura 4.63. Perfil longitudinal correspondiente a la segunda etapa del depósito de relaves SIGMA/W. ....	89
Figura 4.64. Perfil longitudinal correspondiente a la etapa final del depósito de relaves SIGMA/W. ....	89
Figura 4.65. Nodos seleccionados para la estimación de desplazamiento vertical del perfil longitudinal, SIGMA/W. ....	90
Figura 4.66. Gráfica de asentamientos del perfil longitudinal en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, SIGMA/W. ....	91
Figura 4.67. Gráfica de la presión de poros perfil longitudinal en todas las etapas del depósito de relaves Mina Chépica, SIGMA/W. ....	91
Figura 4.68. Gráfica comparativa de asentamientos del estribo derecho entre ambos perfiles, SIGMA/W. ....	93
Figura 4.69. Gráfica comparativa de la presión de poros en el estribo derecho entre ambos perfiles, SIGMA/W. ....	93

Figura 4.70. Gráfica comparativa de asentamientos del centro del depósito entre ambos perfiles, SIGMA/W. ....	94
Figura 4.71. Gráfica comparativa de la presión de poros en el centro del depósito entre ambos perfiles, SIGMA/W. ....	95
Figura 4.72. Gráfica comparativa de asentamientos del estribo izquierdo entre ambos perfiles, SIGMA/W. ....	96
Figura 4.73. Gráfica comparativa de la presión de poros en el estribo izquierdo entre ambos perfiles, MIDAS GTS NX. ....	96
Figura 4.74. Gráfica comparativa de los asentamientos en el perfil transversal del estribo derecho, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	98
Figura 4.75. Gráfica comparativa de la presión de poros en el perfil transversal del estribo derecho, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	99
Figura 4.76. Gráfica comparativa del desplazamiento vertical en el perfil transversal del centro del depósito, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	100
Figura 4.77. Gráfica comparativa de la presión de poros en el perfil transversal del centro del depósito, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	100
Figura 4.78. Gráfica comparativa del desplazamiento vertical en el perfil transversal del estribo izquierdo, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	101
Figura 4.79. Gráfica comparativa de la presión de poros en el perfil transversal del estribo izquierdo, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	102
Figura 4.80. Gráfica comparativa del desplazamiento vertical en el perfil longitudinal del estribo derecho, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	103
Figura 4.81. Gráfica comparativa de la presión de poros en el perfil longitudinal del estribo derecho, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	104
Figura 4.82. Gráfica comparativa del desplazamiento vertical en el perfil longitudinal del centro del depósito, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	105
Figura 4.83. Gráfica comparativa de la presión de poros en el perfil longitudinal del centro del depósito, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	105
Figura 4.84. Gráfica comparativa del desplazamiento vertical en el perfil longitudinal del estribo izquierdo, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	106
Figura 4.85. Gráfica comparativa de la presión de poros en el perfil longitudinal del estribo izquierdo del depósito, MIDAS GTS NX v/s SIGMA/W. ....	107
Figura 6.1. Gráfica ejemplificativa para obtener valores de $C_c$ y $C_s$ por el método de Terzaghi para el suelo de fundación [M1-SF]. ....	126
Figura 6.2. Gráfica que representa la deformación vs el tiempo para el suelo de fundación, a través del método de Casagrande. ....	127
Figura 6.3. Gráfica que representa la deformación vs el tiempo para el suelo de fundación, a través del método de Taylor. ....	128
Figura 6.4. Gráfica del módulo de elasticidad suelo de fundación en el tramo de recompresión. ....	129
Figura 6.5. Gráfica del módulo de elasticidad pie de muro en el tramo de recompresión. ....	130
Figura 6.6. Gráfica del módulo de elasticidad muro coronamiento en el tramo de recompresión. ....	130

---

Figura 6.7. Gráfica del módulo de elasticidad muro relave cercano a laguna de aguas claras en el tramo de carga.....	131
Figura 6.8. Gráfica del módulo de elasticidad muro relave cercano a la presa del embalse en el tramo de carga.....	131
Figura 6.9. Modelación estándar para las 5 muestras ensayadas en laboratorio, SIGMA/W. ....	132
Figura 6.10. Gráfica comparativa de la deformación de la pastilla asociada suelo de fundación, SIGMA/W y ensayo edométrico .....	133
Figura 6.11. Gráfica comparativa de la deformación de la pastilla asociada al pie de muro, SIGMA/W y ensayo edométrico .....	133
Figura 6.12. Gráfica comparativa de la deformación de la pastilla asociada al coronamiento del muro, SIGMA/W y ensayo edométrico. ....	134
Figura 6.13. Gráfica comparativa de la deformación de la pastilla asociada a las cercanías de la laguna de aguas claras del embalse, SIGMA/W y ensayo edométrico.....	134
Figura 6.14. Gráfica comparativa de la deformación de la pastilla asociada a las cercanías de la presa del embalse, SIGMA/W y ensayo edométrico.....	135
Figura 6.15. Licencia Geostudio 2012 (SIGMA/W).....	137
Figura 6.16. Licencia MIDAS GTS NX.....	138

