

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONTEXTO GENERAL.....	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2.3. METODOLOGÍA.....	3
1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. SUELOS GRANULARES.....	5
2.2. COMPRESIBILIDAD EN SUELOS GRANULARES	5
2.2.1. PROPIEDADES INTRÍNSECAS Y DE ESTADO QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE SUELOS GRANULARES Y SU EFECTO EN LA COMPRESIBILIDAD.....	5
2.3. ROTURA DE PARTÍCULAS	9
2.3.1. FACTORES QUE AFECTAN EN LA ROTURA DE PARTÍCULAS EN SUELOS GRANULARES.....	9
2.4. CUANTIFICADORES DE ROTURA DE PARTÍCULAS.....	15
2.5. EFECTO DEL CONTENIDO DE FINOS EN SUELOS GRANULARES.....	16
3. EQUIPOS, SUELO ENSAYADO Y METODOLOGÍA	20
3.1. TRIAXIAL DE ALTAS PRESIONES.....	20
3.2. SUELO ENSAYADO.....	22
3.2.1. CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO ENSAYADO	22
3.2.2. DESCRIPCIÓN MINERALOGICA DEL RELAVE ORIGINAL.....	24
3.3. METODOLOGÍA DE UN ENSAYO	25
3.3.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	25
3.3.2. CONSOLIDACIÓN ISOTROPA	26
3.3.3. EVALUACIÓN DEL INDICE DE VACIOS FINAL	26
3.3.4. ANÁLISIS POST ENSAYOS.....	27
3.4. PROGRAMA DE ENSAYOS.....	27
4. TRABAJOS REALIZADOS EN EL EQUIPO TRIAXIAL DE ALTAS PRESIONES.	30
4.1. RESUMEN.....	30
4.2. INTRODUCCIÓN.....	30
4.3. RESUMEN DE TRABAJOS REALIZADOS EN EL EQUIPO TRIAXIAL DE ALTAS PRESIONES, EN EL LABORATORIO DE SOLIDOS Y MEDIOS PARTICULADOS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE	30
4.3.1. EQUIPO TRIAXIAL MONÓTONO Y CÍCLICO DE ALTAS PRESIONES Y SU APLICACIÓN EN ARENAS DE RELAVE.....	30

4.3.2.	RESPUESTA CÍCLICA DE ARENA DE RELAVES EN UN AMPLIO RANGO DE PRESIONES.....	31
4.3.3.	EFEECTO ACOPLADO DE LA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO Y EL CORTE ESTÁTICO INICIAL EN LA RESISTENCIA CÍCLICA DE ARENA DE RELAVES.....	32
4.3.4.	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y ROTURA DE PARTÍCULAS DE MATERIALES QUEBRADOS DEL PROYECTO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEO (PMCHS) USANDO EL MÉTODO DE GRADACIÓN PARALELA.....	33
4.3.5.	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y ROTURA DE PARTÍCULAS BAJO COMPRESIÓN TRIAXIAL CID DE MEZCLA DE MATERIALES GRANULARES DE DISTINTA RESISTENCIA APLICADO A MINERÍA DE BLOCK CAVING.....	34
5.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
5.1.	RESUMEN.....	36
5.2.	INTRODUCCIÓN.....	36
5.3.	MATERIALES, METODOLOGIA Y EQUIPOS UTILIZADOS	37
5.3.1.	MATERIALES.....	37
5.3.2.	METODOLOGIA.....	38
5.3.3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
5.4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	42
5.4.1.	VARIACIÓN DE ÍNDICE DE VACÍOS DURANTE CONSOLIDACIÓN	42
5.4.2.	ROTURA DE PARTICULAS	47
5.5.	DISCUSION.....	57
5.5.1.	VARIACIÓN DEL INDICE DE VACIOS DURANTE CONSOLIDACIÓN	57
5.5.2.	ROTURA DE PARTICULAS	67
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
6.1.	CONCLUSIONES.....	70
6.2.	RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS.....	71
7.	BIBLIOGRAFÍA	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Influencia de la densidad relativa en el ángulo de fricción. Resumen de resultados de Al-Hussaini, (Dorador, 2010).....	7
Figura 2 Clasificación de forma de partículas Krumbein and Sloss (1963)	8
Figura 3 Influencia del tamaño de partículas en el índice de vacíos para suelos con el mismo coeficiente de uniformidad (Lambe, 2008).	9
Figura 4 Efecto del tamaño máximo y de la gradación en la rotura de partículas en muestras de granito generada en ensayos de consolidación isótropa (Lee and Farhoomand, 1967).....	10
Figura 5 Ensayo de resistencia individual de partículas de arena de Aio: a) Partícula redondeada y b) partícula angulosa (Nakata, 1999)	11
Figura 6 Representación gráfica del punto de fluencia (Nakata, 2001)	12
Figura 7 Fases de compresión en consolidaciones unidimensionales a presiones extremadamente altas en materiales granulares (Hagerty, 1993).....	12
Figura 8 Relación entre el cambio volumétrico y el esfuerzo principal mayor en consolidaciones anisótropas: a) arena gruesa angular y b) arena gruesa subredondeada (Lee and Harhoomand, 1967)	13
