

## Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general .....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Teoría Clásica de Consolidación de Suelos.....	4
3.2. Consolidación por aplicación de vacío .....	6
3.3. Técnicas de aplicación de consolidación por vacío.....	8
3.4. Soluciones analíticas axisimétricas para drenes verticales y aplicación de vacío .....	10
3.5. Modelo constitutivo Cam-Clay Modificado (MCCM) .....	19
3.6. Casos de aplicación de método de consolidación por vacío .....	20
3.7. Consolidación en tranques de relaves .....	33
4. CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE INTEGRAL.....	35
4.1. Relave integral del tranque de Ovejería.....	35
4.2. Ensayos de consolidación .....	35
4.3. Ensayos de permeabilidad a carga variable y con pared flexible para muestras estructuradas y secas .....	43
4.4. Índice de vacío inicial para asentamientos máximos de soluciones analíticas .....	46
4.5. Pendiente de línea de estado último (M).....	48
5. MODELO EXPERIMENTAL DE CONSOLIDACIÓN POR VACÍO .....	50
5.1. Elementos y especificaciones del modelo experimental .....	50
5.2. Depositación de la pulpa.....	57
5.3. Ensayos de consolidación por vacío .....	57
6. MODELAMIENTO NUMÉRICO CON ELEMENTOS FINITOS .....	58

6.1.	Software Abaqus de Elementos Finitos .....	58
6.2.	Modelamiento numérico de ensayos de consolidación .....	58
6.3.	Calibración de parámetros de compresibilidad .....	62
6.4.	Calibración de la permeabilidad.....	67
6.5.	Modelamiento numérico del modelo experimental .....	70
7.	RESULTADOS.....	75
7.1.	Ensayo de consolidación por vacío en columna de modelo experimental.....	75
7.2.	Modelación numérica del ensayo de consolidación por vacío en columna del modelo experimental y soluciones analíticas .....	76
7.3.	Discusión de resultados.....	79
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
8.1.	Conclusiones.....	88
8.2.	Recomendaciones.....	90
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	ANEXOS.....	95
A.	Ensayos edométricos para ambos tipos de muestras .....	96
B.	Calibración Permeabilidad.....	113
C.	Ajustes Ensayos de Perméametro a carga variable y pared flexible .....	121
D.	Código Abaqus para ensayo de consolidación por vacío.....	125

## Índice de Tablas

Tabla 1: Resumen de proyectos de mejoramiento de suelos utilizando la técnica del método de consolidación por vacío (Modificado de Griffin et al. 2014) .....	21
Tabla 2: Perfiles de suelos para cada subdivisión del área S3A (Indraratna et al. 2011). .....	23
Tabla 3: Perfil típico simplificado en zona de estudio de consolidación por vacío (Osorio et al. 2010). .....	30
Tabla 4: Resumen de propiedades índice del relave integral. ....	36
Tabla 5: Características iniciales de probetas para ensayos edométricos.....	38
Tabla 6: Etapas de carga y descarga efectuadas en los ensayos edométricos.....	39
Tabla 7: Características iniciales de las probetas depositadas como pulpa para los ensayos de consolidación.....	41
Tabla 8: Características de las probetas talladas y tubo capilar para ensayos de permeabilidad. ....	45
Tabla 9: Resultados de conductividad hidráulica a partir de método de permeámetro a carga variable y con pared flexible.....	46
Tabla 10: Resumen de propiedades de probetas utilizadas para cálculo de índice de vacíos inicial. ....	47
Tabla 11: Parámetros utilizados para el cálculo de asentamientos en ensayos con aplicación de vacío.....	48
Tabla 12: Características bomba de vacío utilizada en modelo experimental (Catalogo Busch Miniseco SV/SD 1002-1006B) .....	51
Tabla 13: Resumen de depositaciones para ensayos de consolidación por vacío. ....	57
Tabla 14: Condiciones de borde aplicadas en paso inicial del modelo numérico de ensayos edométricos. ....	60

Tabla 15: Valores de permeabilidad con menor error cuadrático medio para cada probeta tallada.....	68
Tabla 16: Valores de permeabilidad con menor error cuadrático medio para cada probeta. ....	70
Tabla 17: Condiciones de borde aplicadas en paso inicial del modelo numérico de consolidación por vacío.....	72
Tabla 18: Parámetros de compresibilidad obtenidos a partir de calibraciones para ambos tipos de muestras.....	76
Tabla 19: Valores de conductividad hidráulica obtenidos para ambos tipos de muestras. ....	77
Tabla 20: Historial de carga y tiempo de duración para modelos numéricos de aplicación de sobrecarga.....	86

