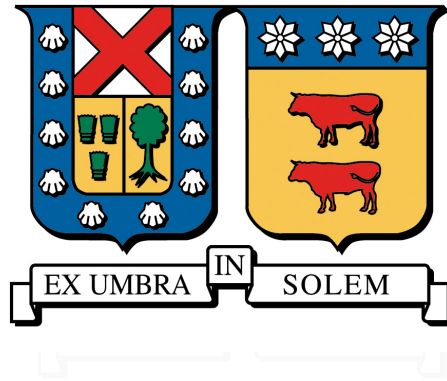


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



**ESTUDIO DE GUÍAS Y NORMATIVAS INTERNACIONALES DE DISEÑO,
CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES COMO BASE
PARA LA MODIFICACIÓN DE DECRETO SUPREMO N°248**

DIEGO HERNÁN MEZA CAMPOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

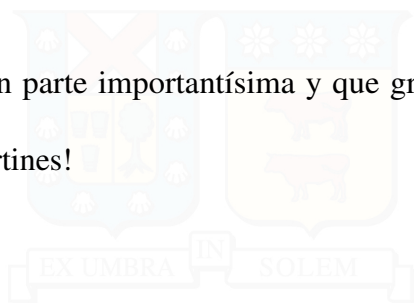
PROFESOR GUÍA : GONZALO SUAZO
PROFESOR CORREFERENTE : GABRIEL VILLAVICENCIO

ENERO 2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por haber estado presente durante este largo proceso brindándome todo el apoyo, confianza y tranquilidad. Gracias papá y hermanos por todo.

A mis amigos, que fueron parte importantísima y que gracias a ellos todo se hizo más relajado, divertido. Grande Martines!



Finalmente, agradecer a mis profesores, quienes me entregaron sólidos conocimientos y habilidades para desempeñarme en la nueva etapa que se avecina.

Gracias!!!

RESUMEN EJECUTIVO

En Chile la industria minera aporta aproximadamente un 10 % del Producto Interno Bruto, colocándose como la principal actividad económica del país. Esta industria está dominada completamente por la extracción de Cobre, siendo Chile el principal productor de este metal en el mundo. Esto, a pesar de los innumerables aspectos positivos que genera en el país, conlleva a un problema subyacente: La gestión de los residuos mineros. Actualmente se estima que se producen alrededor de 1.400.000 metros cúbicos diariamente y se cree que podría duplicarse dentro de 15 años. Esto genera un reto multidisciplinario para la disposición segura de estos desechos, ya que según las fallas documentadas de estas estructuras en Chile y en el mundo los efectos provocados por derrames de material son catastróficos.

La normativa que regula la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves corresponde al Decreto Supremo N°248 vigente desde 2007. Este decreto a pesar de reunir todos los aspectos relevantes en el ciclo de vida de un depósito, ha quedado obsoleto en alguna de sus consideraciones respecto a normativas internacionales. Es por esto, que en el presente documento se realiza una revisión de las principales normativas y guías relevantes para proyectos de relaves en Australia, Canadá, Estados Unidos, Brasil e Instituciones Internacionales, generando una base robusta de información, requisitos y recomendaciones a tener en consideración para futuras modificaciones de la actual norma legal chilena. Específicamente se tratan los temas de Gobernanza, Clasificación, Estabilidad física, Manejo de aguas, Construcción y Operación de los depósitos.

ABSTRACT

In Chile, the mining industry contributes approximately 10 % of the Gross Domestic Product, placing it as the main economic activity of the country. This industry is completely dominated by the extraction of copper, with Chile being the main producer of this metal in the world. This, in spite of the innumerable positive aspects that it generates in the country, leads to an underlying problem: The management of mining waste. It is currently produced, it is estimated that around 1,400,000 cubic meters are produced daily and it is believed that it could double within 15 years. This creates a multidisciplinary challenge for the safe disposal of these wastes, since according to the documented failures of these structures in Chile and in the world the effects caused by spills of material are catastrophic.

The regulations governing the approval of projects for the design, construction, operation and closing of tailings deposits correspond to Supreme Decree No. 248 in force since 2007. This decree despite gathering all the relevant aspects in the life cycle of a deposit , has become obsolete in some of its considerations regarding international regulations. That is why, in this document, a review of the main regulations and relevant guidelines for tailings projects in Australia, Canada, the United States, Brazil and International Institutions is carried out, generating a robust base of information, requirements and recommendations to have in Consideration for future modifications of the current Chilean legal norm. Specifically, the topics of Governance, Classification, Physical Stability, Water Management, Construction and Deposit Operation are discussed.

Índice de Contenidos



Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo General	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2 Estructura del documento	5
Capítulo 2 Marco Teórico	7
2.1 Residuos mineros	7
2.2 Depósitos de relaves	8
2.2.1 Tecnologías de depositación	10
2.3 Fallas en depósitos de relaves	11
2.3.1 Mecanismos de falla	13
2.3.2 Fallas documentadas en Chile	17
2.4 Análisis de riesgo	20
2.4.1 Metodología de utilización del análisis de riesgo para clasificación	23

Capítulo 3 Antecedentes	24
3.1 Catastro de depósitos de relaves en Chile	24
3.1.1 Estado de actividad de los depósitos de relaves	26
3.1.2 Estado de utilización volumétrica de depósitos de relaves	27
3.1.3 Tecnología de depositación de relaves	29
3.2 Normativa chilena vigente	30
3.2.1 Aplicación de reglamentos	34
Capítulo 4 Revisión y análisis de bibliografía	44
4.1 Introducción	44
4.2 Australia	45
4.3 Canadá	49
4.4 Estados Unidos	54
4.5 Brasil	57
4.6 Internacional	58
4.7 Comparación	62
Capítulo 5 Consideraciones para la modificación Decreto Supremo n°248	64
5.1 Introducción	64
5.2 Gobernanza	65
5.3 Sistema de clasificación	67
5.3.1 Zona de Inundación	78
5.4 Estabilidad Física	84

5.5 Manejo de Aguas	89
5.5.1 Infiltración	90
5.5.2 Almacenamiento de agua	93
5.6 Construcción	96
5.6.1 Antecedentes para la construcción	97
5.6.2 Desarrollo de la construcción	100
5.7 Operación, Mantenimiento y Monitoreo	102
5.7.1 Manual OMS	103
Capítulo 6 Conclusiones	113
Capítulo 7 Bibliografía	116
Capítulo 8 Anexos	122

Índice de Tablas

2.1	Concentración de sólidos en relaves según tipo de tecnología.	11
2.2	Eventos de fallas reportados en Chile. Fuente: Villavicencio, et al, 2014.	19
3.1	Cantidad de depósitos de relave según categorías ICOLD	25
3.2	Los 5 depósitos más pequeños y más grandes registrados en Chile. Fuente: Falcon-Hernandez, 2018.	25
3.3	Distribución del volumen autorizado en metros cúbicos.	28
3.4	Distribución del volumen utilizado a la fecha en metros cúbicos.	28
3.5	Distribución porcentual de capacidad volumétrica disponible.	29
3.6	Distribución de tecnología de depositación de relaves.	30
5.1	Categorías ANCOLD. Fuente: ANCOLD, 2012	68
5.2	Consecuencia de eventos ANCOLD. Fuente: ANCOLD,2012	69
5.3	Categorías Western Australia. Fuente: DMP, 2013	70
5.4	Clasificación de consecuencias Western Australia Fuente: DMP, 2013.	71
5.5	Requisitos de categorías Western Australia. Fuente: DMP, 2015.	72
5.6	Clasificación de consecuencias CDA. Fuente: CDA, 2013.	73

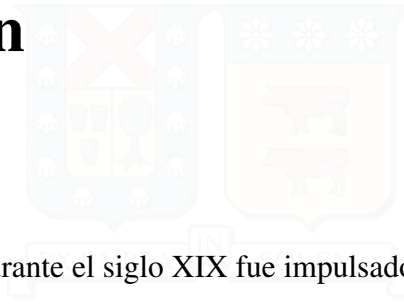
5.7	Categorías Québec. Fuente: Québec Government, 2019	74
5.8	Clasificación de consecuencias Québec. Fuente: Quebec Government, 2019. . .	76
5.9	Clasificación de consecuencias Québec (Continuación). Fuente: Quebec Govern- ment, 2019.	77
5.10	Riesgo Hidrodinámico. Fuente: Smith, et al. 2014	82
5.11	Cargas sísmicas mínimas. Fuente: ANCOLD, 2012.	87
5.12	Coronamiento recomendado [m]. Fuente: US Bureau of Reclamations, 1987 . .	87
5.13	Factores de seguridad mínimos recomendados. Fuente: ANCOLD, 2012.	88
5.14	Extracto: Concentraciones permisibles de contaminantes en agua de relaves. Fuente: ERR, 2017	91
5.15	Periodos de retorno de escorrentía según clasificación de consecuencias. Fuente: ANCOLD, 2012.	95
5.16	Periodos de retorno de tormenta según clasificación de consecuencias. Fuente: ANCOLD, 2012.	95
5.17	Ejemplos: Indicadores de desempeño de Operación. Fuente: MAC, 2019. . . .	107
8.1	Normativas vigentes en Chile.	122
8.2	Guías y normativas de Australia	123
8.3	Guías y normativas de Canadá	123
8.4	Guías y normativas de Estados Unidos	124
8.5	Guías y normativas de Brasil	124

Índice de Figuras

2.1 Componentes principales de un depósito de relaves. Fuente: Carvajal, 2018.	10
2.2 Efectos producidos por licuefacción sísmica en terremoto de 27 de febrero 2010, Región del Maule, Chile. Fuente: Villavicencio, et al. 2014	14
2.3 Inestabilidad de taludes, Región de Valparaíso, Chile. Fuente: Villavicencio, et al. 2014	15
2.4 Nivel excesivo de laguna de aguas claras. Fuente: Tailing.info, 2017.	16
2.5 Falla por piping de las lamas y muro resistente. Fuente: Villavicencio et al., 2014.	17
2.6 Proceso de gestión de riesgos. Fuente: ISO 31000, 2018.	21
2.7 Matriz de riesgo tipo para clasificación.	23
3.1 Distribución porcentual de depósitos de relaves.	26
3.2 Distribución regional de depósitos de relaves.	27
5.1 Esquema de relación entre personal responsable. Fuente: ICMM, 2019.	66
5.2 Metodología recomendada en la práctica. Fuente: VALE, 2018.	79
5.3 Marco general de Sistema de Gestión de Depósitos de relaves. Fuente: Tailings and Waste, 2019.	103



1 Introducción



El crecimiento de Chile durante el siglo XIX fue impulsado principalmente por la actividad minera, donde durante este periodo y hasta la actualidad, el país se ha convertido en el principal productor de cobre en el mundo. Debido al extenso periodo de explotación minera, se han agotado los yacimientos de cobre de alta ley, es decir, roca con alto contenido de este metal (30 a 60 %) y por lo tanto, actualmente se explotan yacimientos de rocas con contenidos entre 1 a 2 % de cobre. Considerando que la demanda de este metal ha sido creciente en el tiempo y que Chile ha aumentado su producción para satisfacerla, la producción indirecta de desechos mineros ha aumentado en gran medida generando aproximadamente 1 millón de toneladas por día (Villavicencio, 2013). Es por esto que se ha generado la necesidad de manejar y controlar estos residuos. Así, los tranques de relaves se han utilizado mayoritariamente para la gestión de estos desechos, teniendo hoy en día aproximadamente 600 depósitos de este tipo distribuidos a lo largo del país.

El correcto manejo de este tipo de depósitos es uno de los desafíos no resueltos de todos los países mineros del mundo, ya que garantizar la seguridad y sostenibilidad medioambiental es una tarea que involucra un gran número de variables. En este sentido, enfrentar la creciente escasez

de superficie y competencia por territorio, asegurar la estabilidad de los depósitos, minimizar el impacto de las infiltraciones, promover la conversión de los relaves (pasivos) a un activo, y propiciar la inclusión y aceptación por parte de las comunidades se constituyen en desafíos centrales para la sustentabilidad futura de la industria minera. (Fundación Chile, 2016).

Las fallas en depósitos de relaves pueden tener consecuencias desastrosas para las comunidades cercanas, el medioambiente y las empresas mineras, que en consecuencia pueden enfrentar altos costos financieros, reputación y relación con la comunidad (Concha, 2018). Rico et al. (2008), documentaron 147 casos de fallas en depósitos de relaves en todo el mundo, las cuales fueron causadas por 16 factores diferentes, que incluyen operaciones de manejo, licuefacción sísmica, aumentos en la superficie freática, inestabilidad de taludes, socavamiento fluvial, playa inadecuada/insuficiente, infiltración, desbordamiento, falla de fundaciones, deshielo, construcción inadecuada de la tubería de decantación, eventos de lluvia inusuales, eficiencia insuficiente del drenaje del filtro, predicción incorrecta del hundimiento de la mina y falla estructural.

En 2015, la falla del depósito de relaves de la mina Samarco en Minas Gerais (propiedad conjunta de BHP Billiton Brasil y Vale S.A.) causó 19 muertes y fue declarado el peor desastre ambiental en la historia de Brasil. Actualmente, la mina Samarco se encuentra en el proceso de restauración de 5.000 corrientes, 16.000 hectáreas de áreas de conservación permanente a lo largo de la cuenca del río Doce y 1200 hectáreas en las riberas (Renova Foundation, 2017). Se estima que los medios de vida de más de 1 millón de personas se vieron afectados por la falla (Fernandes, 2016). Es por esto que se necesitan mejoras en el diseño, monitoreo, gestión y análisis de riesgos que consideren las consecuencias posibles producidas por fallas en las instalaciones con el objetivo de minimizar estos efectos.

Para garantizar la seguridad de estas instalaciones el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) ha emitido en el año 2007 el Decreto Supremo N°248 que marca los requisitos para el diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. A pesar de ser un documento específico que regula dichas instalaciones en sus diferentes etapas de su ciclo de vida de proyecto, no considera aspectos fundamentales como la gestión de riesgos, la clasificación y categorización según las consecuencias producidas por una posible falla, aspectos administrativos y de responsabilidad, detalles en parámetros de diseño, metodologías de análisis y manuales de operación y emergencia. Sin embargo, estos aspectos se encuentran ampliamente desarrollados en distintas normativas y guías internacionales de países con alto desarrollo minero como Australia y Canadá. Es por esto, y considerando la contingencia de las fallas producidas en los últimos años, es importante realizar una actualización del Decreto Supremo N°248, con el objetivo de regular de manera más eficiente y segura estas instalaciones y alinearse con las últimas prácticas propuestas y utilizadas internacionalmente.

Para realizar modificaciones que generen impactos positivos y que no queden obsoletas en poco tiempo, es necesario estudiar y analizar la bibliografía disponible de los distintos países, así identificar las buenas prácticas y metodologías para abordar la seguridad de los depósitos. Esto permite generar una base robusta en la cual basar posibles modificaciones en la actual legislación chilena.

Tomando en cuenta estos antecedentes, este trabajo se enfoca en la revisión de los cuerpos normativos, guías de diseño y códigos de buenas prácticas de países con desarrollo minero, que permita validar futuras modificaciones en el Decreto Supremo N°248, exponiendo los documentos principales en que se basan otras legislaciones y el desarrollo de los temas que presentan las

principales falencias del actual cuerpo normativo chileno.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Estudio de normativas y guías internacionales como base para el desarrollo de una propuesta de modificación del *Decreto Supremo n°248: Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves (2007)* que permita un diseño, operación y control de depósitos de relaves basado en análisis de riesgo con énfasis en la seguridad de personas, infraestructura y medioambiente alineándose con las últimas prácticas internacionalmente utilizadas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar un catastro de depósitos de relaves en Chile considerando sus características de actividad y capacidad.
- Identificar y describir los principales documentos legislativos y guías de diseño de depósitos de relaves de Australia, Canadá, Estados Unidos y Brasil.
- Identificar las principales disposiciones de Gobernanza de depósitos de relaves, incluyendo estructura, miembros y responsabilidades pertinentes.
- Realizar una revisión bibliográfica de los métodos de clasificación de depósitos de relaves utilizados en Australia, Canadá, Estados Unidos y guías internacionales.

- Realizar una revisión sobre los alcances y usos de la Zona de Inundación identificando los aspectos importantes solicitados para aprobación de un proyecto.
- Revisión bibliográfica de métodos de diseño y análisis de estabilidad física.
- Describir las consideraciones especiales para un correcto manejo de aguas presente en los documentos internacionales que permiten asegurar la estabilidad física y la contaminación del medioambiente.
- Estudio de manuales de operación, mantención y vigilancia utilizados actualmente en el mundo.

1.2. Estructura del documento

A continuación se describe brevemente el contenido de los capítulos que forman el presente trabajo.

Capítulo 1: Se presenta los antecedentes generales en los que se basa el presente estudio y los objetivos planteados para este.

Capítulo 2: Corresponde al Marco teórico relevante para el presente estudio. En este se abarcan temas generales como que son y cómo se compone un depósito de relaves, los tipos de tecnologías existentes para la depositación, los mecanismos de falla más comunes de estas estructuras y los conceptos generales de análisis de riesgo aplicado a depósitos de relaves.

Capítulo 3: En este capítulo se presentan los antecedentes específicos que justifican el presente estudio. Se muestra el catastro de los depósitos chilenos y su estado actual de utilización. Además se realiza una descripción del cuerpo normativo legal vigente actualmente en Chile, específicamente la Ley n° 20.551, DS N°248, DS N°50 y su aplicación respecto a la clasificación de depósitos, estabilidad física, estabilidad química, manejo de aguas, construcción, operación y control.

Capítulo 4: Describe los distintos cuerpos normativos y guías sobre depósitos de relaves en Australia, Canadá, Estados Unidos, Brasil e instituciones internacionales.

Capítulo 5: Se muestra el contenido sobre los aspectos principales de la actual normativa vigente chilena, presentes en las normativas y guías mencionadas en el Capítulo 4. Esto con el objetivo de desarrollar la base de contenido para una posible modificación del DS N°248.

Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones finales del trabajo.

Capítulo 7: Bibliografía.

2 Marco Teórico



2.1. Residuos mineros

El relave corresponde a una mezcla de roca molida finamente y agua, esta mezcla puede contener una gran variabilidad de minerales según sean las características de la roca de su procedencia. Este se obtiene como un sub producto de la extracción de distintos minerales como: cobre, molibdeno, oro, plata, hierro, manganeso, plomo y zinc, principalmente en la etapa de flotación donde se separan los minerales de la roca. Mayoritariamente el relave está compuesto de metales pesados sin valor comercial por lo que se considera un desecho, y debido a su naturaleza física o química puede ser una amenaza al ambiente.

Debido a que una de las principales actividades económicas en Chile corresponde a la minería, la cual aporta al PIB nacional un 9.8 % (Sernageomin, 2018), se genera una gran cantidad de relaves. Se estima que se produce actualmente un volumen aproximado de 1.400.0000 [m^3] diariamente, y se cree que la producción de relaves podría casi duplicarse al año 2035: si hoy cada 36 horas se depositan relaves equivalentes a un Cerro Santa Lucía (Santiago, Chile), dentro de 20 años se depositarán sólo en 21 horas (Fundación Chile, 2016).

La solución nacional, para evitar dañar el medio ambiente y la salud de las personas, ha sido la contención tradicional de los relaves en depósitos que los aíslan del agua y el viento del ecosistema receptor (Falcon-Hernandez, 2018). Actualmente existen un total de 740 depósitos de relaves distribuidos por todo el territorio nacional, de los cuales, 104 corresponden a depósitos en funcionamiento.

2.2. Depósitos de relaves

El Decreto Supremo n°248 (2007) define a los depósitos de relaves como toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos. Generalmente, estas estructuras presentan las siguientes componentes, las cuales, se muestran en la Figura 2.1.

- **Muro:** Estructura que permite contener los residuos sólidos producidos en la planta de concentración. También llamado Prisma Resistente, corresponde a la zona periférica del depósito de relaves, estructurada artificialmente y complementa el perímetro natural para conformar la zona de la cubeta (Decreto Supremo N°248, 2007).
- **Cubeta:** Volumen físico, delimitado por el muro, disponible para el depósito de relaves, junto con gran parte del agua de este material (SERNAGEOMIN, 2015). Es la zona del depósito de relaves en la cual se acumularán los sólidos de grano más finos de los relaves,

en el caso de los Tranques de Relaves, o la totalidad de los relaves, en los otros sistemas de depositación (Decreto Supremo 248, 2007).