Figura 9 Distribución granulométrica inicial y post consolidación isótropa en muestras de arenas de Cambria a diferentes densidades: a) Presión de confinamiento 25 MPa y b) Presión de confinamiento 60MPa (Ensayos por Bopp and Lade, 1997).....	14
Figura 10 Efecto de la resistencia de las partículas en ensayos de compresión unidimensional: a) índice de vacíos inicial igual al máximo b) índice de vacíos inicial 0.75-0.84 (Nakata, 1999)	14
Figura 11 Rotura total (Hardin, 1985).....	16
Figura 12 Potencial de rotura (Hardin, 1985)	16
Figura 13 Esquema de arena suelta con finos. A la izquierda se muestra el suelo antes de ensayar, a la derecha se muestra la estructura post ensayo (Yamamuro and Lade, 1997)	16
Figura 14 Índices de vacíos máximos y mínimos de arena de Cambria con finos de Nevada (Cubrinovski & Ishihara, 2002).....	17
Figura 15 Variación del rango entre índices de vacíos máximo y mínimo con el contenido de finos (Cubrinovski & Ishihara, 2002)	18
Figura 16 Diagrama de fase mostrando el concepto de índice de vacíos intergranular e_g y el índice de vacíos granular equivalente e^* (Misko Cubrinovski & Rees, 2008)	18
Figura 17 Clasificación de índice de vacíos intergranulares para arenas con distintos contenidos de finos (Thevanayagam, 2002)	19
Figura 18 Componentes del equipo triaxial de altas presiones (Maureira, 2012).....	21
Figura 19 Ubicación mina El Soldado (Google Maps)	22
Figura 20 Sector de extracción de la arena ensayada (Vargas, 2015)	22
Figura 21 Distribución granulométrica arena de relaves El Torito con 1%, 5%, 10% y 20% de contenido de finos.....	23
Figura 22 Resultados de hidrometría de arena de relave El Torito con 12% de contenido de finos con respecto al total.	23
Figura 23 Relave tranque El Torito lavado, contenido de finos 1%, arena base de este estudio.	24
Figura 24 Arena de relaves proveniente del tranque de relaves El Torito, 1% de contenido de finos con respecto a la arena.	38
Figura 25 Índices de vacíos máximos y mínimos de arena de relave del tranque El Torito, para un amplio rango de diferentes dosificaciones de contenido de finos con respecto a la arena. ..	42
Figura 26 Consolidaciones isótropas con un contenido de finos de 1% y 5%, para las densidades relativas de 15%, 65% y 90% - escala aritmética y logarítmica.....	43
Figura 27 Consolidaciones isótropas con un contenido de finos de 10% y 20%, para las densidades relativas de 15%, 65% y 90% - escala aritmética y logarítmica.....	43

Figura 28 Curvas de consolidación normalizadas por el índice de vacíos inicial de las arenas de relave de densidad relativa 15% con contenido de finos 1%, 5%, 10% y 20%, y la arena de Ottawa en su estado más suelto (Maureira, 2012) - Escala aritmética y logarítmica.	44
Figura 29 Curvas de consolidación normalizadas por el índice de vacíos inicial de las arenas de relave de densidad relativa 65% con contenido de finos 1%, 5%, 10% y 20% - Escala aritmética y logarítmica.	44
Figura 30 Curvas de consolidación normalizadas por el índice de vacíos inicial de las arenas de relave de densidad relativa 90% con contenido de finos 1%, 5%, 10% y 20%, y la arena de Ottawa en su estado más denso (Maureira, 2012) - Escala aritmética y logarítmica.	45
Figura 31 a) Cambio del índice de vacíos intergranular normalizado con la presión media efectiva normalizada, para las arenas con un contenido de finos de 1%, 5%, 10% y 20% con respecto a su cantidad de arena, para una densidad relativa de confección de 15%; b) Los mismos resultados para una densidad relativa de confección de 65%; c) Los mismos resultados para una densidad relativa de confección de 90%.	45
Figura 32 Porcentaje de la variación vertical con respecto al porcentaje de variación volumétrica para las muestras de arena de relave con diferentes contenidos de finos con respecto a su contenido de arena, para diferentes densidades relativas de confección.	46
Figura 33 Comparación de distribuciones granulométricas inicial y post consolidación isotrópica de las densidades relativas de confección de 15%, 65% y 90%, para los contenidos de finos de 1%, 5%, 10% y 20%.	47