## Índice de Figuras

Figura 3.1: Analogía del resorte para método de consolidación con a) aplicación de sobrecarga con relleno y b) aplicación de carga de vacío (Modificado de Chu et al. 2005). .....	5
Figura 3.2: Consolidación convencional por medio de un terraplén y drenes verticales (Modificado de Budhu, 2011) .....	6
Figura 3.3: Mecanismos de aplicación de carga de vacío: a) Sistemas con membranas; b) Sistemas sin membranas (Geng et al, 2010). .....	9
Figura 3.4: Conexión de mecha drenante y tuberías para transmisión de vacío (Seah et al, 2006) .....	9
Figura 3.5: Distribución lineal de vacío para modelación axisimétrica de un PVD (Indraratna et al, 2007).....	10
Figura 3.6: Relación de espaciamiento y diámetro de influencia de un dren según patrón de colocación (Rixner et al. 1986).....	13
Figura 3.7: Esquema de colocación de PVDs para técnica de consolidación por vacío en un sistema sin membranas (Cofra, 2014) .....	14
Figura 3.8: Generación de zona alterada por colocación de PVDs (Cofra, 2014).....	14
Figura 3.9: Aproximación para el cálculo de diámetros de zonas alteradas y no alteradas (Rixner et al, 1986).....	15
Figura 3.10: Influencia de razón $q_w/k_h$ en el tiempo de consolidación (Jamiolkowski et al. 1983). .....	16
Figura 3.11: Influencia del largo de PVD en el tiempo de consolidación (Jamiolkowski et al. 1983). .....	16
Figura 3.12: Variación tiempo de consolidación de a) Sin efectos, b) Efecto de espaciamiento, c) Efecto de espaciamiento + “Well resistance” y d) Efecto de espaciamiento + “Well resistance” + zona alterada.....	18

Figura 3.13: Curvas representativas del modelo constitutivo Cam-Clay Modificado: a) Curvas de carga y descarga, b) Línea de Estado Último (Plaxis (2008) modificado).....	20
Figura 3.14: Mapa de la extensión del puerto de Brisbane y sitio S3A con su plan de instrumentación (Indraratna et al. 2011).....	22
Figura 3.15: Etapas de carga, asentamientos superficiales y reducción de presión de poros para subdivisiones WD2 y VC2 (Indraratna et al. 2011).....	24
Figura 3.16: Desplazamientos laterales normalizados con el total de carga aplicada para el caso de aplicación de vacío (VC1) y para la combinación de esta técnica con la sobrecarga (WD3) (Indraratna et al. 2011) .....	25
Figura 3.17: Propiedades de resistencia al corte no drenado promedio y parámetros de compresibilidad de los suelos a mejorar (Indraratna et al. 2005b).....	26
Figura 3.18: Esquema de terraplén TV2 y su plan de monitoreo (Indraratna et al. 2005b).....	27
Figura 3.19: Historial de carga de a) vacío en superficie y b) sobrecarga durante 160 días (Indraratna et al. 2005b). .....	27
Figura 3.20: a) Asentamientos total medidos en terreno y obtenidos con modelos numéricos, b) Variación de presión de poros medida en terreno (medido a 3 metros de profundidad y 0,5 metros horizontalmente desde el centro del terraplén) y obtenidos con modelos numéricos (Indraratna et al. 2005b). .....	28
Figura 3.21: Asentamientos a tres profundidades distintas medidos en terreno y obtenidos con el modelo numérico B (Indraratna et al. 2005b). .....	29
Figura 3.22: Sección transversal de sistema de aplicación de vacío (Osorio et al. 2010).....	31
Figura 3.23: Vista en planta de sistema de aplicación de vacío: a) Sistema de distribución horizontal de la carga, b) Instrumentación en el área de estudio (Osorio et al. 2010). .....	31
Figura 3.24: Asentamientos a distintos niveles de profundidad para ambos casos de espaciamiento (Osorio et al. 2010) .....	32

Figura 3.25: Reducción de presión de poros a distintas profundidades para a) $s=0,85m$ y b) $s=1,2m$ (Osorio et al. 2010). .....	32
Figura 4.1: Contenedor utilizado para las muestras depositadas (Conejera, 2016).....	37
Figura 4.2: Muestras obtenidas a partir de dos ciclos de depositación: a) Altura de las capas una vez abierto el contenedor y b) Bloques para tallado de muestras (Modificado de Conejera, 2016). .....	37
Figura 4.3: M: Muestras obtenidas a partir de tres ciclos de depositación: a) Altura de las capas una vez abierto el contenedor y b) Bloques para tallado de muestras (Modificado de Conejera, 2016). .....	37
Figura 4.4: Probeta tipo para ensayos edométricos. ....	38
Figura 4.5: Deformación vertical vs. tiempo de la probeta 1 en escala semilogarítmica (Carga). .....	39
Figura 4.6: Deformación vertical vs. tiempo de la probeta 1 en escala semilogarítmica (Descarga).....	40
Figura 4.7: Índice de vacíos alcanzado en cada etapa de carga y descarga (normalizado) vs. tensión vertical aplicada para muestras talladas. ....	40
Figura 4.8: Deformación vertical vs. tiempo de la probeta 1, en escala semilogarítmica (Carga). .....	42
Figura 4.9: Deformación vertical vs. tiempo de la probeta 1, en escala semilogarítmica (Descarga).....	42
Figura 4.10: Índice de vacíos alcanzado en cada etapa de carga y descarga (normalizado) vs. tensión vertical aplicada para muestras depositadas. ....	43
Figura 4.11: Equipo utilizado en ensayos de permeabilidad a carga variable y pared flexible... ..	44
Figura 4.12: Probetas para ensayos de permeabilidad: a) Probeta 1, con capa superior de finos y b) Probeta 2, sin capa superior de finos. ....	44