- **Laguna de Aguas Claras:** Es parte de la cubeta de un depósito, y se forma en tanto los sólidos sedimentan a las capas inferiores (SERNAGEOMIN, 2015). Corresponde a aguas libres de partículas en suspensión, que se ubican en un sector de la cubeta de los embalses y tranques de relaves, una vez que decantan los sólidos finos de la pulpa de relaves (Decreto Supremo 248, 2007).
- **Sistema de Drenaje:** Sistema utilizado para retirar al grado adecuado el agua del interior del muro, con el objetivo de deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro (SERNAGEOMIN, 2015).
- **Revancha:** Diferencia menor, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o de la superficie del agua, que se produce en los tranques y embalses de relaves (Decreto Supremo 248, 2007).
- **Coronamiento:** Parte superior del muro de contención o prisma resistente (Decreto Supremo 248, 2007).
- **Canal de Contorno:** Canal de desvío de las aguas de la cuenca que captan y desvían las escorrentías superficiales, impidiendo el ingreso a la cubeta del depósito de relaves. (SERNAGEOMIN, 2015)
- **Playa Activa:** Zona donde se descargan los relaves en la cubeta. Se le denomina Playa porque usualmente está seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas. Es la parte del depósito situada en las cercanías de la línea de vaciado. (SERNAGEOMIN, 2015)

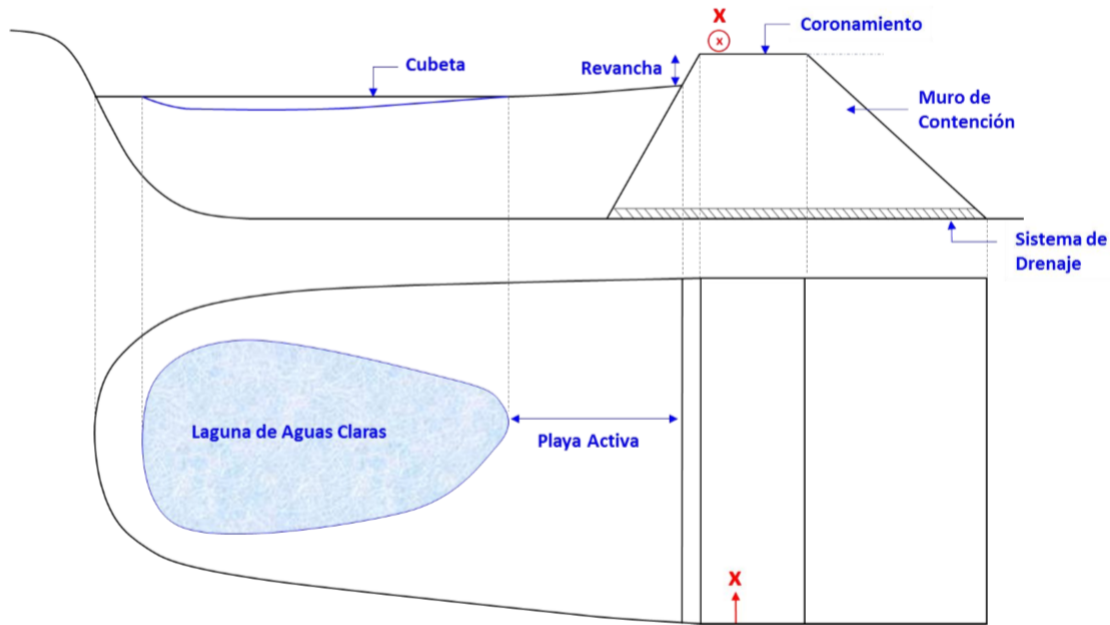


Figura 2.1: Componentes principales de un depósito de relaves.
Fuente: Carvajal, 2018.

2.2.1. Tecnologías de depositación

Las características y el comportamiento del relave dependen, entre otras cosas, de la cantidad de humedad o sólidos contenidos en la mezcla. Este valor define la clasificación de los tipos de relave y su tecnología de depositación.

Así, el Decreto Supremo N°248 (2007) asigna la siguiente clasificación:

- **Tranque de relaves:** Es aquel depósito de relaves donde el muro de contención es construido con la fracción más gruesa del relave (arenas). Generalmente, el material depositado cuenta con alrededor de 30 % a 50 % de sólidos y es la tecnología más utilizada hoy en día.
- **Relaves espesados:** Depósito donde los relaves son sometidos a un proceso de sedimentación, antes de su depositación. Esto se realiza mediante un espesador, que elimina una parte importante del agua que contenida. Debido a que no requiere de un muro contenedor

para su construcción, el depósito de relaves espesado deberá ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a lugares distintos a las del emplazamiento determinado. Además, debe contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente.

- **Relaves filtrados:** Depósito donde los relaves son sometidos a un proceso de filtración antes de su depositación. Esto se realiza mediante equipos especiales de filtros, que aseguran que la humedad final sea menor al 20 %. Al utilizar esta tecnología se debe depositar el relave de tal forma que este no fluya a otras áreas distintas a la del emplazamiento determinado.
- **Relaves en pasta:** Depósito de relaves que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado. Este corresponde a una mezcla de sólidos y agua con aproximadamente un 10 % a 25 % de humedad, que contiene partículas finas menores de $20\mu\text{m}$, en una concentración en peso superior al 15 % muy similar a la pulpa de alta densidad. Se debe depositar de manera similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación.

En la Tabla 2.1 se presenta el resumen de las concentraciones indicadas.

Tabla 2.1: Concentración de sólidos en relaves según tipo de tecnología.

Tipo de Tecnología	Contenido en Peso de Sólidos
Convencional	Entre 30 % y 50 %
Espesado	Entre 50 % y 65 %
Pasta	Entre 65 % y 75 %
Filtrado	Aproximadamente 80 %

2.3. Fallas en depósitos de relaves

En un evento de falla o colapso en un depósito de relave, parte del material depositado es liberado a través de una brecha. Esto genera un deslizamiento de terreno junto con el flujo del

material más fino embalsado, liberando una gran parte de los materiales depositados, ya que los relaves saturados se encuentran como un fluido no newtoniano viscoso, alcanzando grandes velocidades de desplazamiento. De los distintos depósitos de relave mencionados en el inciso anterior, son los tranques de arenas de relave que presentan un mayor riesgo desde el punto de vista de la estabilidad física, ante un inapropiado o incorrecto diseño, inadecuada operación, insuficiente control y mal manejo de aguas. A nivel mundial, del total de incidentes reportados en depósitos mineros (desde 1901 a 2017), el 45 % de un total de 129 casos se generaron en tranques o embalses de relave (Villavicencio et al, 2018). Según la clasificación propuesta por ICOLD (2001), los eventos se produjeron por las siguientes causas:

- Rebose (overtopping) producido por un evento hidrológico o a un control deficiente de la laguna de aguas claras.
- Inestabilidad debido a infiltraciones hacia el depósito o suelo de fundación.
- Inestabilidad de taludes en condiciones estáticas, que incluye deslizamientos en los taludes del muro resistente del depósito.
- Inestabilidad debido a los efectos producidos por movimientos sísmicos.
- Erosión, daño erosivo superficial no relacionado con deficiencias estructurales.
- Subsistencia de mina, liberación de relave hacia trabajos subterráneos, o daños en el depósito causados por operaciones de minas subterráneas.

En Chile, se han reportado aproximadamente 40 casos de eventos de falla en tranques de arenas de relave, dentro del período comprendido entre los años 1915 y 2015. (Dobry y Alvarez 1967, Castro y Troncoso 1989, Troncoso 2002; Villavicencio et al. 2014, entre otros).

A partir del análisis de los casos documentados, realizado por Villavicencio et al. (2014), es posible concluir que:

- La causa principal de las fallas ha sido principalmente la licuefacción sísmica, generando inestabilidad en los taludes debido a deformaciones inducidas.
- Se han registrado fallas por rebose (overtopping) en depósitos emplazados en zonas de régimen pluviométrico medio, de la zona central de Chile.

2.3.1. Mecanismos de falla

Los eventos de falla pueden generarse por distintos motivos como: método de construcción, pobre compactación, alto contenido de finos en las arenas de relave utilizadas en el muro de contención o elevado grado de saturación. Esto puede deberse a un inadecuado diseño, construcción u operación. A continuación se describen los mecanismos de falla más frecuentes registrados en el mundo.

- **Licuefacción sísmica:** Esta falla es producida por una generación de un exceso de presión de poros debido a un movimiento sísmico. Este exceso de presión no se logra disipar con rapidez, lo cual produce que la tensión efectiva entre las partículas de suelo sea reducida considerablemente, llegando a cero en algunos casos, por lo que el material comienza a comportarse como un líquido. Este fenómeno ocurre en tiempos relativamente cortos, generándose en cuestión de minutos y se caracteriza por altas deformaciones de la masa de relaves, alcanzando velocidades de escurrimiento de 15 a 50 [km/hr].

Según Troncoso et al (1993), Blight et al (2000) y Verdugo (2011), es posible identificar los siguientes factores en los casos de licuefacción en tranques de relave chilenos:

- Método de construcción aguas arriba, generó fallas por licuación a nivel basal de los muros resistentes (lamas sueltas no consolidadas).
- Baja densidad de las arenas de relave empleadas para la construcción del muro resistente debido a la deficiente compactación mecánica aplicada.
- Las arenas de relave empleadas en la construcción de los muros resistentes, presentaban un alto contenido de finos.
- Presencia una laguna de aguas claras muy próxima al coronamiento del muro resistente. La presencia de agua fue fundamental para un rápido incremento de las presiones intersticiales durante las cargas sísmicas.

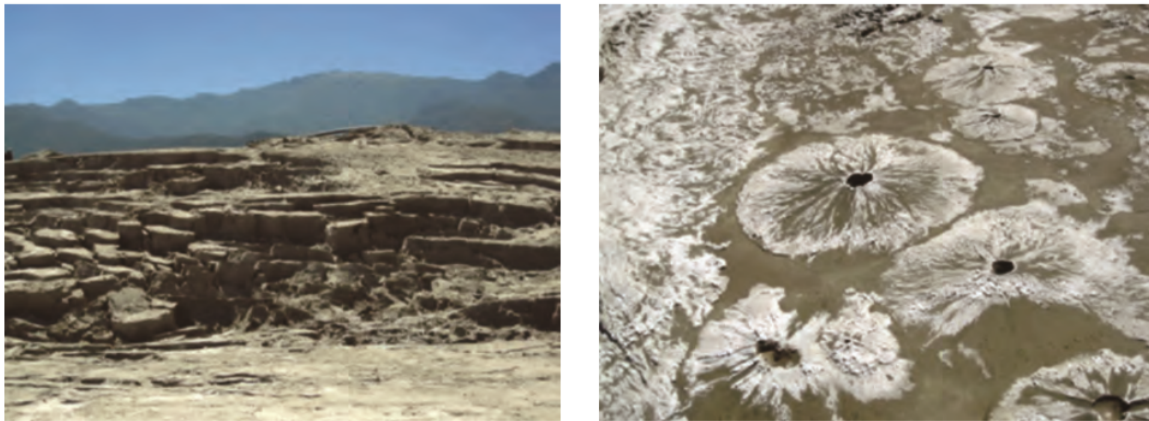


Figura 2.2: Efectos producidos por licuefacción sísmica en terremoto de 27 de febrero 2010, Región del Maule, Chile.

Fuente: Villavicencio, et al. 2014

- **Inestabilidad de talud:** Este fenómeno se produce en un estado de presiones intersticiales menores a las que producen licuefacción, donde la resistencia de corte del material en la zona de rotura es excedido por los esfuerzos de corte producidos por cargas sísmicas, lo

que puede afectar en gran medida a la estabilidad estructural del depósito. Esto puede ser generado por los siguientes factores:

- Aumento en la saturación en el talud debido a una variación en la posición del nivel freático en relación al considerado en el diseño. Este aumento se puede explicar por lluvias intensas, inadecuado sistema de drenaje y/o mal manejo de la laguna de aguas claras.
- Baja resistencia del material en condición saturada.
- Presencia de una capa de baja resistencia en el muro resistente con un alto porcentaje de partículas finas ($< 74\mu m$), debido a un proceso de cicloneo mal ejecutado en las etapas de construcción u operación.
- Geometría inadecuada del muro resistente.
- Pobre investigación geotécnica del suelo de fundación.



Figura 2.3: Inestabilidad de taludes, Región de Valparaíso, Chile.
Fuente: Villavicencio, et al. 2014

- **Rebose (Overtopping):** El rebose o overtopping es un fenómeno que se presenta cuando el volumen de lamas excede la capacidad del depósito o cuando la laguna de aguas claras no es

gestionada de manera adecuada y se encuentra en contacto con el muro resistente, con una altura cercana a la revancha. Esto, ocurre generalmente debido a eventos extraordinarios de precipitaciones intensas, mal diseño u operación de las obras de evacuación de aguas provenientes de escorrentía superficial o errores de operación del depósito. Este efecto también se puede producir debido al peraltamiento del espejo de agua debido al oleaje producido por el viento o sismos, sin embargo, esto se presenta en menor medida.



Figura 2.4: Nivel excesivo de laguna de aguas claras.

Fuente: Tailing.info, 2017.

- **Erosión interna (Piping):** El fenómeno de erosión interna producido en depósitos de relave es generado debido al arrastre progresivo de las partículas más finas que conforman el material empleado para la construcción del muro resistente o el presente en el suelo de fundación del depósito. Este ocurre cuando se presentan los siguientes factores: susceptibilidad del material a la erosión debido a su plasticidad o dispersividad, generación de una carga hidráulica considerable debida a altas velocidades de flujos, y a la disminución de las tensiones efectivas del suelo producto del aumento de las presiones intersticiales hasta valores críticos que generen inestabilidad en la estructura del suelo y el movimiento de las partículas finas contenidas en los relaves.

En escenarios más críticos, el Piping puede generar canales directos desde la cubeta al talud aguas abajo del depósito, produciendo fallas locales o masivas.



Figura 2.5: Falla por piping de las lamas y muro resistente.
Fuente: Villavicencio et al., 2014.

2.3.2. Fallas documentadas en Chile

Desde el comienzo del siglo XX hasta el presente, se han informado y (o) documentado un total de 38 casos de inestabilidad mecánica de depósitos de relaves de arena en Chile, causadas por licuefacción sísmica, inestabilidad de taludes con deformaciones inducidas sísmicamente y rebose (overtopping). Las fallas ocurrieron como resultado de terremotos que afectaron las áreas norte, centro y centro-sur de Chile.

En la Tabla 2.2, se presentan los detalles de las fallas anteriormente mencionadas. Además, se muestran las conclusiones obtenidas por Villavicencio (2014) basándose en la base de datos proporcionadas por SERNAGEOMIN y la información recopilada por el grupo de investigación geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Cabe destacar, que las fallas presentadas corresponden a aproximadamente el 32 % de los casos reportados en el mundo

(ICOLD 2001, Troncoso 2002, Rico et al. 2008, WISE Uranium Project 2013).

- Aproximadamente el 50 % de los casos se generaron por licuefacción sísmica, 32 % debido a inestabilidad de talud, y 18 % por overtopping.
- Los casos de inestabilidad de taludes se produjeron principalmente en depósitos contruidos con el método de aguas arriba, que presentaban muros de menos de 40 metros de altura o una capacidad de almacenamiento menor a 50 millones de metros cúbicos.
- Los casos de eventos causados por los terremotos de 1965, 1981, 1985 y 2010 corresponden al 68 % de los casos reportados, y presentan los siguientes factores en común: método de construcción aguas arriba, pobre o nula compactación, pendiente de taludes entre 1.2:1 a 1.7:1 (V: H, donde V es vertical y H horizontal) generada por la simple depositación hidráulica de relaves ciclónica, y un alto grado de saturación.
- Los eventos de overtopping están asociados con fuertes lluvias y exhibieron pérdida de ancho de coronamiento, revancha inadecuada y erosión progresiva en el muro de contención.

Tabla 2.2: Eventos de fallas reportados en Chile.

Fuente: Villavicencio, et al, 2014.

Depósito	Ubicación	Año	Método cons. ¹	Altura [m]	Estado ²	Volumen [Mm ³]	Falla ³	Causa
Agua dulce	Rancagua	1915	-	61	OP	-	OT+FF	Fuerte lluvia
Barahona 1	Rancagua	1928	US	65	OP	20	LQ+FF	Terremoto Ms = 8.3
El cerrado	Valparaíso	1965	US	25	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
El cobre viejo	Valparaíso	1965	US	35	OP/AB	4.25	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
El cobre chico	Valparaíso	1965	US	26	OP	0.98	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
El cobre nuevo	Valparaíso	1965	US	19	AB	0.35	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
Cerro negro n°1	Valparaíso	1965	US	46	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
Cerro negro n°2	Valparaíso	1965	US	46	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
Cerro negro n°3	Valparaíso	1965	US	20	OP	0.5	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
Hierro viejo	Valparaíso	1965	US	5	OP	-	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
Los maquis 1	Valparaíso	1965	US	15	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
Los maquis 3	Valparaíso	1965	US	15	OP	0.04	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
La patagua	Valparaíso	1965	US	15	OP	-	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
Bellavista	Valparaíso	1965	US	20	OP	0.45	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
El sauce 1	Valparaíso	1965	US	6	OP	-	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
El sauce 2	Valparaíso	1965	US	5	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
El sauce 3	Valparaíso	1965	US	5	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
El sauce 4	Valparaíso	1965	US	5	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms = 7.4
Ramayana	Valparaíso	1965	US	5	OP/AB	-	LQ+FF	Terremoto Ms = 7.4
Marga	Rancagua	1980	-	-	AB	-	OT+FF	Fuerte lluvia
Arena	Rancagua	1980	-	-	AB	-	OT+FF	Fuerte lluvia
Veta del agua 2	Valparaíso	1981	US	20	OP	-	LQ+FF	Terremoto Ms = 6.5
Vallenar 1 y 2	Vallenar	1983	-	-	AB	-	OT+FF	Fuerte lluvia
Veta de agua 1	Valparaíso	1985	US/CL	24	OP	0.7	LQ+FF	Terremoto Ms= 7.8
Cerro negro n°4	Valparaíso	1985	US/CL	40	OP	2	LQ+FF	Terremoto Ms= 7.8
Cobre n°4	Valparaíso	1985	DS	50	AB	-	SI+SID	Terremoto Ms= 7.8
Almedro	Vallenar	1997	US	18	OP	-	LQ+FF	Terremoto Ms= 7.0
Algarrobo	Vallenar	1997	US	20	OP	-	LQ+FF	Terremoto Ms= 7.0
Maitén	Vallenar	1997	US	15	OP/AB	-	LQ+FF	Terremoto Ms= 7.0
Tranque antígui	Vallenar	1997	US/CL	30	OP	-	LQ+FF	Terremoto Ms= 7.0
El cobre 2,3,4 y 5	Valparaíso	2002	US	-	AB	-	OT+FF	Fuerte lluvia
El cobre	Valparaíso	2002	US	-	AB	-	OT+FF	Fuerte lluvia
Cerro negro n°2	Valparaíso	2003	US	-	OP	-	OT+FF	Terremoto Mw=8.8
Tranque adosado	RM	2010	DS	15	OP	-	LQ+FF	Terremoto Mw=8.8
Las palmas	Maule	2010	-	15	AB	-	LQ+FF	Terremoto Mw=8.8
Tranque planta chacón	Rancagua	2010	-	-	AB	-	SI+SID	Terremoto Mw=8.8
Veta del agua	Valparaíso	2010	US	-	AB	-	SI+SID	Terremoto Mw=8.8
Tranque n°1	Valparaíso	2010	US	-	AB	-	SI+SID	Terremoto Mw=8.8

¹US: Método constructivo aguas arriba; CL: Método constructivo línea central; DS: Método constructivo aguas abajo.²OP: Operacional; AB: Abandonado; OP/AB: Final de la etapa operacional.³OT+FF: Overtopping con falla de flujo; LQ+FF: Licuefacción con falla de flujo; SI+SID: Inestabilidad de talud con deformación sísmicamente inducida.