Figura 34 Variación del factor de rotura de partículas B10 (Lade, 1996) con la presión media efectiva p' , para muestras de densidad relativa de confección de 15%, 65% y 90%, con contenido de finos inicial de 1%, 5%, 10% y 20%.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 35 Contenido de finos normalizado por el contenido de finos inicial con respecto al total de la muestra, para las densidades relativas de confección de 15%, 65% y 90% y con contenido de finos de 1%, 5% 10% y 20%.	49
Figura 36 Microscopía del material fino de la arena de relave del tranque El Torito (escala 100 μm).	57
Figura 37 Índice de vacíos para los estados más sueltos y más densos de la arena de relave con diferentes porcentajes de contenido de finos.	58
Figura 38 Esquema del mecanismo de ordenamiento del estado más suelto para la arena de relave al aumentar su contenido de finos.	58
Figura 39 Esquema del mecanismo de ordenamiento del estado más denso para la arena de relave al aumentar su contenido de finos.	58
Figura 40 Esquema que muestra la diferencia en tamaño del espacio entre partículas para dos arenas con naturaleza diferente de forma de partículas.	59
Figura 41 Mecanismo de meta-estructura movilizada para estados sueltos de arena de relave al ser consolidada.	60
Figura 42 Variación del coeficiente de compresión C_{c10} , para p' mayor a 10 kgf/cm^2 al aumentar la cantidad de finos para densidades relativas de 15%, 65% y 90% de arena de relave.	61
Figura 43 a) Variación del coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v) de las arenas de relave de densidad relativa 15%, 65% y 90% con contenido de finos 1%, 5%, 10% y 20%.	63
Figura 44 Variación del trabajo por unidad de volumen (W) para la arena de relave con diferentes contenidos de finos ($cf=1\%$, 5%, 10% y 20%), para una densidad relativa de confección de 15%, 65% y 90%.	65
Figura 45 Trabajo por unidad de volumen necesario para que se alcancen distintos niveles de rotura ($B_{10}=0.5\%$, 1% y 2%), para diferentes contenidos de finos ($cf=1\%$, 5%, 10% y 20%).	66
Figura 46 Factor de área B10 al variar el contenido de finos para las densidades vistas en este estudio.	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de características del equipo triaxial de altas presiones	21
Tabla 2 Resumen de propiedades de plasticidad (Palma, 2004)	23
Tabla 3 Caracterización geotécnica arena de relaves con contenido de finos 1%, 5%, 10% y 20% con respecto a la arena.	24
Tabla 4 Batería de ensayos de consolidación isótropa	27
Tabla 5 Ensayos de caracterización	29
Tabla 6 Caracterización geotécnica de las arenas de relave utilizadas en este estudio.	38
Tabla 7 Resumen de consolidaciones isótropas.....	40
Tabla 8 Parametrización de las curvas de contenido de finos normalizado por el contenido de finos inicial, para las densidades relativas de confección de 15%, 65% y 90%, a), b) y c) respectivamente y para los contenidos de finos de 1%, 5% 10% y 20%.	49
Tabla 9 Comparación de microscopías para arenas de relave sin ensayar y con diferentes dosificaciones de contenido de finos, ensayadas a una densidad relativa de confección de 15% hasta una presión media efectiva de 20 <i>kgf/cm²</i>	51
Tabla 10 Comparación de microscopías para arenas de relave sin ensayar y con diferentes dosificaciones de contenido de finos, ensayadas a una densidad relativa de confección de 15% hasta una presión media efectiva de 50 <i>kgf/cm²</i>	52
Tabla 11 Comparación de microscopías para arenas de relave sin ensayar y con diferentes dosificaciones de contenido de finos, ensayadas a una densidad relativa de confección de 65% hasta una presión media efectiva de 20 <i>kgf/cm²</i>	53
Tabla 12 Comparación de microscopías para arenas de relave sin ensayar y con diferentes dosificaciones de contenido de finos, ensayadas a una densidad relativa de confección de 65% hasta una presión media efectiva de 50 <i>kgf/cm²</i>	54
Tabla 13 Comparación de microscopías para arenas de relave sin ensayar y con diferentes dosificaciones de contenido de finos, ensayadas a una densidad relativa de confección de 90% hasta una presión media efectiva de 20 <i>kgf/cm²</i>	55
Tabla 14 Comparación de microscopías para arenas de relave sin ensayar y con diferentes dosificaciones de contenido de finos, ensayadas a una densidad relativa de confección de 90% hasta una presión media efectiva de 50 <i>kgf/cm²</i>	56