## Índice de Tablas

Tabla 3.1. Valores de parámetros requeridos por la modelación numérica aportados por estudios preexistentes. ....	27
Tabla 3.2. Tabla de datos respectiva de las muestras extraídas en terreno.....	28
Tabla 3.3. Serie de tamices para ensayos de granulometría (ASTM D 2487, 2011). ....	29
Tabla 4.1. Tabla resumen de resultados ensayos de granulometría, gravedad específica y límites de Atterberg. ....	39
Tabla 4.2. Propiedades de las probetas sometidas a ensayos edométricos. ....	40
Tabla 4.3. Tabla base de ensayos de consolidación, con incrementos de carga de 25 kPa para la probeta que representa el suelo de fundación [M1-SF].....	41
Tabla 4.4. Tabla resumen esfuerzo de preconsolidación para cada material presente en la zona de estudio.....	45
Tabla 4.5. Tabla resumen de los valores obtenidos de $C_c$ y $C_s$ para todos los materiales de la zona de estudio. ....	46
Tabla 4.6. Tabla resumen del cálculo de OCR para todos los materiales presentes en la zona de estudio.....	47
Tabla 4.7. Tabla resumen de los valores de coeficiente de consolidación para todos los materiales del sitio de estudio.....	51
Tabla 4.8. Valores del coeficiente de consolidación y módulo de deformación volumétrico. ....	54



---

Tabla 4.9. Valores de permeabilidad para cada material.....	54
Tabla 4.10. Tabla resumen de parámetros obtenidos de los ensayos realizados. ....	55
Tabla 4.11. Valores de los parámetros utilizados en la modelación numérica obtenidos del levantamiento de información, literatura y caracterización de los materiales.....	57
Tabla 4.12. Tabla comparativa de métodos de cálculo de asentamientos del caso en estudio. ....	59
Tabla 4.13. Parámetros del suelo de fundación, modelo Cam Clay Modificado. ....	60
Tabla 4.14. Parámetros de las etapas constructivas de la presa, Hardening Soil. ....	60
Tabla 4.15. Parámetros del material de relaves, Hardening Soil.....	61
Tabla 4.16. Parámetros de la roca bajo el suelo de fundación, modelo Elástico.....	61
Tabla 4.17. Desplazamiento vertical del depósito de relaves en los perfiles transversales del depósito de relaves Mina Chépica, MIDAS GTS NX.....	67
Tabla 4.18. Desplazamiento vertical del depósito de relaves en el perfil longitudinal del depósito de relaves Mina Chépica, MIDAS GTS NX.....	72
Tabla 4.19. Tabla comparativa del desplazamiento vertical entre perfiles para el estribo derecho.....	75
Tabla 4.20. Tabla comparativa del desplazamiento vertical entre perfiles para el centro del depósito.....	76
Tabla 4.21. Tabla comparativa del desplazamiento vertical entre perfiles para el estribo izquierdo. ....	78
Tabla 4.22. Desplazamiento vertical del depósito de relaves en los perfiles transversales del depósito de relaves Mina Chépica, SIGMA/W. ....	85
Tabla 4.23. Desplazamiento vertical del depósito de relaves en el perfil longitudinal del depósito de relaves Mina Chépica, SIGMA/W. ....	90
Tabla 4.24. Tabla comparativa del desplazamiento vertical entre perfiles para el estribo izquierdo. ....	92
Tabla 4.25. Tabla comparativa del desplazamiento vertical entre perfiles para el centro del depósito.....	94
Tabla 4.26. Tabla comparativa del desplazamiento vertical entre perfiles para el estribo derecho del depósito. ....	95
Tabla 4.27. Tabla comparativa del desplazamiento vertical en perfiles transversales. ....	98
Tabla 4.28. Tabla comparativa del desplazamiento vertical en el perfil longitudinal. ....	103
Tabla 6.1. Curva granulométrica para la muestra de suelo de fundación del embalse de relaves.....	116
Tabla 6.2. Curva granulométrica para la muestra del pie de presa del embalse de relaves. ....	116
Tabla 6.3. Curva granulométrica para la muestra del coronamiento de la presa del embalse de relaves. ....	117
Tabla 6.4. Curva granulométrica para la muestra de relave cercana a la laguna de aguas claras. ....	117
Tabla 6.5. Curva granulométrica para la muestra de relave cercana a la presa del embalse de relaves.....	118
Tabla 6.6. Límites de Atterberg para la muestra del suelo de fundación .....	118

---

Tabla 6.7. Límites de Atterberg para la muestra del pie de presa del embalse de relaves. ....	119
Tabla 6.8. Límites de Atterberg para la muestra del coronamiento de la presa del embalse de relaves. ....	119
Tabla 6.9. Ensayo de consolidación para la muestra de suelo de fundación. ....	120
Tabla 6.10. Ensayo de consolidación para la muestra del pie de presa del embalse de relaves. ....	121
Tabla 6.11. Ensayo de consolidación para la muestra del coronamiento de la presa del embalse de relaves. ....	122
Tabla 6.12. Ensayo de consolidación para la muestra del relave obtenido de las cercanías de la laguna de aguas claras. ....	123
Tabla 6.13. Ensayo de consolidación para la muestra del relave obtenido de las cercanías de la presa del embalse de relaves. ....	124