2.4. Análisis de riesgo

Según la información expuesta anteriormente, es importante estudiar los posibles efectos dado un colapso o una falla parcial de un depósito sobre factores humanos, ambientales y económicos. Debido a su naturaleza y tecnología de depositación, el material de relaves puede contener altos contenidos de humedad (ver Tabla 2.1), lo que provoca que al abrirse una brecha en el sistema de contención o al ser rebosada la capacidad de almacenamiento del depósito, el material puede fluir en gran cantidad y alcanzar altas velocidades. A partir de análisis de la estadística mundial de fallas en depósitos de relaves se ha correlacionado que el volumen de material liberado corresponde a aproximadamente el 34 % del volumen almacenado (Rico, et al. 2007), y que el material, a pesar de ser un fluido no newtoniano, no presenta grandes diferencias en el flujo respecto de un flujo de agua, con diferencias cernas al 5 % en caudal y 10 % en profundidad (Bernedo, et al. 2011). Así, es posible determinar con distintos métodos numéricos la zona de inundación y su potencial impacto sobre el medio. Entre estudios consultados, se destaca el de Smith, et al (2014) que ha sido adoptado por la guía *Australian Rainfall an Runoff*, el cual, presenta criterios sugeridos de riesgo hidrodinámico para evaluar impactos físicos en el medio según velocidad y profundidad de flujo.

Actualmente, una manera de realizar una gestión del riesgo en depósitos de relaves corresponde a utilizar sistemas de clasificación que permitan dotar de distintos niveles de exigencias para el diseño, construcción y operación de los depósitos, con el fin de utilizar de manera más eficiente y focalizada los recursos. La práctica líder de gestión de relaves reconoce las posibles limitaciones e incertidumbres de diseño al aplicar un enfoque de gestión basado en el riesgo durante toda la vida del depósito, desde la concepción del proyecto hasta el diseño, construcción,

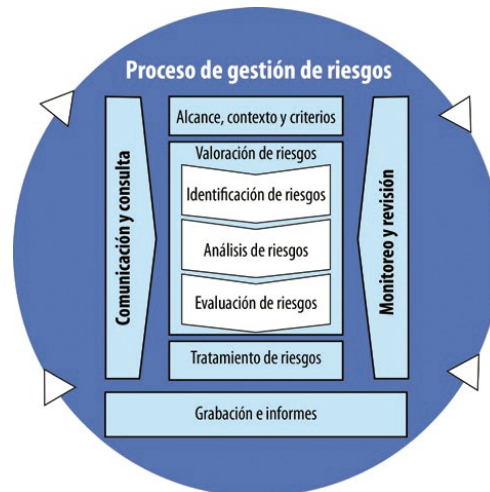


Figura 2.6: Proceso de gestión de riesgos.
Fuente: ISO 31000, 2018.

operación y cierre. En el documento *ISO 31000:2018 Gestión del riesgo: Principios y Directrices*, se proporciona una guía genérica para gestionar el riesgo y los elementos clave del proceso. En la Figura 2.6, se muestra el proceso general presentado en dicho documento.

Al centrarse principalmente en los temas que son importantes para lograr los objetivos de rendimiento, el proceso de gestión de riesgos se convierte en una herramienta de gestión sólida y efectiva. La activación de este enfoque al comienzo del proyecto proporciona al propietario del depósito una mayor confianza en el diseño y le brinda al diseñador la capacidad de adaptar el diseño para cumplir con el perfil de riesgo requerido. El proceso de gestión de riesgos debe comenzar en la etapa de concepción del proyecto, teniendo en cuenta las opciones de tratamiento de riesgos al intentar eliminar o reducir la cantidad y mejorar la calidad de los desechos.

Las opciones de tratamiento de riesgos (ISO 31000, 2018) pueden incluir:

- Evitar el riesgo al decidir no comenzar o continuar con la actividad que da lugar al riesgo.
- Tomar o aumentar el riesgo para aprovechar una oportunidad.

- Eliminar las fuentes de riesgo; cambiando la probabilidad.
- Cambiando las consecuencias.
- Compartir el riesgo con otra parte o partes.
- Retener el riesgo por decisión informada.

Específicamente para depósitos de relaves, el proceso debe comenzar en la etapa de diseño, considerando los distintos eventos posibles y sus potenciales consecuencias, con el fin de preverlas y generar planes de emergencia y acción. Luego, en fases operacionales se debe incluir procesos de monitoreo y revisión de los riesgos en los planes de gestión (ISO 31000, 2018) que abarquen todos los aspectos del proceso, con el fin de garantizar que los controles sean efectivos y eficientes. Esto debe incluir:

- Obtener más información para mejorar la evaluación de riesgos;
- Analizar y aprender lecciones de eventos (incluyendo casi accidentes, cambios, tendencias, éxitos y fracasos.);
- Detectar cambios en el contexto externo e interno, incluidos los cambios en los criterios de riesgo que pueden requerir la revisión de los tratamientos y prioridades; e
- Identificación de riesgos emergentes.

Además se debe considerar para el análisis, que los depósitos de relaves son estructuras dinámicas, los cuales, van cambiando de tamaño y volumen durante el tiempo. Es por esto que la gestión y planificación del riesgo debe adecuarse a dichas condiciones y tenerlas en consideración durante el diseño, construcción, cierre y post cierre del depósito. Es por esto, que clasificar los depósitos de relaves basándose en el peligro y sus posibles consecuencias es una herramienta de

gran ayuda para todo el proceso.

2.4.1. Metodología de utilización del análisis de riesgo para clasificación

La metodología más comúnmente utilizada para implementar el análisis de riesgo en sistemas de clasificación corresponde a la implementación de matrices de riesgo. Estas matrices corresponden a tablas de doble entrada, donde por un lado se considera la probabilidad de ocurrencia de un evento, y por otro, las consecuencias potenciales asociadas a él. En la Figura 2.7 se muestra una matriz tipo con categorías cualitativas.

Probabilidad	Severidad de las Consecuencias			
	Despreciable	Baja	Moderada	Alta
Alto	 Riesgo Creciente			
Medio				
Bajo				
Despreciable				

Figura 2.7: Matriz de riesgo tipo para clasificación.

Mediante la elaboración y utilización de dichas matrices, es posible generar distintas categorías de diseño, las cuales representen los distintos niveles de exigencias asociados a la seguridad del depósito. Generalmente, el proceso de generación de este tipo de matrices, en el contexto de análisis de riesgo de depósitos de relaves, es complejo desde el punto de vista de la evaluación de probabilidades de ocurrencia de un evento, ya que presenta altas incertidumbres. Es por esto, que se utilizan medidas indirectas como características geométricas (alturas de muro y volumen almacenado) asociadas al potencial peligro. Por otro lado, en términos de la severidad de consecuencias se utilizan distintos análisis de fallas del depósito, propagando el contenido de relaves y evaluando el daño (consecuencia) generado.

3 Antecedentes



3.1. Catastro de depósitos de relaves en Chile

Los desechos mineros masivos en Chile, según el Ministerio de Salud y el Decreto Supremo N°148 (2003), no se consideran desechos sólidos peligrosos, sin embargo, estos están regulados por leyes especiales que difieren de la eliminación de todos los demás residuos peligrosos. No obstante, la Autoridad Sanitaria tiene la facultad de muestrear, analizar y caracterizar la peligrosidad de dichos residuos cada vez que lo estime oportuno. La autoridad responsable de la correcta aplicación de estas leyes y reglamentos, es el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), y su alcance es de gran importancia debido a la cantidad de depósitos presentes a lo largo del país.

Según los datos publicados por SERNAGEOMIN el 2019, existe un total de 740 depósitos de relaves en Chile, los cuales tienen un volumen autorizado total de 16.000 millones de metros cúbicos. En términos de capacidad, ICOLD (2001) sugiere considerar como pequeños los depósitos inferiores a 1 millón de metros cúbicos, como medianos los depósitos con capacidad entre 1 a 10 millones de metros cúbicos, y grandes a los depósitos de más de 10 millones. Considerando

esto, el 86 % de los depósitos en Chile corresponde a pequeños, sin embargo estos poseen un volumen autorizado de 67 millones de metros cúbicos, lo que representa un 0.42 % en términos volumétricos. Aun así, es importante considerar los riesgos asociados a estos, ya que por condiciones físicas y químicas pueden ser muy altos (Falcon-Hernandez, 2018). El total de depósitos y su volumen se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Cantidad de depósitos de relave según categorías ICOLD

Clasificación ICOLD	Cantidad	Volumen Total [Mm^3]
Pequeños	635	67
Medianos	61	198
Grandes	44	15,757

Falcon-Hernandez (2018) sugiere que la clasificación mostrada anteriormente, probablemente evolucionará debido a su mala distribución, y que según análisis de *Clusster* se deberían utilizar 5 categorías. Esta discusión, actualmente se encuentra abierta principalmente debido a la presencia de depósitos muy grandes y muy pequeños, cubriendo 7 órdenes de magnitud de diferencia. En la Tabla 3.2 se muestran los 5 depósitos más grandes y los 5 depósitos más pequeños existentes actualmente.

Tabla 3.2: Los 5 depósitos más pequeños y más grandes registrados en Chile. Fuente: Falcon-Hernandez, 2018.

Empresa dueña registrada	Nombre del depósito	Volumen autorizado [m^3]
Soc. Guerrero Hnos Cia. Ltda.	Arcadio 1	250
Rubilan Gonzalez	Tranque 1-2	360
Cia. Minera Purificación	Purificación 1	500
Cia. Minera Purificación	Purificación 3	600
Cia. Minera Kalleu	Los Canelos 2	750
Los Pelambres mining Co.	El Mauro	1,133,333,333
CODELCO	Ovejería	1,286,666,667
CODELCO	Talabre	1,451,000,000
CODELCO	Caren	2,192,000,000
Escondida mining Co. Ltda.	Laguna Seca	3,000,000,000

3.1.1. Estado de actividad de los depósitos de relaves

Los depósitos de relaves es posible encontrarlos en cinco condiciones, estas son: Activos, Inactivos, Abandonados, PAM o en construcción. Los depósitos Activos son aquellos que se encuentran actualmente en operación; los depósitos Inactivos corresponden a aquellos que alcanzaron su vida útil pero no realizaron el cierre legal y poseen un representante legal conocido; los depósitos Abandonados son aquellos que llegaron al final de su vida útil sin realizar un cierre de operaciones y no se conoce a su representante legal; Finalmente, los depósitos denominados PAM (Pasivos Ambientales Mineros) corresponden a depósitos que califican como Inactivos o Abandonados pero que constituyen un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o medio ambiente. En la Figura 3.1 y en la Figura 3.2 se presenta la distribución porcentual y regional de dichos depósitos respectivamente.

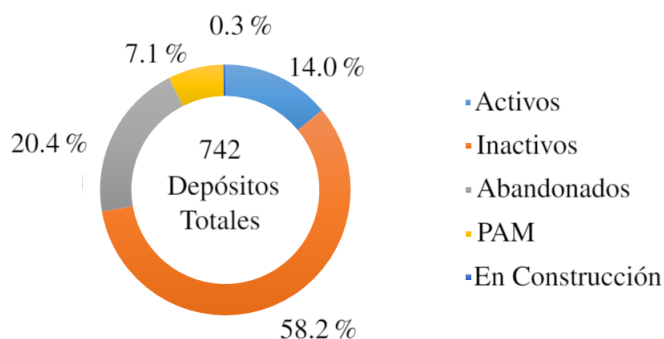


Figura 3.1: Distribución porcentual de depósitos de relaves.

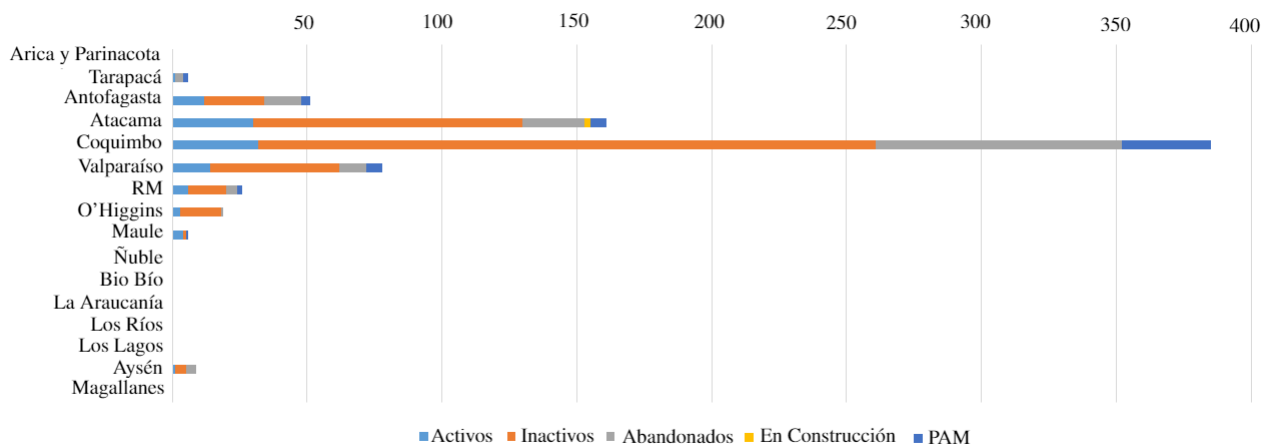


Figura 3.2: Distribución regional de depósitos de relaves.

Es posible notar que los depósitos activos solo representan un 14 % de los depósitos totales y que existe un gran número (636) de depósitos sin un cierre hecho legalmente. Además, se debe destacar que los depósitos se concentran principalmente en la zona centro y norte del país.

3.1.2. Estado de utilización volumétrica de depósitos de relaves

En las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5 se presentan los volúmenes autorizados, volúmenes utilizados a la fecha y el respectivo porcentaje de utilización descrito tanto por regiones y por estado de actividad. Cabe destacar que esta información fue obtenida del catastro publicado por SERNAGEOMIN (2019). Es posible notar que actualmente se cuenta con un 45 % de ocupación de los depósitos, donde las regiones de Tarapacá, Valparaíso y O'Higgins son las que presentan una menor capacidad disponible a la fecha. Además, la región de Antofagasta, la cual presenta la mayor capacidad total con aproximadamente 6 mil millones de metros cúbicos autorizados, aún tiene disponible un 59 % de su capacidad.

Tabla 3.3: Distribución del volumen autorizado en metros cúbicos.

REGIÓN	Activos	Inactivos	Abandonados	PAM	En construcción	Total	%Total
Arica y Parinacota	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Tarapacá	763,531,000	0	1,000	2,690	0	763,534,690	4.76 %
Antofagasta	5,988,084,646	353,129,823	799,608	81,187	0	6,342,095,264	39.52 %
Atacama	1,787,068,150	164,705,798	728,254	5,486,881	27,677,066	1,985,666,149	12.37 %
Coquimbo	1,720,542,422	79,795,512	3,801,039	3,037,520	0	1,807,176,493	11.26 %
Valparaíso	295,601,127	91,960,671	717,832	1,319,398	0	389,599,028	2.43 %
RM	4,185,053,886	123,242,025	119,079	37,367	0	4,308,452,357	26.85 %
Gral B. O'Higgins	384,896,734	51,607,478	1,200	0	0	436,505,412	2.72 %
Maule	662,586	273,333	0	205,120	0	1,141,039	0.01 %
Ñuble	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Biobío	0	0	0	0	0	0	0.00 %
La Araucanía	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Los Ríos	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Los Lagos	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Aysén	2,176,000	11,172,537	105,080	0	0	13,453,617	0.08 %
Magallanes	0	0	0	0	0	0	0.00 %
TOTAL	15,127,616,551	875,887,177	6,273,092	10,170,163	27,677,066	16,047,624,049	100.00 %
% DEL TOTAL	94.27 %	5.46 %	0.04 %	0.06 %	0.17 %	100.00 %	-

Tabla 3.4: Distribución del volumen utilizado a la fecha en metros cúbicos.

REGIÓN	Activos	Inactivos	Abandonados	PAM	En construcción	Total	%Total
Arica y Parinacota	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Tarapacá	565,171,361	0	0	0	0	565,171,361	7.91 %
Antofagasta	2,470,664,361	307,978,053	0	0	0	2,778,642,414	38.87 %
Atacama	745,820,155	80,830,437	0	0	0	826,650,592	11.57 %
Coquimbo	731,211,369	24,484,726	1,864	0	0	755,697,959	10.57 %
Valparaíso	228,519,224	14,005,863	0	0	0	242,525,087	3.39 %
RM	1,632,944,083	3,563,057	0	0	0	1,636,507,140	22.90 %
Gral B. O'Higgins	332,029,367	109,506	0	0	0	332,138,873	4.65 %
Maule	381,066	267,904	0	0	0	648,970	0.01 %
Ñuble	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Biobío	0	0	0	0	0	0	0.00 %
La Araucanía	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Los Ríos	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Los Lagos	0	0	0	0	0	0	0.00 %
Aysén	818,613	8,891,657	0	0	0	9,710,270	0.14 %
Magallanes	0	0	0	0	0	0	0.00 %
TOTAL	6,707,559,599	440,131,203	1,864	0	0	7,147,692,666	100.00 %
% DEL TOTAL	93.84 %	6.16 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	100.00 %	-

Tabla 3.5: Distribución porcentual de capacidad volumétrica disponible.

REGIÓN	Activos	Inactivos	Abandonados	PAM	En construcción	Total
Arica y Parinacota	-	-	-	-	-	
Tarapacá	74.02 %	-	0.00 %	0.00 %	-	74.02 %
Antofagasta	41.26 %	87.21 %	0.00 %	0.00 %	-	43.81 %
Atacama	41.73 %	49.08 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	41.63 %
Coquimbo	42.50 %	30.68 %	0.05 %	0.00 %	-	41.82 %
Valparaíso	77.31 %	15.23 %	0.00 %	0.00 %	-	62.25 %
RM	39.02 %	2.89 %	0.00 %	0.00 %	-	37.98 %
Gral B. O'Higgins	86.26 %	0.21 %	0.00 %	-	-	76.09 %
Maule	57.51 %	98.01 %	-	0.00 %	-	56.88 %
Ñuble	-	-	-	-	-	
Biobío	-	-	-	-	-	
La Araucanía	-	-	-	-	-	
Los Ríos	-	-	-	-	-	
Los Lagos	-	-	-	-	-	
Aysén	37.62 %	79.58 %	0.00 %	-	-	72.18 %
Magallanes	-	-	-	-	-	
TOTAL	44.34 %	50.25 %	0.03 %	0.00 %	0.00 %	44.54 %

3.1.3. Tecnología de depositación de relaves

En la Tabla 3.6 se presentan las tecnologías utilizadas en los depósitos de relaves según cada Región. Es posible notar que el sistema predominante para la depositación de relaves corresponde a Tranques, donde solo en la Región del Maule esta tecnología es superada por otra. Es por esto, que diseñar y monitorizar dichos depósitos es de gran importancia, ya que como se mostró en la Tabla 2.2, es un sistema vulnerable a grandes eventos sísmicos.

Tabla 3.6: Distribución de tecnología de depositación de relaves.

REGIÓN	Tranque	Embalse	Pasta	Espesado	Filtrado	Total
Arica y Parinacota	0	0	0	0	0	0
Tarapacá	6	1	0	0	0	7
Antofagasta	29	10	0	4	4	47
Atacama	127	31	1	1	2	162
Coquimbo	348	35	1	1	2	387
Valparaíso	54	25	1	0	0	80
RM	21	4	1	0	0	26
Gral B. O'Higgins	9	9	0	0	0	18
Maule	1	3	0	0	0	4
Ñuble	0	0	0	0	0	0
Biobío	0	0	0	0	0	0
La Araucanía	0	0	0	0	0	0
Los Ríos	0	0	0	0	0	0
Los Lagos	0	0	0	0	0	0
Aysén	7	1	0	0	1	9
Magallanes	0	0	0	0	0	0
TOTAL	602	119	4	6	9	740
% DEL TOTAL	81.35 %	16.08 %	0.54 %	0.81 %	1.22 %	100.00 %

3.2. Normativa chilena vigente

Según lo expuesto en las secciones anteriores, es posible concluir que debido a la gran cantidad de depósitos de relaves existentes y a las proyecciones del rubro minero, es necesario poseer un marco regulatorio preocupado de estas instalaciones que asegure su construcción, operación y cierre sin afectar a la salud pública, medio ambiente o infraestructura. Chile posee normas con las que regula específicamente los depósitos de relaves mineros, ya sea alguna etapa, todo su ciclo de vida o algún aspecto relacionado con su funcionamiento o posibles efectos. Sin embargo, la mayoría de los países en el mundo no los regula de manera específica y solo aplican normas suplementarias, normas medioambientales, normas de reservas de aguas, reglamentos de tratamiento de residuos peligrosos, entre otras.