Figura 4.13: Ajuste exponencial para la obtención de permeabilidad a partir de ensayos de permeabilidad a carga variable y pared flexible para el ensayo 1 de la probeta 2.....	46
Figura 4.14: Muestras talladas para cálculo de índice de vacíos inicial: a) Probeta 5: Obtenida a partir de la muestra de dos ciclos de depositación, capa superior (Zona 1, Figura 4.2) y b) Probeta 6: Obtenida a partir de la muestra de tres ciclos de depositación, capa inferior (Zona 6, Figura 4.3). .....	47
Figura 4.15: $q_{ult}$ vs. $p'_{ult}$ para ensayos de Conejera (2016) y aproximación de variable M por medio del trazado de regresión lineal. ....	49
Figura 5.1: Equipo experimental para la aplicación de consolidación por vacío. En la imagen se muestra: 1) Bomba de vacío, 2) Trampas de agua, 3) Válvula reguladora de vacío, 4) Válvula selladora de vacío, 5) Vacuómetro, 6) Contenedor cilíndrico de suelo depositado, 7) dren, 8) Tapa hermética superior, 9) Diales, 10) Panel piezométrico y 11) Mangueras reforzadas con tejido de fibras flexibles.....	50
Figura 5.2: a) Bomba generadora de vacío marca BUSCH, modelo SV 1006 B, b) Trampas de agua y válvula reguladora de vacío y c) Válvula selladora y vacuómetro.....	52
Figura 5.3: Contenedor cilíndrico de suelo depositado y dren utilizado para transmitir la succión en la profundidad de la columna de relaves.....	54
Figura 5.4: Tapa hermética superior e instalación de diales para registrar deformación vertical e Instalación de piezómetros al interior del contenedor.....	55
Figura 5.5: Panel piezométrico utilizado para registrar la presión de poros.....	56
Figura 6.1: Conjunto de elementos 2D correspondientes al modelo físico de una probeta de ensayos edométricos.....	59
Figura 6.2: Calibración de parámetros de compresibilidad en escala normal.....	63
Figura 6.3: Calibración de parámetros de compresibilidad en escala semilogarítmica.....	64
Figura 6.4: Cálculo de pendiente de carga modelado con Abaqus a partir de ensayos edométricos.....	64



Figura 6.5: Calibración de parámetros de compresibilidad en escala normal.....	65
Figura 6.6: Calibración de parámetros de compresibilidad en escala semilogarítmica.....	66
Figura 6.7: Cálculo de pendiente de carga modelado con Abaqus a partir de ensayos edométricos.....	66
Figura 6.8: Comparación de resultados para distintas permeabilidades con valores obtenidos en laboratorio para probeta 2, tensión vertical de 0,1 kgf/cm <sup>2</sup> , en escala semilogarítmica. ....	68
Figura 6.9: Error cuadrático medio vs. permeabilidad para las 4 probetas talladas.....	68
Figura 6.10: Comparación de resultados para distintas permeabilidades con valores obtenidos en laboratorio para probeta 1, tensión vertical de 0,1 kgf/cm <sup>2</sup> , en escala semilogarítmica. ....	69
Figura 6.11: Error cuadrático medio vs. permeabilidad para las 4 probetas depositadas.....	70
Figura 6.12: Conjunto de elementos axisimétricos del modelo numérico para la simulación de los ensayos con aplicación de vacío.....	71
Figura 6.13: Selección de nodos representativos del dren.....	74
Figura 7.1: Deformación vertical, historial de carga y agua recolectada en los ensayos de consolidación por vacío realizados con el modelo experimental.....	75
Figura 7.2: Registro en panel piezométrico para los ensayos de consolidación por vacío.....	76
Figura 7.3: Resultados de deformación vertical para modelos analíticos y numéricos evaluados con los parámetros de compresibilidad de las muestras depositadas, en contraste con los resultados experimentales.....	77
Figura 7.4: Resultados de deformación vertical para modelos analíticos y numéricos evaluados con los parámetros de compresibilidad de las muestras talladas en contraste con los resultados experimentales.....	78
Figura 7.5: Resultados de disipación de presión de poros para soluciones analíticas y modelo numérico para la altura de los cuatro piezómetros.....	79

Figura 7.6: Resultados de deformación vertical para modelos numéricos de aplicación de vacío y sobrecargas de 75 kPa y 80 kPa ( $k= 6 \times 10^{-8}$  m/s)..... 87