En la Tabla 8.1 de la sección 8 Anexo, se presenta un resumen de las normativas aplicables en Chile. A continuación se describen las principales características de los cuerpos normativos mencionados.

Ley N°19.300 / 1994: Bases Generales del Medio Ambiente

En esta ley se identifica como organismo encargado de la Evaluación de Impacto Ambiental el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), el cual, tiene como objetivo verificar y certificar el cumplimiento de la normativa ambiental aplicable, incluido los requisitos de otorgamiento de carácter ambiental contenidos en los permisos ambientales sectoriales (PAS) y calificar la pertinencia, efectividad e idoneidad de las medidas ambientales propuestas. Además, en el artículo 10 se especifica que: "deberán someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental los proyectos de desarrollo minero, comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos y estériles". Por otro lado, en el artículo 3 del Decreto Supremo n°40 del Ministerio del Medio Ambiente, se regulan los Permisos Ambientales Sectoriales Mixtos, donde se estipulan permisos para la construcción y operación de relaves (PAS 135), permiso para establecer botaderos de materiales estériles o acumulación de mineral (PAS 136) y el permiso para la aprobación del plan de cierre de una faena minera (PAS 137).

Asimismo, el Artículo 64 indica que: "la fiscalización del permanente cumplimiento de las normas y condiciones sobre la base de las cuales se han aprobado o aceptado los Estudios y Declaraciones de Impacto Ambiental, de las medidas e instrumentos que establezcan los Planes de Prevención y de Descontaminación, de las normas de calidad y emisión, así como de los planes de manejo establecidos en la presente ley, cuando correspondan, será efectuada por la

Superintendencia del Medio Ambiente”, sin perjuicio de la facultad de fiscalización que recaiga en otros servicios especializados.

Ley N°20.551 / 2011: Regula el cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.

Esta Ley tiene como objetivo asegurar la estabilidad física y química del lugar en donde se encuentran las instalaciones y otorgar el debido resguardo a la vida, salud y seguridad de las personas y del medio ambiente. El encargado de revisar y aprobar sectorialmente los aspectos técnicos de los planes de cierre de faenas mineras, como velar por el cumplimiento de las obligaciones de las empresas mineras es el SERNAGEOMIN, el cual, tiene la facultad de supervisar, vigilar, fiscalizar y sancionar en caso de infracción a la ley y su reglamento.

Además, esta Ley se complementa con el Decreto Supremo N°41 (2012), donde el SERNAGEOMIN ha dictado utilizar las siguientes guías metodológicas:

- Guía Metodológica para la Presentación de Planes de Cierre de Exploraciones y Prospecciones Afectas al Procedimiento Simplificado, de 2013 (SERNAGEOMIN, 2013)
- Guía Metodológica sobre Constitución y Disposición de la Garantía Financiera que establece la Ley N°20.551 que Regula el Cierre de las Faenas e Instalaciones Mineras, de 2013 (SERNAGEOMIN, 2013).
- Guía Metodológica de Evaluación de Riesgos para Cierre de las Faenas Mineras, de 2014 (SERNAGEOMIN, 2014).
- Guía Metodológica para la Presentación de Planes de Cierre sometidos al Procedimiento de Aplicación General. de 2014 (SERNAGEOMIN, 2014).

- Guía Metodológica para la Estabilidad Química de las Faenas e Instalaciones Mineras, del año 2015 (SERNAGEOMIN, 2015).

DS N°248 / 2007 - Ministerio de Minería: Reglamento para la aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de relaves.

Es la normativa específica que aborda los relaves mineros, producto de la concentración y flotación mineral, otorgando al SERNAGEOMIN atribuciones y facultades de control y fiscalización en esta materia, facultándolo para la aplicación de sanciones en caso de contravención al mismo y a las resoluciones que para su cumplimiento se dispongan, en conformidad al Reglamento de Seguridad Minera. Este Decreto señala que se necesita una aprobación del SERNAGEOMIN para construir y operar cualquier depósito de desechos o relaves mineros. Cualquier modificación al proyecto aprobado durante la construcción u operación debe ser autorizada por el SERNAGEOMIN antes de su implementación.

DS N°50 / 2015 - Ministerio de Obras Públicas

Este decreto tiene por objetivo aprobar el reglamento presente en el artículo 295 del *Código de Aguas*, donde se especifican las condiciones técnicas que deberán cumplir proyectos de construcción y operación de obras hidráulicas, las cuales son mencionadas en el artículo predecesor del mismo código. Las obras hidráulicas incluidas corresponden a embalses, tranques de relaves, embalses industriales, relaveductos, mineroductos, concentraductos, y en general, cualquier obra con capacidad para almacenar o conducir agua o elementos transportados por esta. Se excluyen particularmente los depósitos de relaves en Pasta, Filtrados y aquellos depósitos Espesados que

contengan como mínimo, al momento de depositarse, un 65 % o más de concentración en peso de sólidos.

3.2.1. Aplicación de reglamentos

A continuación, se detallará como se aplican los reglamentos mencionados anteriormente respecto a las distintas condiciones que aseguran el correcto funcionamiento de las instalaciones de depósitos de relaves. Particularmente, se describirán las regulaciones sobre:

- Clasificación de depósitos.
- Estabilidad física;
- Estabilidad química;
- Manejo de aguas;
- Construcción, operación y control;

Regulación de Clasificación de depósitos de relaves.

Como se mencionó en capítulos anteriores, la clasificación de los depósitos de relaves actualmente está directamente relacionada con las consecuencias provocadas en su entorno debido a un posible evento de falla. Sin embargo, en el reglamento chileno no existe regulación que considere esta práctica enfocada a la gestión de riesgos. Los depósitos de relaves se clasifican según el Decreto Supremo N°50 respecto a su volumen y altura de muro de contención principal, los cuales, son una medida indirecta del peligro de la instalación. Este reglamento clasifica en 3 categorías a los embalses (incluyendo tranques de relaves), dependiendo de su tamaño o

capacidad, donde la Categoría A corresponde a pequeños embalses con altura máxima de muro mayor a 5 metros y menor a 15 metros, o bien una capacidad entre 50.000 y 1.500.000 metros cúbicos; la Categoría B corresponde a instalaciones medianas, con altura máxima de muro entre 15 a 30 metros, o bien una capacidad entre 1.500.000 y 60.000.000 metros cúbicos; finalmente, la Categoría C corresponde a depósitos grandes con alturas de muro superior a 30 metros o capacidad máxima mayor a 60.000.000 metros cúbicos.

Regulación de la Estabilidad física de depósitos de relaves

La estabilidad física en la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras se define como: *Situación de seguridad estructural, que mejora la resistencia y disminuye las fuerzas desestabilizadoras que pueden afectar las obras o depósitos de una Faena Minera, para la cual se utilizan medidas con el fin de evitar fenómenos de falla, colapso o remoción. Se consideran medidas para la estabilización física aquellas como la estabilización y perflamamiento de taludes, reforzamiento o sostenimiento de éstos, compactación del depósito y otras que permitan mejorar las condiciones o características geotécnicas que componen las obras o depósitos mineros. La Estabilidad Física comprende, asimismo, y en los casos que sea técnicamente procedente, el desmantelamiento de las construcciones que, adosadas permanentemente a la Faena Minera, la aseguren.*

Considerando esto, en el Decreto Supremo N°248 se entregan indicaciones para asegurar dicha condición en los proyectos nuevos de depósitos de relaves. Así, el usuario debe presentar al SERNAGEOMIN una solicitud de aprobación de su proyecto, donde se solicita lo siguiente:

- **Características del sitio y del depósito:** Ubicación, distancia a centros poblados, planos,

características de la hoya hidrográfica y capacidad del depósito.

- **Condiciones técnicas de sitio:** Características geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, hidrológicas, sísmicas, meteorológicas, topográficas.
- **Características técnicas de los materiales:** Resistencia al corte, compresibilidad, permeabilidad, granulometrías, pesos unitarios, pesos específicos y plasticidad.
- **Diagramas de flujo y planos generales incluyendo:** Muros, Construcciones de muros de pie, sistemas de drenaje.
- **Descripción del método constructivo:** Prohíbe el método de aguas arriba.
- **Descripción de sistemas de instrumentación:** Presiones de poros, niveles freáticos, desplazamientos, asentamientos, filtraciones, aceleraciones sísmicas, entre otras.

Además, se solicita realizar un análisis de estabilidad de taludes para las etapas de operación y cierre, de acuerdo al estado actual del conocimiento, el cual debe incluir diferentes fases de precisión según la importancia y evaluación de riesgos. Estas fases se describen a continuación:

- **Fase I:** Simulación de estabilidad estática (Análisis pseudo-estáticos) asumiendo licuefacción total de los relaves de la cubeta.
- **Fase II:** Simulación de estabilidad estática (Análisis pseudo-estáticos) con determinación simplificada de las presiones de poros.

El factor de Seguridad resultante del cálculo de las fases anteriores, no debe ser menor de uno coma dos (1,2). Para el caso de depósitos pequeños (con muros menores de 15 metros de alto) cumplida esta condición, no será necesario cumplir la fase III.

- **Fase III:** Análisis dinámicos basados en ensayos de propiedades dinámicas de los suelos,

incluyendo cálculos de desplazamientos.

- **Fase IV:** Análisis para condición de Cierre, incluyendo eventos solicitantes máximos y efectos del tiempo en las propiedades de los depósitos.

Finalmente, se solicita obtener el sismo de diseño a partir de las estadísticas de las zonas sismogénicas de la región y estimar la aceleración máxima respectiva en la zona de emplazamiento del depósito.

Regulación de la Estabilidad química de depósitos de relaves

La estabilidad química en la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras se define como:

"Situación de control en agua, aire y suelo, de las características químicas que presentan los materiales contenidos en las obras o depósitos de una Faena Minera, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar, si fuere necesario, la reacción química que causa acidez, evitando el contacto del agua con los residuos generadores de ácidos que se encuentren en obras y depósitos masivos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos, depósitos de estériles y ripios de lixiviación."

Según esta definición, la estabilidad química no hace referencia explícita a una situación de contaminación, sino que hace referencia al control de generación de acidez. En Chile, para que exista contaminación, según la Ley 19.300, se debe superar las concentraciones o permanencia de sustancias, elementos, energía o combinación de ellas establecidas en la legislación vigente. Así, la acidez generada se debe controlar para no superar lo establecido en las normas de calidad ambiental de aire o agua. Cabe destacar, que actualmente no existen normas de calidad para la matriz de suelo, por lo que en este aspecto, no es posible referirse a contaminación legalmente.

Considerando esto, en el Decreto Supremo N°248 se especifican algunos requisitos indi-

rectos para el control de la estabilidad química. En general, se tiene como objetivo prevenir el contacto de aguas externas y prevenir o minimizar las infiltraciones desde la cubeta hacia el suelo de fundación. Así, se solicita lo siguiente:

- Sistema de purificación de aguas claras, si es necesario;
- Construcción de canales de desvío de aguas lluvias, y construcción de canales de contorno;
- Sistema de impermeabilización del fondo de la cubeta y un sistema de captación de las infiltraciones si es requerido;
- Canales perimetrales para la contención de escorrentías; y
- Obras para la intercepción y desviación de cursos de aguas naturales existentes en el lugar de emplazamiento.

Por otro lado, en el Decreto Supremo N°41, se especifica como requisito para el cierre de los depósitos de relaves las siguientes condiciones:

- Secado de lagunas de aguas claras.
- Mantención de canales perimetrales.
- Sistema de evacuación de aguas lluvia.
- Cierre de accesos.
- Cobertura de cubeta y taludes.
- Piscinas de emergencia y/o evaporación.
- Sistema de monitoreo de infiltraciones.
- Captación y tratamiento de infiltraciones.

- Caracterización química y mineralógica de los materiales dispuestos en el depósito.

Regulación de Manejo de aguas

El manejo y control de aguas para los depósitos de relaves se especifica de manera de detallar las obras hidráulicas necesarias para asegurar la capacidad de almacenamiento, control de crecidas y evitar liberación de aguas de contacto. En el Decreto Supremo N°248 se mencionan los estudios, documentos y obras necesarias para la aprobación de un proyecto de relaves. Además, en el Decreto Supremo N°50 se detallan consideraciones de diseño para algunas obras hidráulicas pertenecientes a las instalaciones de depósitos de relaves con contenido de sólidos depositados menor al 65 %. En general, para la aprobación de un proyecto se requiere presentar como mínimo:

- Estudios hidrológicos, hidrogeológicos, hidráulica y mecánica fluvial.
- Registro y control de caudales de recirculación.
- Proyecto de desvío de ser necesarios, el cual, permita definir las obras necesarias para desviar el escurrimiento de un cauce, durante el periodo de construcción.
- Diagramas de flujo y planos generales de: Sistema de descarga, Sistema de recuperación de aguas claras, Sistema de purificación de aguas claras (si es necesario), Sistema de drenaje, Vertederos de emergencia, Canales de desvío de aguas lluvia y Canales de contorno.
- Descripción e ilustración de las características especiales de diseño: Balance de masas del relave, Sistema de drenaje y recolección de las aguas percoladas de los muros, Sistema de descarte o recirculación de las aguas decantadas desde la laguna o zona de aguas claras, Sistema de impermeabilización del fondo de la cubeta y su sistema de captación de las infil-

traciones, Canales perimetrales para contención de escorrentías y Obras para la intercepción y desviación de cursos de aguas naturales existentes en el lugar de emplazamiento.

Además, el diseño hidraulico de los embalses o depósitos de relaves deben cumplir con lo mencionado en el artículo 35 del DS N°50:

- **Proyecto de desvío:** El período de retorno de la crecida de diseño a utilizar en este proyecto deberá determinarse de modo tal que el riesgo hidrológico no sea mayor al 5 %. En este análisis se aceptará el uso conjunto de la(s) ataguía(s) y la presa, en función del crecimiento de las obras y del Programa de Construcción. En el caso que la desviación de un cauce natural sea de carácter permanente, y esté destinada a derivar la totalidad de las aguas del o los afluentes a un embalse de relaves, de manera que éstas no entren en contacto con el depósito, la obra de desvío deberá ser diseñada para la Crecida Máxima Probable.
- **Canales de contorno:** Los canales de contorno o perimetrales, no permanentes, utilizados durante la vida útil del depósito se diseñarán para un período de retorno mínimo de 50 años y se verificarán para un período de retorno de 100 años.
- **Crecida de diseño para el evacuador de seguridad:** Se debe implementar un vertedero de seguridad que opere durante toda la vida útil del embalse, cuyos períodos de retorno de diseño serán los siguientes:
 1. Categoría A: 1.000 años
 2. Categoría B: 10.000 años
 3. Categoría C: Crecida Máxima Probable

Si se determina que la Crecida Máxima Probable es menor a la crecida asociada a un

período de retorno 10.000 años, para los embalses de Categoría C, se deberá utilizar este último valor como crecida de diseño.

- **Revancha mínima:** La carga hidráulica sobre el evacuador de seguridad la definen los aportes de las aguas claras y la crecida de diseño. La diferencia de niveles entre la carga recién definida y el coronamiento del muro se entiende como revancha mínima. Para su cálculo, se considerarán los factores indicados en la letra d) del artículo 30 del presente Reglamento. El valor mínimo aceptado para la revancha será de 1.0 m, cuando del cálculo se obtengan valores inferiores a esta cifra.
- **Control de filtraciones:** Con respecto a la impermeabilización del muro y de la cubeta, se establece que, a lo menos, se deberán considerar las medidas que se señalan a continuación:
 1. Se deberá usar una geomembrana impermeable u otro material o solución equivalente, en el talud de aguas arriba, tanto en los muros de arena como en los de material de empréstito.
 2. Se deberá impermeabilizar el fondo de la cubeta, antes de comenzar el llenado, con capas de material fino impermeable, debidamente compactado, u otra solución equivalente. Para este caso, no se aceptará impermeabilizar con geomembrana. La no inclusión de esta medida de control de filtraciones deberá justificarse adecuadamente con estudios y pruebas de campo suficientemente representativas, en ubicación y cantidad, del área de estudio.

Regulación de Construcción, Operación y Control

Los aspectos constructivos, operacionales y de control para las instalaciones de depósitos de relaves están descritos en el Decreto Supremo N°248, donde se especifican las responsabilidades y deberes de parte del Usuario que se deben cumplir para la aprobación de un proyecto. Respecto a la construcción, se hace énfasis en que esta debe ajustarse al proyecto aprobado y debe cumplir con todas las especificaciones técnicas contenidas en la Resolución aprobatoria, dejando explícito que cualquier cambio o modificación que se desee efectuar durante la etapa de construcción debe ser previamente autorizado por el Sernageomin. Además, se solicita que el Usuario comunique la fecha de inicio y el programa de actividades a ejecutar en esta etapa. Finalmente, se destaca que el Sernageomin realizará inspecciones técnicas periódicas, con el objetivo de verificar en terreno que la construcción se ajusta a lo especificado en el proyecto aprobado, y que una vez terminada la construcción, en un periodo de un mes desde el inicio de la operación, el Usuario deberá presentar los planos iniciales de las obras construidas.

Por otro lado, para la correcta Operación y Control de los depósitos de relaves se debe cumplir con distintos requisitos. Entre estos, se encuentra como deber del Usuario enviar un informe trimestral sobre la operación y mantención del depósito con la información solicitada en los formularios establecidos o con cualquier otra información adicional que se considere relevante. Además, el Usuario debe elaborar y mantener actualizado un Manual de Emergencias, el cual contenga los procedimientos para la mitigación, restauración y compensación de los efectos de posibles accidentes, situaciones de emergencia y eventos naturales extremos. Este Manual debe permitir enfrentar de forma exitosa las situaciones adversas, climáticas, hidrológicas, sísmicas, volcánicas o falla del sistema de captación de aguas claras. Finalmente, se especifica que la responsabilidad

de notificar de inmediato cualquier emergencia es del Usuario, y este debe hacerse cargo de cualquier ejecución de medidas que reestablezcan la seguridad del depósito.



4 Revisión y análisis de bibliografía



4.1. Introducción

En el presente capítulo se identifican las normativas y guías sobre depósitos de relaves de distintos países con el objetivo de capturar las últimas prácticas propuestas para el diseño, construcción y operación de dichas instalaciones. Esto en el contexto de generar una base robusta de información para luego, en el Capítulo 5, presentar las consideraciones más aceptadas por la comunidad internacional sobre el contenido requerido para una normativa alineada con los estándares actuales y que sea lo suficientemente profunda abordando los tópicos más relevantes sin caer en especificaciones que puedan quedar obsoletas en un periodo corto de tiempo.

Particularmente, se consideraron países que tienen como una de sus actividades económicas principales a la industria minera, estos son: Australia, Canadá, Brasil y Estados Unidos. Además se consideraron instituciones internacionales como ICOLD. Cabe destacar, que cada país analizado presenta características propias, particularidades y necesidades específicas respecto a los distintos aspectos que dan origen a su ordenamiento jurídico, lo que se debe tomar en cuenta para realizar una revisión comparativa de las normativas utilizadas. Existen diferencias geográficas,

administrativas y de disponibilidad de recursos que generan que cada país aborde de manera particular la problemática. Un claro ejemplo es la diferencia entre la legislación que presentan países de Estado único como Chile, con leyes que aplican en todo su territorio soberano, y países federados que se caracterizan por tener varios estados, donde cada uno aplica reglamentos según sean sus necesidades y ordenamiento.

4.2. Australia

Para el desarrollo y aprobación de un proyecto de depósito de relaves en Australia, se deben cumplir distintos requisitos tanto a nivel de gobierno central como a nivel de los distintos gobiernos estatales. Cada una de estas entidades tiene sus propias guías y/o códigos de buenas prácticas donde se especifican en detalle los documentos necesarios para el diseño, construcción, operación y cierre de almacenamientos de relaves. Además, existe documentación emitida por la Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) donde se presentan metodologías para el desarrollo de un proyecto seguro y técnicamente apropiado.

Principalmente, se tienen marcos legales específicos de responsabilidades como son el Mining Act (1978) y Mines Safety and Inspection Act (1995). Por otro lado, los Estados de Western Australia y Victoria han promulgado por medio de los departamentos de Minas y Petróleo, y por el departamento de Desarrollo económico, Empleos, Transporte y Recursos, guías con requisitos particulares para la aprobación de proyectos de depósitos de relaves. En la Tabla 8.2 de la sección 8 Anexo, se presenta un resumen de los documentos relevantes y su campo de aplicación específico. A continuación se describen las características generales de estos.

Mining Act - 1978

Este documento corresponde a un marco regulatorio para la minería y cualquier otra materia relacionada directamente y se complementa con el documento Mining Regulations (1981). Por otro lado, la Ley de Protección del Medio Ambiente y Conservación de la Biodiversidad (1999) establece un riguroso proceso de evaluación y aprobación a nivel nacional. Los temas cubiertos por esta ley incluyen patrimonio nacional natural, especies amenazadas y humedales de importancia internacional. El cumplimiento de las regulaciones gubernamentales establece una plataforma de rendimiento mínimo para la industria minera en relación con la gestión de relaves.

Mines Safety and Inspection Regulation - 1995

Este documento, emitido por el Gobierno de Western Australia, impone los deberes generales para mantener los lugares de trabajo seguro y saludable en las operaciones mineras y proteger a las personas que realizan trabajos peligrosos. Estos deberes aplican para empleadores, empleados, contratistas personas involucradas en el diseño, suministro, instalación y mantenimiento de planta. Esta Ley describe las obligaciones de cada grupo y establece sanciones por cualquier incumplimiento de esas obligaciones para ayudar a prevenir situaciones inseguras. Proporciona un marco en el que el deber general de cuidado está respaldado por consultas, cooperación, normas y procedimientos en el lugar de trabajo para resolver problemas. Además, describe algunos de los requisitos que se aplican a situaciones de trabajo específicas como trabajos en depósitos de relaves y condiciones de potencial contaminación atmosférica por dichos desechos. Si bien se deben cumplir los reglamentos, la responsabilidad primordial es cumplir con los deberes generales de la Ley.

Code of Practice. DMP - 2013

En documento fue emitido por el Departamento de Minas y Petróleo en virtud de la Ley de Seguridad e Inspección expuesta anteriormente, y tiene respaldo del Comité Asesor de la Industria Minera (MIAC) y fue aprobado por el Ministro de Minas y Petróleo. En general, esta guía tiene como objetivo lograr los estándares requeridos por la legislación y se aplica a cualquier persona que tenga un deber de cuidado o responsabilidad sobre un depósito.

Este código está preparado considerando los riesgos potenciales de una instalación de depósito de relaves y está desarrollado con un enfoque basado en desempeño. En él, se especifican los factores a ser considerados para una correcta selección de sitio de emplazamiento, un correcto diseño, construcción, operación, monitoreo y vigilancia.

Guide to the preparation of a design report for TSF. DMP - 2015

Esta guía se ha elaborado para ayudar a los diseñadores de instalaciones de almacenamiento de relaves a preparar el informe de diseño correspondiente. Describe la estructura requerida del informe de diseño que debe presentarse al Departamento de Minas y Petróleo (DMP) de acuerdo con la sección 4 de las pautas de la Propuesta de Minería según lo requerido por la Ley de Minería de 1978.

En el documento se especifica que el informe de diseño debe describir las bases del diseño y justificar los parámetros adoptados mediante investigaciones de muestreo y estudios geológicos, hidrológicos, higrológicos, etc. Además, se solicita un enfoque con evaluación de los niveles de riesgo involucrado en las distintas etapas del ciclo de vida del depósito, incluido el desarrollo, construcción, operación y cierre. Finalmente, se solicita que el informe de diseño evalúe variacio-

nes en el perfil de superficie y subsuperficie, y su impacto en las propiedades físicas y parámetros de diseño, evaluación de los parámetros operativos, monitoreo y requisitos de inspección.

Design and Management of TSF. ERR - 2017

Esta guía tiene como objetivo proporcionar información relevante y requisitos para preparar un plan de trabajo y diseño de depósitos de relaves según lo especifica la Sección 77G de la Ley de Recursos Minerales (1990) para su evaluación y aprobación por parte del Departamento de Desarrollo Económico, Empleos, Transporte y Recursos. Con esta, se garantiza que la gestión de los depósitos de relaves de las industrias mineras y extractivas del Estado de Victoria se realice de manera segura y proteja el medio ambiente. Específicamente busca que un depósito sea:

- Diseñado, construido, operado, monitoreado y cerrado según los mejores estándares y prácticas de la industria.
- Seguro y estructuralmente estable.
- Gestionado para minimizar impactos sobre la seguridad pública, infraestructura y medio ambiente.
- Rehabilitado para minimizar el impacto social, las comodidades visuales adversas y los riesgos a largo plazo para el medio ambiente.

Guide on Tailings Dams - 2012

Esta guía fue elaborada por ANCOLD con el objetivo de brindar asesoramiento técnico para el diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves destacando aspectos de

la gestión de riesgos en todo el ciclo de vida del proyecto para lograr un desarrollo sostenible según lo definido por el Informe Bruntland (UNWCED, 1987) y adoptado por el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM). Este documento introduce el concepto de evolución del diseño, por el cual el diseño inicial debe adoptar parámetros de diseño conservadores y de "mejor estimación" sobre la base de los datos disponibles que se pueden verificar, validar o refinar progresivamente, a medida que los datos reales estén disponibles. Esto se conoce como enfoque de observación para el diseño. Cabe destacar, que el contenido de esta guía está dirigido principalmente a proporcionar asesoramiento sobre almacenamiento de relaves directamente en el suelo, pero muchos de sus principios se aplican a otras formas de depositación de relaves.

4.3. Canadá

Al igual que Australia, al ser un país de carácter estatal, Canadá presenta una serie de leyes federales y otras correspondientes a cada gobierno provincial. Así, Algunos estados como Québec, British Columbia u Ontario han promulgado regulaciones específicas de seguridad de depósitos de relaves, mientras que otras usan leyes o regulaciones existentes para autorizar el diseño, construcción, inspección, operación, rehabilitación, alteración o desmantelamiento de instalaciones de depósitos de relaves. Además, la Canadian Dam Association (CDA) ha emitido guías donde que sugieren metodologías y procedimientos para la correcta ejecución, desde su concepción, de proyectos relativos a embalses de agua o de relaves. Por otro lado, la institución The Mining Association of Canada (MAC) ha emitido una serie de documentación que apunta a la gestión basada en riesgos de los depósitos en su etapa de operación, dando las directrices para generar planes de mantenimiento, vigilancia y responsabilidades que sean apropiados para

minimizar los riesgos. En la Tabla 8.3 de la sección 8 Anexo, se presenta un resumen de los documentos más relevantes y a continuación una descripción de estos.

Québec Mining Act - 2000

Este documento corresponde a la Ley de minería que rige en el Estado de Québec desde el año 2000 y su última actualización fue realizada en el año 2019. El propósito de esta ley es promover la prospección, exploración y desarrollo de minerales de acuerdo con el principio de desarrollo sostenible. Es aplicable a las sustancias minerales que se encuentran en tierras de dominio del Estado y dominio privado y entre su contenido principal se encuentran los requisitos de gobernanza y responsabilidades, registros y documentación, medidas de protección y rehabilitación, recuperación óptima del mineral, sitios de emplazamiento, inspecciones, entre otros. Además, presenta la siguiente definición de Relaves: *"Sustancias minerales rechazadas, lodos y agua, excepto el efluente final, de las operaciones de extracción y tratamiento de minerales, y la escoria de las operaciones de pirometalurgia."*

Ontario Mining Act - 1990

Ley de minería vigente en el Estado de Ontario desde el año 1990 y actualizada en 2019. El propósito de esta Ley es alentar la prospección, el registro de reclamos mineros y la exploración para el desarrollo de recursos minerales, de manera consistente con el reconocimiento y la afirmación de los derechos de los aborígenes y tratados existentes en la sección 35 de la Ley de Constitución, 1982, incluyendo el deber de consultar y minimizar el impacto de estas actividades en la salud pública y la seguridad y el medio ambiente. En esta, se especifican los requisitos de

administración, registro, derechos, documentación, planes de exploración, planes de rehabilitación de tierras, inspecciones de todas las actividades mineras. Especialmente, asegura el derecho a depositar relaves, limos u otros productos de desecho de manera tal que no sea perjudicial para la vida o salud humana.

Guidance Document: Health, Safety and Reclamation Code for Mines. British Columbia - 2016

Este documento se ha emitido con el objetivo de proporcionar orientación y contexto a los propietarios, ingenieros de registros, reguladores, consultores y auditores de depósitos de relaves, sobre las expectativas del Ministerio de Energía y Minas (institución encargada de regular proyectos de relaves) para la aplicación del Código Legal: Health, Safety and Reclamation Code for Mines. En esta guía se proporciona una descripción general de los elementos de un sistema de gestión de relaves. Aunque las instrucciones detalladas sobre el desarrollo e implementación de elementos específicos están más allá del alcance de este documento, sin embargo, proporcionan referencias en todas sus secciones. Los elementos principales que aborda son: Evaluación de riesgo, Criterios de diseño, Caracterización del sitio de emplazamiento, Aspectos constructivos y operacionales y Plan de cierre.

Guidelines for Preparing Mine Closure Plans. Québec - 2017

Este documento corresponde a una guía preparada y revisada por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales (MERN) de Québec y en colaboración con el Ministerio de Desarrollo Duradero, del Medio Ambiente y Cambio Climático. Tiene como objetivo facilitar la preparación

del plan de rehabilitación y recuperación de tierras al momento del cierre de una faena minera requerido por el Québec Mining Act. La guía está dividida en tres capítulos. El primero proporciona información general sobre la gobernanza, procesos administrativos y todo lo requerido por el Mining Act. El capítulo segundo trata los requisitos generales de cierre, entre los cuales se encuentran los detalles de estabilidad física y química de depósitos de relaves. Por último, el tercer capítulo establece los elementos que deben incluirse en el plan de cierre presentado ante el MERN.

Dam Safety Guidelines. CDA - 2007

Corresponde a una guía elaborada por Canadian Dam Association, la cual no tiene ninguna vinculación a documentos legales por su parte. Sin embargo, es utilizada y citada por un gran número de documentos en los Estados canadienses. El contenido de esta guía consiste en pautas que describen los procesos y criterios para la gestión de la seguridad de las presas de acuerdo a los intereses de los propietarios, reguladores, operadores e ingenieros, incluyendo elementos de gestión de riesgos, operación, mantención, vigilancia, análisis, evaluación y consideraciones de diseño. Cabe destacar, que este documento está pensado para ser aplicado a instalaciones de almacenamiento de agua, y no de relaves. Por lo tanto, para su aplicación se debe considerar esto y ser complementado con el boletín técnico: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams, emitido el 2014 y que posee especificaciones especiales para depósitos de relaves.

Management of Tailings Facilities. MAC- 2017

Este documento corresponde a una guía publicada por la Mining Association of Canada, cuya aplicación es obligatoria para los miembros de MAC para sus operaciones en Canadá. Sin embargo, está diseñada para ser un documento que pueden ser aplicado en cualquier parte del mundo. Esta guía de relaves brinda orientación sobre las mejores prácticas para realizar una gestión segura y responsable tanto ambiental como socialmente de las instalaciones de depósitos de relaves. En general, tiene como propósito proporcionar un marco para la gestión de las instalaciones de relaves, ayudar a los propietarios de instalaciones a desarrollar sistemas de gestión que incluyan criterios ambientales y de seguridad; y mejorar la coherencia de la aplicación de principios de ingeniería y gestión razonables y prudentes.

Operation, Maintenance and Surveillance Manual. MAC- 2019

Al igual que el documento anterior, esta guía tiene los mismos alcances de aplicación y filosofía de uso. Está enfocada principalmente a dar las pautas para generar un Manual de Operación, Supervisión y Vigilancia (OMS por sus siglas en inglés) para depósitos de relaves. Este Manual apunta proporcionar un marco para las actividades relacionadas con la gestión del depósito, proporcionar una base para medir el rendimiento de la instalación con la cual sea posible una toma de decisiones efectiva, y finalmente, documentar los roles, responsabilidades y niveles de autoridad del personal que realiza actividades claves relacionadas con la correcta gestión del depósito.

4.4. Estados Unidos

En Estados Unidos no existe una agencia con competencia a nivel nacional que autorice la construcción de depósitos de relaves. Sin embargo, cualquier proyecto que genere perturbaciones considerables en su medio receptor debe ser aprobado por el United States Forest Service o por Bureau of Land Management. La revisión de las consecuencias generadas por los depósitos es evaluada de forma independiente por cada Estado. En general, el diseño y consideraciones para la ejecución de un proyecto de depósitos de relaves son realizados según las disposiciones de la Federal Emergency Management Agency (FEMA), quien está encargada del manejo de emergencias federales y tiene una serie de publicaciones al respecto. En la Tabla 8.4 de la sección 8 Anexo, se muestran los principales documentos existentes en Estados Unidos.

General Mining Act - 1872

Es la ley federal que autoriza y rige la prospección y la extracción de minerales económicos, como el oro, el platino y la plata, en tierras públicas federales. En este documento no hay ninguna indicación respecto de la disposición de residuos mineros.

Federal Land Policy and Management Act - 1976

Este estatuto esta en cargado de legislar el uso de territorios federales sin modificar las atribuciones que sean explícitas en el General Mining Act. Se indica que la aprobación de territorios para la actividad minera no debe degradar innecesariamente los territorios públicos.

Federal Guidelines for Dam Safety - 2004

Esta guía se aplica a las prácticas de gestión para la seguridad de presas de todas las agencias federales responsables de la planificación, diseño, construcción, operación o regulación de presas. Las pautas presentadas en este documento son aplicables a todo tipo de presas, incluyendo depósitos de relaves, que son definidos como: "terraplenes contruidos mediante la eliminación de productos de desecho y la retención de un estanque de eliminación". Es importante, considerar análisis razonables para la aplicación de esta guía según sea el tamaño, complejidad y el peligro que represente la instalación.

El objetivo del documento es fomentar altos estándares de seguridad en las prácticas y procedimientos que las agencias federales usan o requieren de aquellos que regulan para la investigación, diseño, construcción, operación y mantenimiento del sitio del depósito y preparación para emergencias.

Federal Guidelines for Dam Safety: Emergency Action Planning for Dam - 2013

Esta guía tiene como propósito proporcionar pautas para la elaboración de un Plan de Acción de Emergencias para facilitar el desarrollo de planes que sean integrales y consistentes. Así, el objetivo último corresponde a proteger vidas y reducir el daño a la propiedad debido a una posible falla en el sistema de contención del depósito o un incidente operativo. Este plan de emergencias debe ser elaborado mediante una evaluación de consecuencias según el área de inundación aguas abajo del depósito que potencialmente afectaría.

Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams - 2005

En este documento se presenta una guía para la determinación de cargas sísmicas de diseño y metodologías de análisis sísmico para nuevos depósitos o para evaluar la seguridad de instalaciones existentes. En general, se abordan los temas de selección de terremoto de diseño, caracterización de movimientos de suelo, análisis sísmico de presas y fundaciones y evaluación estructural para dichas cargas.

Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams - 2004

En este documento se presenta un sistema de clasificación de riesgo potencial para depósitos basándose en las consecuencias que se esperan al ocurrir un evento de falla o mal funcionamiento de las instalaciones. La clasificación se enfoca principalmente en la existencia de pérdida de vida humana y en los efectos económicos y medio ambientales.

Technical Report Design and Evaluation of Tailing Dams - 1994

El propósito de este documento es proporcionar una introducción para los administradores de territorios federales, instituciones responsables de aprobar proyectos y el público en general sobre los depósitos de relaves, particularmente respecto a sus características de ingeniería y su capacidad para mitigar o minimizar los efectos adversos para el medio ambiente. Si bien su alcance es amplio, esta guía está enfocada a dar pautas integrales para el diseño y evaluación de los depósitos de relaves, especialmente considerando la estabilidad física y construcción del mismo.

4.5. Brasil

En la Constitución brasileña se establece en su artículo 225 inciso 2°, que es obligación recuperar el impacto causado por las actividades mineras. El Ministerio de Minas y Energía debe aprobar un informe que incluya todos los asuntos ambientales de la mina. Este informe debe incluir un Plan de Aprovechamiento Económico, donde se debe informar sobre las sustancias minerales, volumen de salida, reservas, el flujo de producción y un informe de Plan de Recuperación del Área Degradada, donde se especifique un plan de cierre que debe aprobarse por la Agencia de Protección Ambiental.

Debido al colapso de un depósito de relaves de la minera Samaco en el año 2015, se emitió la Ordenanza 70.389 en el año 2017, donde se establecen todas las exigencias de registro, diseño y operación que se deben cumplir en las instalaciones de depósitos de relaves. Por otro lado, se destaca que en Brasil no se cuenta con una norma específica para la realización de un plan de cierre minero, es por esto que la Evaluación de Impacto Ambiental se utiliza para manejar lo relativo a dicho plan. A continuación se describen los documentos mencionado en la Tabla 8.5.

Ley n°12.334: Establece Política Nacional de Seguridad de Represas - 2010

En esta Ley se modifica la redacción del artículo 35 de la Ley n°9.433 de 1997, y crea el Sistema Nacional de Información sobre seguridad de represas destinadas a la acumulación de aguas para cualquier uso, disposición final o temporal de residuos y a la acumulación de residuos industriales.

Portaria n° 70.389 Ministério de Minas y Energía - 2017

Los depósitos de relaves están regidos por el Departamento Nacional de Producción Minera del Ministerio de Minas y Energía, donde en este documento se presentan especificaciones para crear un registro nacional de depósitos mineros y un Sistema integrado de gestión de seguridad. Además, establece frecuencias de actualización de información y monitoreo, define la clasificación de los técnicos responsables, establece el contenido mínimo y nivel de detalle del Plan de Seguridad y Plan de Acción de Emergencia.

Resolução n°13 Agencia Nacional de Mineração - 2019

En este documento, se establecen las regulaciones para asegurar la estabilidad de los depósitos de relaves mineros, teniendo particular consideración con los depósitos construidos con el método de aguas arriba. Además, se prohíbe dicho método constructivo para nuevas instalaciones. Por otro lado, prohíbe la construcción, mantención y operaciones de instalaciones administrativas, viviendas, zonas recreativas, estructuras mineras, entre otras, dentro de la Zona identificada como Zona de Auto Rescate, la cual es determinada mediante mapas de inundación generados por una posible falla del depósito.

4.6. Internacional

Existen distintas organizaciones internacionales que se han enfocado tanto en la industria minera como en la ingeniería de depósitos de agua o relaves. En particular se menciona la International Commission On Large Dams (ICOLD), que es una organización no gubernamental que

proporciona foros para el intercambio de conocimientos y experiencia en el campo de las represas. Esta organización, tiene como objetivo garantizar que las represas sean construidas de manera segura, eficiente, económica y sin efectos perjudiciales para el medio ambiente, concentrándose en los avances en la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de represas y las obras asociadas. Esto se realiza mediante la recopilación y difusión de información relevante, publicada en distintos boletines técnicos y guías de diseño. Por otro lado, existe la organización International Council on Mining & Metals, la cual, pretende fortalecer el desempeño ambiental y social de la industria minera y metalúrgica. En el año 2019, esta institución ha emitido un documento preliminar correspondiente a una *Normativa Global* de Depósitos de relaves, la cual tiene como objetivo lograr una gestión segura y confiable de las instalaciones de relaves mineros en todo el mundo, dando consideraciones a los operadores para que apliquen las mejores prácticas en planificación, diseño, construcción, operación, mantenimiento, monitoreo y cierre. A continuación se describen documentos relevantes emitidos por dichas instituciones.

Norma Global de Relaves - ICMM, 2019

Este documento presenta consideraciones en seis áreas temáticas dando énfasis en la gestión de riesgos y clasificación de consecuencias. Estas son:

- **Base de Conocimiento:** Se enfoca en que el Usuario elabore y mantenga actualizada las bases sobre las cuales se genera un proyecto, es decir, los estudios hidrológicos, geotécnicos, características físicas y químicas de los relaves y estudios de inundación para la instalación.
- **Comunidades Afectadas:** Pretende hacer participar a la comunidad de manera significativa en todas las etapas del ciclo de vida del depósito.

- **Diseño, Construcción, Operación y Supervisión:** Entrega las directrices generales para estas etapas considerando como guía la gestión de riesgos y la clasificación por consecuencias dada una posible falla.
- **Gestión y Gobernanza:** Considerando un análisis de riesgos, entrega puntos para definir el nivel de responsabilidades, establecer roles y funciones para respaldar la integridad de las instalaciones.
- **Respuesta ante emergencias y Recuperación a largo plazo:** Se enfoca en la elaboración de un plan de emergencia que permita responder de manera efectiva en caso de falla de la instalación.
- **Divulgación Pública y Acceso a la Información:** Promueve a mantener pública la información relacionada con decisiones, impactos y riesgos, planes de gestión y mitigación, y supervisión del desempeño del depósito.

Bulletin 157 - Small Dams: Design, Surveillance and Rehabilitation - ICOLD, 2016

Este boletín fue elaborado por ICOLD debido a la gran cantidad de depósitos de relaves pequeños en el mundo, que se estima alcanza un 90 % (ICOLD, 2016). Valor que es posible compararlo con lo expuesto en el inciso 4.1, donde según el catastro realizado por Sernagemin en Chile existe un 86 % de depósitos con menos de 1 millón de metros cúbicos de capacidad. Así, este documento corresponde a una guía para propietarios de pequeños depósitos, oficinas de ingeniería, agencias gubernamentales, desarrolladores y contratistas que están a cargo del diseño, construcción, operación, mantenimiento y seguridad de este tipo de depósitos. Cabe destacar, que este documento define como *Depósitos Pequeños* a las instalaciones que cumplen las siguientes

características:

$$2,5[m] < H < 15[m]$$

$$H^2 \sqrt{V} < 200$$

Donde H corresponde a la altura en metros sobre el nivel del lecho del río hasta el coronamiento, y V al Volumen de almacenamiento máximo de operación en millones de metros cúbicos.

**Bulletin 153 - Sustainable Design and Post-Closure Performance of Tailings Dams -
ICOLD, 2013**

Este documento contiene tres secciones principales con una discusión sobre los siguientes temas: Principios de cierre sostenible, cubriendo las prácticas internacionales actuales, regulaciones, objetivos, vida y fases de diseño, prácticas financieras y de gestión de riesgos en relación con el cierre. Consideraciones de diseño sostenible, cubriendo los principales aspectos de la estabilidad física, química, ecológica y social asociados con el cierre del depósito de relaves. Finalmente Monitoreo, cubriendo los requerimientos posteriores al cierre y monitoreo a largo plazo.

**Bulletin 139 - Improving Tailings Dam Safety: Critical Aspects of Management, Design,
Operation and Closure - ICOLD, 2011**

Este documento se preocupa de abordar aspectos críticos para mejorar la seguridad de los depósitos de relaves, así entrega directrices sobre el compromiso corporativo y de gestión con el proceso general de diseño, gestión y operación de las instalaciones de relaves. Considerando

aspectos de educación y capacitación del personal a cargo, incluyendo operadores, supervisores y alta gerencia. Además, se entregan aspectos de diseño de un depósito que garanticen la estabilidad y seguridad del mismo, siguiendo para esto prácticas de gestión de riesgos.

4.7. Comparación

Es posible notar, según lo expuesto en el Capítulo 4 sobre la legislación chilena y en el presente Capítulo sobre legislación internacional, que el encargado de aprobar los proyectos de depósitos de relaves corresponde al Ministerio relacionado con la minería del país o provincia local. Así, en Chile aprueba el Sernagemin (Ministerio de Minería), en Western Australia (Australia) aprueba el Department of Mines and Petroleum, en Victoria (Australia) aprueba el Economic Department, Jobs, Transport and Resource, en British Columbia (Canadá) aprueba el Ministry of Energy and Mines y en Brasil aprueba el Ministerio de Minas y Energía. Estados Unidos, es el único donde un proyecto debe ser aprobado finalmente por una institución medio ambiental como el United States Forest Service. Sin embargo, todos los países mencionados deben pasar por una aprobación medio ambiental durante el proceso.

Respecto a los puntos de interés del presente documento, es importante notar que según toda la bibliografía internacional se debe realizar una clasificación de los depósitos de relave para seleccionar niveles de exigencias para su diseño, construcción, operación, monitoreo y cierre. Esto responde a la tendencia actual de la aplicación de análisis de riesgos para evaluar los requisitos de estructuras especiales como los depósitos de relaves. Sin embargo, en la legislación chilena no existe un sistema de clasificación basado en el nivel de consecuencias que provocaría una posible falla de la instalación para ser aplicado tanto en el diseño como en las posteriores etapas

del ciclo de vida del proyecto. Esto da grandes indicios de una necesidad de actualización de algunos aspectos de la normativa vigente, para generar proyectos más eficientes y con un mayor nivel de confianza.

Por otro lado, la estabilidad física en la legislación chilena es abordada mediante una serie de requisitos de análisis y documentación. Sin embargo, estos requisitos resultan bastante generales y no dan cuenta de las características especiales de cada proyecto como lo abordan las guías y normativas internacionales, las cuales, incluyen parámetros de diseño, tipos de análisis y consideraciones especiales según sea la categoría de consecuencias del depósito a analizar.

De manera similar se aborda el manejo de aguas dentro de la normativa chilena vigente, aunque incluye, dentro del Decreto Supremo N°50, algunas consideraciones de diseño. Sin embargo, en el documento relativo especialmente a depósitos de relaves no existe gran desarrollo de este tema. Es por esto, que es importante incluir las recomendaciones internacionales del tema dentro del cuerpo normativo específico, y al igual que para la estabilidad física considerar un análisis de consecuencias.

Respecto a los aspectos constructivos, operativos y de control es posible mencionar que, si bien son tocados en el cuerpo normativo particular de depósitos de relaves (DS N°248), es superficial su contenido y no presenta la robustez necesaria para garantizar la seguridad de estas instalaciones, como si es abordado en las normativas y guías internacionales. Finalmente, se destaca que no existe ninguna mención de aspectos de Gobernanza en la normativa chilena.

5 Consideraciones para la modificación

Decreto Supremo n°248

5.1. Introducción

En este Capítulo se presenta lo expuesto en los documentos mencionados en el Capítulo 5. Los temas a desarrollar corresponden a los puntos principales de la actual normativa chilena, y que presentan las mayores diferencias con los alineamientos en las guías y normativas internacionales. Así, los temas principales a desarrollar corresponden a Gobernanza, Sistema de Clasificación, Análisis de estabilidad, Construcción, Operación, Monitoreo y Vigilancia. Debido a que muchas consideraciones se repiten en los distintos documentos, se mostrarán las más representativas generando una base robusta para el apoyo de una propuesta de modificación del actual DS N°248. Es importante destacar, que mucho del contenido presentado será proveniente de guías y no de normativas de carácter legal, sin embargo este contenido puede ser de gran utilidad para identificar las características claves en las exigencias requeridas en un documento legal que garantice un diseño eficiente y seguro con énfasis en las personas, infraestructura y medioambiente.

5.2. Gobernanza

La gobernanza según el ICMM, se refiere a las estructuras y procesos organizativos que una empresa establece para garantizar la gestión, supervisión y responsabilidad efectivas de los relaves. Donde el personal involucrado en la gestión de relaves necesita comprender sus roles, líneas de comunicación y relaciones con otros roles directos o indirectos relacionados con la gestión de relaves (MAC, 2016). Para una correcta gestión de un depósito de relaves se deben especificar:

- Tareas y funciones relacionadas con actividades de OMS.
- Roles, responsabilidades y nivel de autoridad del personal o grupos que asumen estas tareas y funciones, incluidas las personas responsables y el Ingeniero de Registro, y cualquier otro personal clave involucrado en la gestión de relaves.
- Relaciones funcionales y líneas de comunicación entre el personal y los grupos involucrados en las diferentes actividades, y por otro lado, con partes externas como entidades reguladoras.

En la Norma Global de Relaves (ICMM, 2019), se establecen requisitos administrativos relevantes para depósitos con clasificación de consecuencias “muy alta” o “extrema”, donde se especifica que el Directorio o la gerencia superior de la empresa que opera las instalaciones será responsable por la aprobación del proyecto, después de decidir cuáles son los pasos adicionales que deberán adoptarse para minimizar las consecuencias. A continuación, se definen los cargos principales en la estructura de Gobernanza y en la Figura 5.1 se muestra la relación entre ellos.



Figura 5.1: Esquema de relación entre personal responsable. Fuente: ICMM, 2019.

Ejecutivo Responsable: Miembro de la gerencia superior responsable de la seguridad del depósito, de minimizar las consecuencias relacionadas con este, de la capacitación del personal en gestión de relaves, de la preparación de respuesta ante emergencias y de la recuperación después de una falla.

Ingeniero Responsable de las Instalaciones de Relaves (IRIR): Ingeniero responsable de la integridad de las instalaciones de relaves que funciona de enlace con el Ingeniero de Registro y los equipos de Operaciones y Planeamiento, y que reporta, directamente o a través de una cadena jerárquica, ante el Ejecutivo Responsable. El IRIR tiene asimismo la obligación de reportarse indirectamente ante la gerencia de la minera para demostrar la prestación de sus servicios en el lugar.

Ingeniero de Registro: Ingeniero que proporcionar dirección técnica en nombre del propietario, y que verifica si el depósito de relaves o sus componente ha sido diseñada de acuerdo con los objetivos e indicadores de desempeño, pautas, estándares y requisitos reglamentarios aplicables; además de verificar que ha sido construido y está funcionando, a lo largo de su ciclo

de vida, de acuerdo con la intención de diseño. Es responsable de la inspección de seguridad, de los informes asociados y debe participar en las evaluaciones de riesgo del depósito.

5.3. Sistema de clasificación

En este inciso se presentan los distintos sistemas de clasificación de depósitos de relaves utilizados y presentados en los documentos de Australia y Canadá. Cabe destacar que estos sistemas, están basados en la clasificación o categorías de consecuencias, las cuales, reflejan el posible daño generado por una falla en el sistema de retención del depósito. En general se utilizan matrices de riesgo como la matriz tipo mostrada en la Figura 2.7 y el objetivo de esta es categorizar el riesgo del depósito, con el cual se determine el nivel de exigencia en los parámetros de diseño sísmicos, hidráulicos o aspectos operacionales como mantenimiento y vigilancia, entre otros.

Clasificación ANCOLD

La clasificación de los relaves según ANCOLD se encuentra detallada en el documento *Consequence Categories for Dams* (2010). En este se especifican los niveles de riesgo para distintos tipos de daños (Infraestructura, salud pública, área de impacto, etc.) y se relacionan con la población en peligro debido a una falla en el depósito. Esta relación genera 7 categorías de clasificación, las cuales van desde Muy bajo a Extremo. A continuación se presentan las Tablas 5.1 y 5.2 con las descripciones necesarias para la clasificación.

Tabla 5.1: Categorías ANCOLD. Fuente: ANCOLD, 2012

Población en Riesgo	Gravedad del Daño y la Perdida			
	Menor	Medio	Mayor	Catastrófico
<1	Muy Bajo	Bajo	Significante	Alto C
>1 hasta 10	Significante ⁴	Significante ⁴	Alto C	Alto B
>10 hasta 100	Alto C	Alto C	Alto B	Alto A
>100 hasta 1000		Alto B	Alto A	Extremo
>1000	Nota ⁵	Nota ⁵	Extremo	Extremo

Las categorías se utilizan para determinar el nivel de los parámetros de diseño y control de:

- Frecuencia de monitoreo.
- Estándares de diseño sísmico.
- Volúmenes de inundación.
- Volumen de evacuación de vertederos.
- Valores mínimos de revancha.

Esto se realiza mediante la selección de periodos de retorno para eventos extremos anuales para los distintos parámetros, ya sea, escorrentía, precipitación, viento. Cabe destacar, que el nivel de consecuencias característico de un depósito será el peor nivel obtenido en las secciones de la Tabla 5.2. Además, para la evaluación de la consecuencia se debe realizar un análisis de falla de rotura de presa y de rebose de muro, propagando el contenido del depósito y determinando una zona afectada por la inundación, con la cual evaluar las pérdidas económicas, medioambientales e infraestructurales.

⁴Cambie a “Alto C” donde existe el potencial de que se pierdan una o más vidas. El potencial de pérdida de vidas está determinado por las características del área de inundación, particularmente la profundidad y la velocidad del flujo.

⁵Con un PAR superior a 100, es poco probable que el daño sea menor. Del mismo modo, con un PAR superior a 1,000, es poco probable que el daño se clasifique como medio.

Tabla 5.2: Consecuencia de eventos ANCOLD. Fuente: ANCOLD,2012

Tipo de Daño	Menor	Medio	Mayor	Catastrófico
Infraestructura	<\$10M	\$10M-\$100M	\$100M-1\$B	>\$1B
Importancia comercial	Algunas restricciones	Impactos significativos	Impactos severos	Disolución comercial
Salud Pública	<100 personas afectadas	100-1000 personas afectadas	<1000 personas afectadas por más de un mes	bancarrota > 10,000 personas afectadas por más de un año
Área de Impacto	< 1km ²	< 5km ²	< 20km ²	> 20km ²
Duración del Impacto	<1 año	<5 años	<20 años	>20 años
Impacto en el medioambiente	Daño limitado a elementos de bajo valor de conservación (por ejemplo, degradado o tierra despejada, corrientes efímeras, flora y fauna no en peligro de extinción). Remediación posible.	Efectos significativos sobre las tierras rurales y la flora y fauna local. Efectos limitados sobre: A. Artículo (s) del patrimonio natural local y estatal. B. Flora y fauna nativa dentro de reservas forestales, acuáticas y de conservación, o corredores de hábitat reconocidos, humedales o áreas de reproducción de peces.	Amplios efectos rurales. Efectos significativos sobre el sistema fluvial y las áreas A y B. Efectos limitados sobre: C. Artículo (s) del patrimonio natural nacional o mundial. D. Flora y fauna nativa dentro de parques nacionales, áreas silvestres reconocidas, humedales RAMSAR y reservas acuáticas protegidas a nivel nacional. Remediación difícil	Afecta ampliamente las áreas A y B. Afecta significativamente las áreas C y D. La remediación involucra ecosistemas significativamente alterados.

Clasificación Western Australia

Para la clasificación de los depósitos de relave se especifica que el enfoque de diseño, el método de construcción y el proceso de desmantelamiento deben seleccionarse para adaptarse a las condiciones locales y las posibles consecuencias si el depósito pierde integridad o falle. Es por esto, que se debe categorizar los tranques de relave según sus potenciales riesgos dependiendo de las consecuencias. Para esto se debe realizar un estudio cuyo alcance debe determinar la

extensión, los tiempos de viaje y las velocidades de las posibles inundaciones o deslizamientos de flujo de relaves, y cualquier efecto sobre la seguridad, la salud y el medio ambiente en el área aguas abajo.

Dado que la clasificación de riesgo es una función del impacto potencial de pérdida de integridad o falla, una estructura bien diseñada y construida o un depósito bien operado aún puede tener una clasificación de riesgo alta o media. La calificación de riesgo se deriva para toda la vida de la instalación (incluidas las futuras expansiones) al considerar las posibles consecuencias de los escenarios sobre la seguridad y salud de las personas, el medioambiente, la propiedad, infraestructura, y desarrollos mineros.

En la Tabla 5.4, se presenta la clasificación según los niveles de consecuencias de un evento. Luego, teniendo en cuenta estos niveles se categorizan según la altura máxima de la estructura, y en algunas circunstancias, ubicación y método de depósito. En la Tabla 5.3 se muestran dichas categorías.

Tabla 5.3: Categorías Western Australia. Fuente: DMP, 2013

Altura máxima de la estructura	Clasificación de consecuencia		
	Alto	Medio	Bajo
$H > 15 \text{ m}$	Categoría 1	Categoría 1	Categoría 1
$5 \text{ m} < H < 15 \text{ m}$	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 2
$H < 5 \text{ m}$	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3

La calificación de consecuencia se deriva al considerar los posibles impactos adversos o daños causados por:

- Falla estructural del muro de contención; y
- Liberación controlada o incontrolada de relaves/agua, o filtración.

Tabla 5.4: Clasificación de consecuencias Western Australia Fuente: DMP, 2013.

Tipo de impacto o daño	Clasificación de consecuencia		
	Alto	Medio	Bajo
	Extensión o gravedad del impacto o daño		
Pérdida de la vida humana o lesiones personales	Es posible la pérdida de vidas o lesiones.	La pérdida de vidas o lesiones es posible aunque no se espera	No hay posibilidad de pérdida de vidas o lesiones
Salud humana adversa debido al impacto físico directo o la contaminación del medio ambiente (por ejemplo, denigración química o por radiación del agua, el suelo, el aire)	La exposición humana a largo plazo es posible y se esperan efectos adversos permanentes o prolongados para la salud	El potencial de exposición humana es limitado y son posibles efectos adversos temporales para la salud.	Sin potencial de exposición humana.
Pérdida de activos debido al impacto físico directo o la contaminación del medio ambiente (por ejemplo, contaminación química o radiactiva del agua, el suelo o el aire)	Es posible la pérdida de numerosos animales. La pérdida permanente de activos (por ejemplo, activos comerciales, industriales, agrícolas y pastorales, servicios públicos e infraestructura, infraestructura minera) es posible y no se pueden realizar reparaciones económicas	La pérdida de algo de ganado es posible. La pérdida temporal de activos es posible y se pueden hacer reparaciones económicas.	Posibilidad limitada o nula de pérdida de ganado. Posibilidad limitada o nula de destrucción o pérdida de activos
	La pérdida de capacidad de almacenamiento de TSF es posible y la reparación no es practicable	La pérdida de la capacidad de almacenamiento de TSF es posible y la reparación es practicable	Es posible una pérdida insignificante de la capacidad de almacenamiento de TSF
Daño a elementos de valor ambiental, patrimonial o histórico debido al impacto físico directo o la contaminación del medio ambiente (por ejemplo, contaminación química o radiactiva del agua, el suelo o el aire)	Es posible un daño permanente o prolongado al medio ambiente natural (incluidos el suelo y los recursos hídricos superficiales y subterráneos)	Daño temporal al medio natural es posible	Limitado o sin potencial de daño al medio ambiente natural
	Son posibles efectos adversos permanentes o prolongados sobre la flora y la fauna	Posibles efectos adversos temporales sobre la flora y la fauna.	Posibilidad limitada o nula de efectos adversos sobre la flora y la fauna
	Daño permanente o pérdida de elementos de patrimonio o valor histórico es posible	Es posible el daño temporal de elementos de patrimonio o valor histórico.	Posibilidad limitada o nula de daños a los elementos del patrimonio o valor histórico.

Estas categorías son utilizadas para determinar los requisitos del depósito respecto al nivel de detalle en la investigación y la calificación del personal en todas las etapas del ciclo de vida del proyecto. Es importante destacar que el sistema de categorías presentado en Western Australia, no influye en la evaluación de los parámetros de diseño de capacidad o estabilidad física de los depósitos. En la Tabla 5.5, se muestra los requisitos de las categorías en sus diferentes etapas.

Tabla 5.5: Requisitos de categorías Western Australia. Fuente: DMP, 2015.

Etapa	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3
Diseño (incluida la investigación del sitio)	Informe preparado en detalle por una persona geotécnicamente competente.	Informe preparado en detalle por una persona geotécnicamente competente.	Informe preparado en detalle por una persona competente.
Construcción	supervisada por una persona geotécnicamente competente. Informe detallado de construcción con planos de construcción.	supervisada por una persona geotécnicamente competente. Informe detallado de construcción con planos de construcción.	Construido por una persona competente. Planos de construcción según lo previsto.
Operación	Inspección anual y auditoría por persona competente.	Inspección y auditoría cada 2 años por persona competente.	Inspección y auditoría cada 3 años por persona competente.
Previo al Cierre	Informe de inspección por parte de una persona competente que confirme el estado actual y las estrategias de desmantelamiento, rehabilitación y monitoreo previstas con planos construidos.	Informe de inspección por parte de una persona competente que confirme el estado actual y las estrategias de desmantelamiento, rehabilitación y monitoreo previstas con planos construidos.	Informe de inspección por parte de una persona competente que confirme el estado actual y las estrategias de desmantelamiento, rehabilitación y monitoreo previstas con planos construidos.
Abandono	Informe final de una persona competente confirmando que se han alcanzado los objetivos de cierre.	Informe final de una persona competente confirmando que se han alcanzado los objetivos de cierre.	Informe final de una persona competente confirmando que se han alcanzado los objetivos de cierre.

Clasificación Victoria y Department of Industry Australian Government

Para el Estado de Victoria y para el del Departamento de industrias del Gobierno de Australia, no existe un sistema de clasificación propio. En los documentos emitidos por estas instituciones se recomienda la utilización del sistema de clasificación propuesto por ANCOLD descrito anteriormente.

Clasificación Canadian Dam Association

La clasificación se presenta con una medida cualitativa/cuantitativa según la condición del riesgo de la población, pérdida de vida, efectos en el medioambiente y pérdidas en la infraestructura. Todas deben ser clasificadas independientemente y la clase final del depósito será la que presente las consecuencias potenciales más altas. En la Tabla 5.6 se presentan las clases mencionadas y sus respectivas características.

Tabla 5.6: Clasificación de consecuencias CDA. Fuente: CDA, 2013.

Categoría	Población en riesgo	Pérdida de vida	Pérdidas Incrementales	
			Valores medio ambientales y culturales	Infraestructura y Economía
Bajo	No hay	0	Pérdida mínima a corto plazo Sin pérdida a largo plazo	Bajas pérdidas económicas; El área contiene infraestructura o servicios limitados
Significante	Solo temporalmente	No especificado	Sin pérdida o deterioro significativo del hábitat de peces o vida silvestre. Pérdida de hábitat marginal solamente. Restauración o compensación en especie altamente posible	Pérdidas en instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte poco utilizadas.
Alto	Permanente	10 o menos	Pérdida o deterioro significativo de hábitats importantes de peces o vida silvestre. Restauración o compensación en especie altamente posible.	Altas pérdidas económicas que afectan la infraestructura, el transporte público y las instalaciones comerciales.
Muy Alto	Permanente	100 o menos	Pérdida o deterioro significativo de hábitats críticas de peces o vida silvestre. Restauración o compensación es posible pero poco práctica.	Pérdidas económicas muy altas que afectan a infraestructuras o servicios importantes (por ejemplo, carreteras, instalaciones industriales, instalaciones de almacenamiento de sustancias peligrosas)
Extremo	Permanente	más de 100	Pérdida importante de peces críticos o hábitat de vida silvestre Restauración o compensación imposible.	Pérdidas extremas que afectan la infraestructura o los servicios críticos (por ejemplo, hospital, complejo industrial principal, instalaciones de almacenamiento importantes para sustancias peligrosas)

Estas son utilizadas para determinar el nivel de los parámetros de diseño y control de

respecto a frecuencias de monitoreo, estándares de diseño sísmico, volúmenes de inundación y valores mínimos de revancha.

Clasificación Québec

En el documento Dam Safety Act (2019) se especifica que los depósitos deben clasificarse según el grado de riesgo que representa para las personas y la propiedad, medido multiplicando el valor numérico de su vulnerabilidad (V) por el valor numérico de las posibles consecuencias de una falla de la presa (C). La variable P es el valor asignado en la fórmula " $P = V \cdot C$ ". Así, se generan 4 categorías como se muestra en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Categorías Québec. Fuente: Québec Government, 2019

Valor de "P"	Categoría
$P > 120$	A
$70 < P < 120$	B
$25 < P < 70$	C
$P < 25$	D

La vulnerabilidad (V) de una presa se mide multiplicando el valor medio aritmético de los parámetros físicos constantes por el valor medio aritmético de los parámetros variables. Los parámetros físicos constantes a considerar son la altura de la presa, el tipo de presa, la capacidad de confinamiento y el tipo de cimiento de la presa. Los parámetros variables a considerar son:

- La antigüedad de la presa, que es el número de años desde su construcción o, según sea el caso, según lo determine el ingeniero a cargo de la revisión de seguridad sobre la base de la vida útil de la presa.
- La zona sísmica en la que se encuentra la presa de acuerdo con el mapa de la zona sísmica.

- La condición de la presa, que se evalúa considerando el estado físico y la condición estructural de la presa, la calidad y efectividad del mantenimiento, el envejecimiento, los posibles efectos de factores externos como heladas o terremotos y cualquier diseño de la presa o defectos estructurales. Al finalizar la evaluación, la condición de la presa se califica como muy buena, buena, aceptable, pobre o indeterminada.
- La confiabilidad de las instalaciones de descarga de la presa, que deben ser capaces de pasar la inundación de diseño de entrada. La confiabilidad se evalúa sobre la base del diseño de las instalaciones de descarga y los procedimientos establecidos por el propietario para garantizar que operen de manera efectiva durante las inundaciones. Al finalizar la evaluación, la confiabilidad de las instalaciones de descarga se califica como satisfactoria, aceptable, insatisfactoria o indeterminada.

Las tablas con los valores se pueden observar en los Anexos del Dam Safety Regulation (2019).

Por otro lado, el valor numérico de las consecuencias de una falla (C) se basa en su categoría. La categoría de consecuencia se determina sobre la base de las características del área aguas abajo que se verían afectadas por la falla. Estas características se evalúan en términos de densidad de población, el alcance de la infraestructura y los servicios que serían destruidos o severamente dañados. En las Tablas 5.8 y 5.9 se muestran las clasificaciones.

Tabla 5.8: Clasificación de consecuencias Québec. Fuente: Quebec Government, 2019.

Características del área afectada (densidad de población y extensión de las infraestructuras y servicios destruidos o gravemente dañados)	Categoría de Consecuencia
Área deshabitada	
Área que contiene infraestructuras o servicios mínimos como: Una segunda presa en la categoría de muy baja consecuencia Un camino de acceso a los recursos - tierras de cultivo Una instalación comercial sin alojamiento Área habitada ocasionalmente que contiene menos de 10 cabañas o residencias estacionales.	Muy Baja
Área que contiene una instalación comercial que proporciona alojamiento para menos de 25 personas o que tiene menos de 10 unidades de alojamiento (es decir, 10 cabañas, 10 campings, 10 habitaciones de motel) Área que contiene infraestructuras o servicios limitados tales como - una segunda presa en la categoría de Baja Consecuencia una carretera local Área habitada permanentemente que contiene menos de 10 residencias u ocasionalmente habitada y que contiene 10 o más cabañas o residencias estacionales.	Baja
Área que contiene una instalación comercial estacional que proporciona alojamiento para 25 o más personas o que contiene 10 o más unidades de alojamiento o que opera durante todo el año y proporciona alojamiento para menos de 25 personas o tiene menos de 10 unidades de alojamiento. Área que contiene infraestructuras o servicios moderados como - una segunda presa en la categoría de Consecuencia Moderada - una carretera de acceso - una línea de ferrocarril (local o regional) - una empresa con menos de 50 empleados - una toma de agua principal aguas arriba o aguas abajo de la presa que abastece a un municipio Área habitada permanentemente que contiene 10 o más residencias y menos de 1,000 residentes	Moderada

Tabla 5.9: Clasificación de consecuencias Québec (Continuación). Fuente: Quebec Government, 2019.

Características del área afectada (densidad de población y extensión de las infraestructuras y servicios destruidos o gravemente dañados)	Categoría de Consecuencia
Área que contiene una instalación comercial que funciona durante todo el año y ofrece alojamiento para 25 o más personas o tiene 10 o más unidades de alojamiento	Alta
Área que contiene infraestructuras o servicios importantes, como - una segunda presa en la categoría de Alta Consecuencia - una carretera regional - una línea ferroviaria (transcontinental o transfronteriza) - una escuela - una empresa que tiene de 50 a 499 empleados	
Área habitada permanentemente con una población de más de 1,000 y menos de 10,000	Muy Alta
Área que contiene infraestructuras o servicios importantes, como - una segunda presa en la categoría de muy alta consecuencia - una autopista o carretera nacional - una empresa que tiene 500 o más empleados - un parque industrial - un sitio de almacenamiento de sustancias peligrosas	
Área habitada permanentemente con una población de 10,000 o más	Severa
Área que contiene infraestructuras o servicios sustanciales como - una segunda presa en la categoría de Consecuencias severas - un hospital - un complejo industrial importante - un gran sitio de almacenamiento	

Los requisitos de estas categorías apuntan tanto a la etapa de diseño y operación. Estos pueden estar referidos tanto a su clasificación de clase P o a su categoría de consecuencia, así los periodos de retorno para diseño de capacidad de almacenamiento y dimensionamiento de obras son función de la categoría de consecuencias, y las frecuencias de monitoreo y tipo de inspección son función de su clase P.

Clasificación British Columbia y Ontario

Para los Estados de British Columbia y Ontario, no existe un sistema de clasificación propio publicado en sus documentos. En los documentos emitidos por las instituciones pertinentes se recomienda la utilización del sistema de clasificación propuesto por CDA descrito anteriormente.

5.3.1. Zona de Inundación

Es posible notar que para utilizar las clasificaciones basadas en nivel de consecuencias, es importante contar con una metodología que permita estimar el área aguas abajo del depósito que será afectada por una posible falla. En general, en el mundo no existe una metodología única estandarizada para determinar esta área, esto debido a que el problema resulta complejo desde el punto de vista de su evaluación. Así, en Chile se recomienda en la Guía para el cumplimiento de DS N°248 (2016), utilizar y contrastar resultados de métodos empíricos de Lucia (1981) o Rico, et al (2007), y por otro lado usar métodos numéricos como el de Jeyapalan (1982). Sin embargo, estos métodos no son lo suficientemente sofisticado y no se encuentran actualizados con las últimas prácticas internacionales, por lo que sus resultados son variados y poco confiables. A continuación se describe una metodología utilizada actualmente que genera resultados más precisos.

Metodología recomendada en la práctica

La metodología consiste principalmente en los siguientes pasos: (i) Definición del hidrógrama de ruptura; (ii) Propagación de ondas de inundación, y (iii) Mapeo de inundaciones. En la siguiente figura se muestra el detalle de cada paso.

1. Definición del hidrógrama de rotura

En primer lugar, se identifica el mecanismo de falla más probable para el depósito. Según estudios realizados por Taguchi (2014) los mecanismos más probables para depósitos de relave corresponden a erosión interna, desborde y licuefacción, lo cual, es validado por

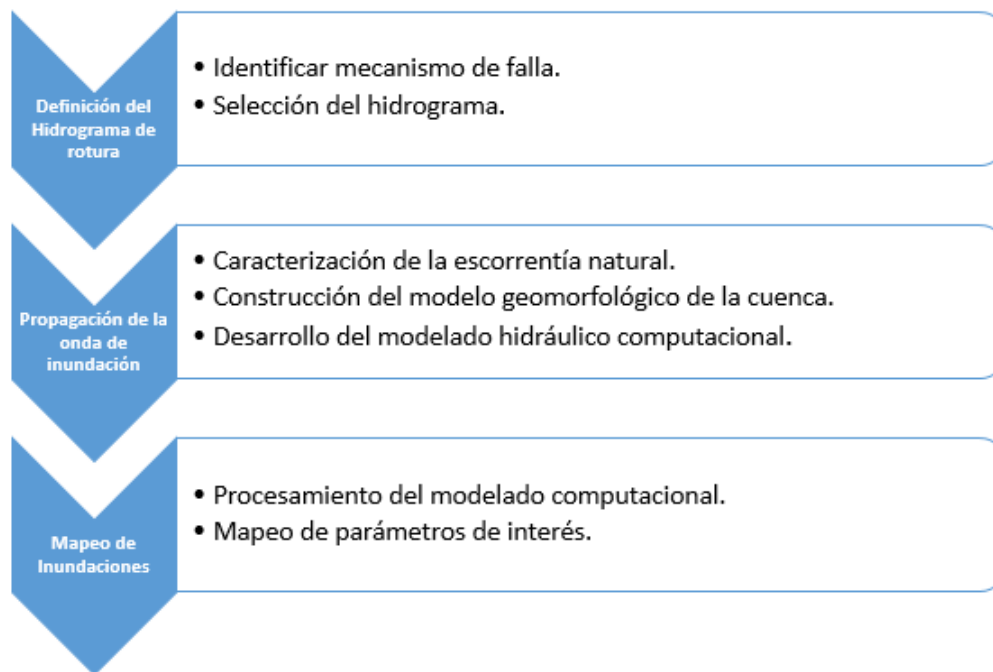


Figura 5.2: Metodología recomendada en la práctica. Fuente: VALE, 2018.

la estadística de fallas publicadas por ICOLD. Así, se obtiene la probabilidad de cada uno de estos según métodos estadísticos deterministas, métodos de Monte Carlo o árboles y se selecciona el más desfavorable. Luego, es necesario definir los escenarios en los cuales se provocara la falla. Entre estos se destaca el escenario de Día Seco (o condiciones operacionales normales) y el escenario de Inundación.(ANCOLD, 2012)

- **Día Seco:** Se considera el nivel del agua del depósito en su condición máxima normal y, la cuenca donde se propagara con una escorrentía dada por un periodo de retorno de 2 años.
- **Escenario de Inundación:** Se considera el nivel de agua del depósito absolutamente lleno (incluyendo revancha), y la cuenca donde se propagara con una escorrentía dada por un periodo de retorno de 100 años.

Finalmente, basta definir el volumen que será movilizado por la rotura del muro del depósito. Para esto se considera el modelo basado en regresión lineal media de Rico et al. (2007), que considera aproximadamente un volumen derramado del 35 %. Además, se considera que el volumen del muro es completamente derramado y la totalidad del volumen de agua. Cabe destacar que para esto se debe determinar mediante un estudio hidrológico el caudal aportante de la cuenca.

2. Propagación de la onda de inundación

Para determinar la escorrentía natural y caracterizar el modelo hidráulico de propagación es necesario determinar la base topográfica de la cuenca, las características de resistencia de esta, y las características de resistencia del fluido. Respecto a las características de resistencia del fluido, dado a que este corresponde a una mezcla con alto contenido de sólidos, se debe considerar como un fluido no newtoniano. Esto, en general, provoca que no sea sencillo de evaluar sus propiedades debido a que al momento de la falla este puede estar en distintos estados y ser alterado rápidamente. Así, una alternativa conservadora sería considerarlo como agua. En este contexto, es posible destacar los análisis posteriores de ruptura de depósitos de relaves (ROCHA, 2015) realizados con la aplicación de modelos matemáticos para fluidos newtonianos cuyos resultados se han adherido satisfactoriamente a las características de inundación observadas. Finalmente, para evaluar la resistencia de la base topográfica y debido a la aproximación de que el flujo se comporta como agua, basta con utilizar los coeficientes de manning. Para la propagación del Hidrograma, es posible utilizar Softwares comerciales.

3. Mapeo de Inundaciones

El mapeo de inundación se realiza a partir de la información y los resultados generados para la malla de simulación. Sin embargo, para mejorar la interpretación y la lectura de los resultados, es posible seleccionar secciones transversales de los cursos de agua ubicados en regiones de interés, para las cuales se pueden asignar los parámetros de inundación relevantes.

- Elevación absoluta de la superficie de inundación.
- Profundidad máxima de la inundación registrada en el paso del hidrograma de ruptura.
- Flujo máximo e hidrografías a lo largo de todo el tramo.
- Velocidad máxima de inundación registrada en el paso de hidrografía de avance.
- Tiempo para la inundación de 60 cm por encima de la profundidad ya registrada por la inundación natural precedente.
- Tiempo hasta el pico del hidrograma;

Con esto es posible mapear los siguientes parámetros que ayudan a definir los riesgos hidrodinámicos que produciría una inundación: máxima envolvente de inundación, hora de llegada de la ola refiriéndose al tiempo para la inundación de 60 cm por encima de la profundidad ya registrada por la inundación natural precedente, y máxima calificación de riesgo de inundación hidrodinámica. Se refiere al producto máximo entre velocidades y profundidades de onda.

Entre los estudios consultados, se destaca el estudio de Smith, et al. (2014), que es adoptado por la guía "Australia Rainfall and Runoff, una guía para la estimación de inundaciones". En resumen, este estudio presenta una compilación de una serie de investigaciones sobre

el tema y límites definidos para la clasificación espacial del riesgo hidrodinámico. En la Tabla 5.10 se presentan los criterios sugeridos por el estudio anterior, lo cual, es útil para realizar la evaluación de las consecuencias.

Tabla 5.10: Riesgo Hidrodinámico. Fuente: Smith, et al. 2014

Clasificación	Daños	Criterio de clasificación	Representación
H1	Por lo general (sin excepciones) área segura para vehículos, personas e instalaciones.	$V < 2,0 \text{ m/s}$; $H < 0,3 \text{ m}$; $(H \times V) \leq 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$	Azul
H2	Vehículos pequeños (excepto SUV y relacionados) sujetos a daños	$V < 2,0 \text{ m/s}$; $H < 0,5 \text{ m}$; $(H \times V) \leq 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$	Azul Claro
H3	Todos los tipos de vehículos están sujetos a daños y son peligrosos para niños y ancianos.	$V < 2,0 \text{ m/s}$; $H < 1,2 \text{ m}$; $(H \times V) \leq 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$	Verde
H4	Todos los tipos de vehículos están sujetos a daños y son peligrosos para todas las personas.	$V < 2,0 \text{ m/s}$; $H < 2,0 \text{ m}$; $(H \times V) \leq 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Verde Claro
H5	Todos los tipos de vehículos están sujetos a daños y son peligrosos para todas las personas. Todas las propiedades están sujetas a daños estructurales y las propiedades con estructuras menos reforzadas están sujetas a daños totales.	$V < 4,0 \text{ m/s}$; $H < 4,0 \text{ m}$; $(H \times V) \leq 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Amarillo
H6	Todos los tipos de vehículos están sujetos a daños y son peligrosos para todas las personas. Todas las propiedades están sujetas a daños completos.	$(H \times V) > 4,0 \text{ m}^2/\text{s}$	Rojo

Requisitos de Mapeo de Inundaciones

En el presente DS N°248 no se presentan mayores detalles para la determinación de la Zona de Inundación, y solo se pide explícitamente determinar la *distancia peligrosa* sin mayores detalles. En la normativa Brasileira Portaria N° 70.389 (2017), se solicita lo siguiente relativo al mapa de inundación:

- El propietario está obligado a preparar un mapa de inundaciones para ayudar en la clasificación del Daño Potencial Asociado de todos sus depósitos mineros.
- El mapa de inundación debe ser preparado respetando las buenas prácticas de ingeniería y explicando el método adoptado para su elaboración.
- En situaciones donde hay represas ubicadas aguas abajo de la estructura bajo evaluación y dentro del área de influencia de la inundación, el estudio y el mapa de inundación también considerarán un análisis conjunto de las estructuras.
- Los modos de ruptura contenidos en el estudio y el mapa de inundación considerarán el escenario de mayor daño.
- Los mapas de inundación se ejecutarán con una base topográfica actualizada a una escala apropiada.
- El mapa de inundaciones reflejará el escenario actual de la presa minera y estará de acuerdo con su volumen autorizado.
- El estudio debe ser detallado y el mapa de inundación debe mostrar en gráficos georreferenciados y mapas de las áreas a ser inundadas, explicando la Zona de Auto Rescate y la Zona de seguridad secundaria, los tiempos de viaje para los picos e inundaciones de frente de onda en lugares críticos. Incluyendo cuerpos de agua y posibles impactos ambientales.

5.4. Estabilidad Física

Garantizar la estabilidad estructural de un depósito de relaves es el objetivo principal de todo proyecto. En términos generales, la capacidad de la estructura de contención para retener los relaves se verá afectada por distintos factores como la incertidumbre y variación en los parámetros que caracterizan a los materiales, ya sea de construcción o depositados, las cargas estáticas y dinámicas, los efectos del agua y la presión de poros, el potencial de licuefacción, y cualquier variación durante la construcción y operación. Así, en las guías y normativas internacionales se encuentran distintas recomendaciones para asegurar el buen comportamiento de la estructura. A continuación se presentan los alineamientos principales.

Métodos de análisis y condiciones de carga

Para determinar el comportamiento de una estructura de depósito de relaves, se solicita actualmente realizar los estudios de estabilidad de taludes y estabilidad sísmica mediante modelos empíricos, deterministas y numéricos. Además, es importante identificar claramente las condiciones en las que será cargado el depósito, ya sea en condiciones secas o de saturación, esto debido a que dicha condición afectará directamente a la resistencia de corte disponible de la estructura. Así, ANCOLD (2012) se recomienda utilizar:

- **Condición drenada:** Para estabilidad estática a largo plazo del talud en condiciones estables, y para estabilidad a largo plazo después del cierre.
- **Condición no drenada:** Para estabilidad durante la construcción, estabilidad de construcción sobre pendientes existentes, estabilidad dinámica, estabilidad post sísmica, licuefacción

ción, y licuefacción estática.

Por otro lado, FEMA (2005) sugiere que se puede evaluar la estabilidad de desplazamientos sísmicos mediante los métodos de análisis con enfoques tradicionales pseudoestáticos y con métodos de desplazamiento permanente. En el enfoque tradicional, la estabilidad de deslizamiento se expresa en términos de un factor de seguridad prescrito contra el deslizamiento, mientras que en el enfoque de desplazamiento permanente, la estructura puede deslizarse a lo largo de su base, pero el desplazamiento acumulado durante el sismo del suelo se limita a un determinado valor máximo permitido. Además, actualmente se ha alentado a realizar análisis de estabilidad post sismo con el objetivo de demostrar que la estructura queda en condiciones operativas. Bajo este tipo de análisis, se utilizan supuestos conservadores para reducir la cantidad de información necesaria de los movimientos del terreno, y la exploración y pruebas requeridas de las propiedades del material del depósito o fundación. Por ejemplo, un análisis típico supondría que el evento sísmico ha creado una grieta que se extiende por completo a través de la base del depósito. Luego se realiza un análisis, suponiendo que no hay cohesión y con un ángulo de fricción reducido, para determinar si el depósito tiene un factor de seguridad adecuado después del terremoto o si se justifica la remediación o análisis adicional.

Consideraciones sísmicas

Para diseñar los depósitos de relaves frente a solicitaciones sísmicas, o por vibraciones inducidas por otros agentes como actividad minera o explosiones se debe tener en cuenta:

- Nivel de actividad sísmica que puede ocurrir en el sitio apropiado para el diseño durante las operaciones.

- Nivel de actividad sísmica que debe considerarse para el diseño del cierre.
- Potencial de amplificación o amortiguación de la aceleración del terreno firme por cimientos y / o materiales de terraplén.
- Capacidad del depósito propuesta para sobrevivir a las cargas de terremoto previstas.
- Potencial de licuefacción de los relaves saturados en una playa elevada o en el almacenamiento.
- Potencial de licuefacción de las capas base.

Es importante considerar la clasificación de consecuencias para evaluar el riesgo posible debido a falla por un evento sísmico. Así, el nivel de las solicitaciones sísmicas debe ser coherentes con la categoría de los depósitos. Además, los depósitos deben permanecer en servicio bajo el Terremoto Base Operativo (TBO). Se espera que TBO cause daños o deformaciones limitadas que podrían repararse sin interrumpir significativamente las operaciones. Para el Terremoto máximo de Diseño (TMD), el daño puede ser más extenso y puede interrumpir las operaciones, pero la integridad estructural del depósito debe mantenerse y no debe producirse la liberación incontrolada de relaves o agua. Para el post cierre se debe considerar el Terremoto máximo creíble (TMC), el cual, se debe calcular de manera determinista y se toma como el terremoto teórico máximo asociado con fallas conocidas o inferidas en la proximidad del sitio. Por lo tanto, el TMC técnicamente no tiene un período de retorno asociado, y es el terremoto máximo que podría ocurrir en el sitio. Los eventos sísmicos de 10.000 años de periodo de retorno o más generalmente comienzan a acercarse al evento MCE. En la Tabla 5.11 se muestra el nivel mínimo de estas solicitaciones recomendados por ANCOLD (2012).

Tabla 5.11: Cargas sísmicas mínimas. Fuente: ANCOLD, 2012.

Categoría de Consecuencia	Fase Operativa		Pos cierre
	TBO	TMD	
Bajo	1:50	100	TMC
Significativo	100	1000	TMC
Alto/Extremo	1000	10000	TMC

Coronamiento

El ancho de coronamiento influye en gran medida a la estabilidad estructural del depósito, y en general depende de distintas consideraciones como la naturaleza de los materiales utilizados, la infiltración permitida a nivel operacional, la altura del muro y la categoría de consecuencias de la estructura. Debido a las dificultades prácticas para determinar estos factores, el ancho del coronamiento está, por regla general, determinado empíricamente y en gran medida por la experiencia previa. De acuerdo al US Bureau of Reclamation (1987) para depósitos de altura menor a 15 metros se recomienda un ancho según la Tabla 5.12.

Tabla 5.12: Coronamiento recomendado [m]. Fuente: US Bureau of Reclamations, 1987

Altura de Muro	Ancho de Coronamiento
5	4
10	5
15	6

Por otro lado, Lewis (2002) observó que el ancho del coronamiento aumenta a medida que aumenta la altura del depósito, y presenta la siguiente fórmula empírica para el ancho de la cresta:

$$\text{Ancho de coronamiento [m]} = H^{0.5} + 1$$

H: Altura máxima de muro.

Factores de Seguridad

ANCOLD (2012), recomienda considerar factores de seguridad mínimos según sea la categoría de clasificación para las condiciones de carga a largo plazo drenado, corto plazo no drenado y post sísmico. En la Tabla 5.13 se muestran los factores recomendados.

Tabla 5.13: Factores de seguridad mínimos recomendados. Fuente: ANCOLD, 2012.

Condición de Carga	Factor de Seguridad mínimo	Esfuerzo de Corte
Largo plazo drenado	1.5	Esfuerzo efectivo
Corto Plazo no drenado (con potencial de pérdida de contenido)	1.5	Esfuerzo no drenado consolidado
Corto Plazo no drenado (sin potencial de pérdida de contenido)	1.3	Esfuerzo no drenado consolidado
Post Sísmico	1.2	Esfuerzo post sísmico

Asentamientos

El asentamiento en depósitos de relaves se debe a la consolidación. El asentamiento de consolidación puede ser aporte del muro o la fundación, y necesita cuidados especiales cuando hay suelos colapsables. En general, la mayoría de los asentamientos de consolidación tienen lugar durante la construcción, particularmente con materiales de grano grueso (limoso y arenoso). La consolidación continuará durante un tiempo apreciable después de la construcción cuando se utilicen materiales, como arcillas altamente plásticas. Esto es particularmente evidente cuando los materiales están húmedos durante la construcción. En estas condiciones, se puede esperar una consolidación de hasta el 5 %. Los suelos mal compactados pueden exhibir un asentamiento repentino cuando ocurre la saturación en respuesta al flujo de infiltración. Esto puede conducir al asentamiento del suelo debajo de la línea de infiltración. La consolidación depende de las propiedades de los materiales en el muro y las fundaciones y del método y la velocidad de

construcción. La altura de diseño de los depósitos de tierra debe aumentarse en una cantidad igual a la consolidación estimada.

5.5. Manejo de Aguas

El manejo de las aguas que ingresan a un depósito de relave tiene un alto impacto en los aspectos de estabilidad física, estabilidad química y conservación medioambiental. Es por esto, que contar con condiciones de diseño que consideren una clasificación de consecuencias para el manejo de las condiciones hídricas es importante y ha sido implementado en todas las normativas y guías mencionadas en secciones anteriores. Se destacan como aspectos principales en esta materia, la correcta selección de la capacidad de almacenamiento del depósito, el balance de aguas y las posibles infiltraciones al medio receptor.

Para determinar la capacidad de almacenamiento disponible durante el ciclo de vida de la instalación se debe considerar distintos factores particulares como el aumento del volumen de sólidos depositados en el tiempo y la calidad del agua, la que puede no ser adecuada para su liberación. Los requisitos de seguridad del depósito determinarán el diseño de distintas obras que eviten el colapso del muro de retención, y los problemas ambientales determinarán la asignación de almacenamiento que debe proporcionarse para reducir el riesgo de derrame de relaves.

Por otro lado, la evaluación de infiltración es necesaria como parte del diseño detallado para definir presiones de poro y superficies freáticas para su uso en el análisis de estabilidad, evaluar restricciones posibles en la tasa de aumento de esta, determinar sus posibles impactos en el entorno receptor, y permitir el diseño de sistemas de drenaje y recolección. En la mayoría de

los casos, es deseable intentar cuantificar las pérdidas potenciales de infiltración antes de que se construya el depósito relaves, y aquí es donde el papel del modelado y la correcta estimación a lo largo de la vida útil del depósito es importante.

5.5.1. Infiltración

En los distintos documentos se especifica que se debe considerar la infiltración potencial desde la zona de decantamiento y la zona de playa hacia las capas inferiores de relaves, las fundaciones y la estructura de contención durante toda la vida del depósito. Esta infiltración se debe presentar como un estudio en el informe de diseño del depósito. Además, se especifica que debe estimarse el volumen, la tasa y la calidad del agua infiltrada para cada etapa, es decir, construcción, operación, cierre y post cierre, de manera especial y por separado demostrándose que dicha infiltración proyectada no comprometerá la integridad de ninguna estructura ni causará daños en el ambiente receptor. Finalmente, exige que se definan las tolerancias permitidas y se justifique el método por el cual se gestionará la infiltración. Sugiere además para la gestión:

- Sistema de drenajes, sumideros y bombas;
- Drenajes de intercepción y zanjas con sistemas de recolección y recuperación;
- Pozos de recuperación; y
- Revestimientos artificiales de baja permeabilidad.

Además, se solicita que se realice un estudio de infiltración detallado como parte del diseño del depósito. Esta evaluación debe determinar los posibles impactos de la infiltración en el ambiente receptor y determinar los sistemas de control a utilizar. Cuando el estudio demuestra

que la infiltración no es suficiente para producir ningún riesgo de contaminación de aguas subterráneas o el relave es inerte se pueden diseñar depósitos sin revestimiento, lo cual, debe ser demostrado. Cuando se requiera revestimiento, se debe utilizar una evaluación de riesgos para determinar la permeabilidad de diseño adecuada, el tipo de revestimiento (natural o artificial), longevidad, grosor y compatibilidad con los relaves retenidos. Además, debe considerar un grosor mínimo operativo debido a la construcción y un sistema de protección durante la misma. Finalmente cuando la evaluación concluya que se requiere revestimiento, se debe considerar como estándar una conductividad hidráulica de 10^{-9} m/s equivalente a una capa de arcilla de un metro de espesor. En la Tabla 5.14 se muestra un extracto de las concentraciones máximas permisibles para relaves con contaminantes en el Estado de Victoria (Australia):

Tabla 5.14: Extracto: Concentraciones permisibles de contaminantes en agua de relaves. Fuente: ERR, 2017

Contaminante	Maxima concentración total <i>mg/kg en peso seco</i>	Concentración Lixiviable <i>mg/L²</i>
Arsenico	500	0.7
Cadmio	100	0.2
Cromo	500	5.0
Cobre	5,000	200
Cobalto	500	-
Mercurio	75	0.1
Molibdeno	1,000	5.00

Por otro lado, en el documento Guidelines on Tailings Dams (ANCOLD, 2012) se entregan las siguientes recomendaciones respecto a la infiltración en depósitos de relaves:

- No debe cuantificarse la infiltración como el resultado que cierre el balance hídrico del depósito de relaves. Esto debido a que esto puede subestimar o sobrestimar seriamente la magnitud de dicho fenómeno.

- Se debe realizar la predicción de la infiltración para varios momentos durante la vida operativa del depósito, con el objetivo de considerar las diferentes alturas del material.
- Debe agregarse la presión de poros generada por la infiltración la presión de poros de la consolidación para el análisis de estabilidad.
- En el modelo de predicción de la cantidad de volumen infiltrado se deben utilizar parámetros de entrada, condiciones de borde y modelado geométrico justificados.
- No se debe medir la calidad del agua infiltrada solamente en el agua decantada, se debe medir de igual manera en el ambiente receptor.
- Utilizar una red de piezómetros que permita determinar el nivel freático en todas las estructuras. Además, es recomendado utilizar algún dispositivo que sea capaz de medir presiones menores a la hidrostática.
- Predecir los impactos potenciales en las aguas subterráneas considerando la capacidad de asimilación de contaminantes del medio receptor;
- Si el estudio de infiltración y los impactos sugieren el uso de revestimientos, se debe utilizar capas de arcilla compactada, mezcla de suelos naturales con bentonita, revestimientos de PVC o HDPE.
- Si se requiere una mayor seguridad, se recomienda utilizar métodos combinados de revestimiento artificial y natural con el uso de drenajes para la recuperación del agua decantada.

5.5.2. Almacenamiento de agua

El diseño de la capacidad de almacenamiento debe considerar todas las posibles entradas de agua al mismo, como la escorrentía natural de la cuenca aportante y las tormentas máximas probables durante toda la vida de la instalación. Esto se debe realizar mediante datos estadísticos medidos en las estaciones correspondientes, sin embargo, si no existen estaciones en la cuenca donde se emplazará el depósito, se permite realizar correlaciones con los registros de áreas cercanas con características similares. Las estimaciones obtenidas de esta manera deberán verificarse con medidas de terreno como escorrentías y marcas de inundaciones anteriores. Por otro lado, se permite el uso de modelos teóricos de inundación para precipitaciones y escorrentías. Además de la inundación interna, el flujo de agua debe tomarse en cuenta para el estudio de erosión de la cara externa de la estructura de retención. Así, el informe de diseño debe presentar:

- Clasificación de consecuencias frente a overtopping;
- Estudio del balance hídrico cuantitativo justificando todas las entradas y salidas. Para depósitos con altos niveles de consecuencia, se debe utilizar estudio de balance hídrico estocástico diario;
- Niveles máximos estimados operativos y de inundación. Dimensionamiento de revancha;
- Velocidades y volúmenes estimados del flujo de agua superficial;
- Métodos para evitar la acumulación de agua adyacente a estructuras de retención;
- Evaluación de posibles requisitos de protección a las estructuras de retención;
- Estudio e implementación de canales de desvío de escorrentía superficial;

- Diseño de un sistema de decantación;
- Vertederos de emergencias; y
- Consideración de efectos del cambio climático.

Al igual que para la infiltración, existe una serie de recomendaciones para la estimación de la capacidad de almacenamiento y balance hídrico dadas en los distintos documentos. En general, se plantean como problemas principales al diseñar un depósito, la variación del volumen disponible debido a la acumulación de sólidos y la incertidumbre en la densidad del relave depositado. Por lo que se sugiere estimar conservadoramente el volumen disponible para el almacenamiento. Además, se recomienda la consideración y verificación de la tasa de producción de relaves y las temporadas húmedas locales al momento de la construcción para disponer de un volumen de reserva de al menos un exceso de capacidad de 6 meses. A continuación se presentan las recomendaciones más importantes para el diseño de la capacidad de almacenamiento de agua de un depósito:

- Se debe determinar la categoría de consecuencias frente a un evento de derrame, estimando el daño producido por el material según su extensión y efectos sobre el medio receptor. Se debe considerar modelos que supongan cantidad de agua combinada con estimaciones de supuestos probables o peores concentraciones de contaminantes en el derrame;
- Se debe proveer de una capacidad extra en periodos de construcción y peraltamiento del muro. Además, se debe proveer de capacidad que permita acumular agua y un sistema de recuperación de la misma;
- Se deben utilizar periodos de retorno de diseño según sea la clasificación de consecuen-

cias obtenida para el derrame. Estos afectaran directamente a las tormentas de diseño, escorrentía, revanchas, etc. A continuación se presenta los periodos recomendados por ANCOLD.

Tabla 5.15: Periodos de retorno de escorrentía según clasificación de consecuencias. Fuente: ANCOLD, 2012.

Categoría de Consecuencia del derrame	Asignación de Almacenamiento de diseño
Bajo	1:5 AEP Escorrentía temporada de lluvia
Significante	1:10 AEP Escorrentia temporada de lluvia
Alto	1:100 AEP Escorrentia temporada de lluvia
Extremo	1:1000 AEP Escorrentia temporada de lluvia

Tabla 5.16: Periodos de retorno de tormenta según clasificación de consecuencias. Fuente: ANCOLD, 2012.

Categoría de Consecuencia del derrame	Asignación de Almacenamiento para Tormoenta Extrema
Bajo	Determinado por evaluación de riesgo
Significante	1:100 AEP, 72 hr de inundación
Alto C	1:100 AEP, 72 hr de inundación
AltoB	1:1000 AEP, 72 hr de inundación
Alto A / Extremo	1:10000 AEP, 72 hr de inundación

- Se recomienda utilizar para la estimación de la capacidad de almacenamiento la escorrentía (conservadoramente) con un coeficiente de 1 y sin considerar evaporación desde la cubeta;
- Identificar claramente el nivel máximo operación en el manual de emergencia y seguridad de la instalación. Aunque la calidad del agua almacenada no sea apta para su liberación, es recomendable proyectar vertederos de emergencia, ya que permite evitar fallas en las estructuras de contención, y por lo tanto evitando un derrame mayor agua abajo del depósito;
- Se debe realizar un balance hídrico del depósito con el cual se pueda comprender las formas en las cuales el agua afecte a las instalaciones. El balance se debe utilizar para determinar

las características de rendimiento del sistema de recuperación de aguas;

- El balance hídrico debe ser realizado considerando el cronograma propuesto para la depositación de relaves;
- Cuando sea apropiado, se debe incluir en el balance el transporte de sustancias importantes como metales pesados o especies inestables como el cianuro.

Finalmente se presentan algunas consideraciones expuestas para incluir los efectos del cambio climático en el diseño de depósitos de relaves:

- En primer lugar se recomienda evaluar la vulnerabilidad de la instalación frente a cambios climáticos y la identificación de los riesgos asociados.; y
- Es importante considerar, según sea la zona climática, efectos como variaciones en la frecuencia de los ciclos de heladas y deshielo, cambio en la severidad de los fenómenos meteorológicos extremos (precipitaciones e inundaciones), cambio en las velocidades de eventos de derretimientos, variaciones temporales de días bajo cero, cambio en periodos de sequía y cambios posibles en el medio donde se emplazara el depósito, particularmente en la vida silvestre y vegetación.

5.6. Construcción

La etapa de construcción es un punto clave en el desarrollo de un proyecto de depósitos de relaves, ya que aun suponiendo un diseño de alta calidad, el comportamiento de la estructura y su seguridad estarán directamente asociados a la manera en que se construye. La gestión de la construcción, la supervisión técnica y la relación entre calidad y control son esenciales para

la construcción exitosa de un depósito y sus obras secundarias. Así, es posible definir como objetivo de la construcción el crear un depósito seguro y estable, ajustado en todo momento, a las condiciones otorgadas por el diseño, el cual cumpla con las funciones de almacenamiento de relaves y agua.

En Chile, en el Decreto Supremo N°248 se presentan especificaciones y requisitos generales que se deben cumplir en la etapa de construcción para la aprobación de un proyecto de relaves. En general, el alcance de estos requisitos es asegurar que el proyecto se está ejecutando acorde al diseño aprobado, fijando inspecciones técnicas de obra por parte de la autoridad competente, solicitando el programa de construcción de las distintas etapas y asignando las responsabilidades correspondientes. Si bien, estos requisitos regulan los aspectos constructivos, no son lo suficientemente completos para garantizar altos estándares de calidad.

5.6.1. Antecedentes para la construcción

Según los documentos del Department of Minas and Petroleum (2015) y Earth Resources Regulation (2017), para la aprobación de un proyecto de depósito de relaves, es necesario presentar los detalles de los métodos, procedimientos y los materiales que se utilizarán en la fase de construcción, con el fin de tener una base de gestión que permita controlar y verificar que se está realizando acorde a lo proyectado y que se lograrán los objetivos del diseño propuesto. Entre los documentos principales a reportar se encuentran informes técnicos y planos que aborden los siguientes tópicos:

- Método de construcción y detallamiento de las etapas de construcción.

- Detalles de cada componente del depósito.
- Especificaciones de compactación (altura de elevación, contenido de humedad, densidad compactada)
- Preparación técnica requerida para el área de almacenamiento y especificaciones de recurrimientos si son necesarios.
- Preparación del suelo de fundación y procedimientos para la verificación de parámetros de diseño utilizados.
- Fuente del material para la construcción del muro y características de depositación.
- Cargas de tráfico permitidas y presiones de apoyo en las fundaciones y la estructura.
- Trabajos temporales (cuando corresponda).
- Características y parámetros técnicos de los materiales utilizados.
- Volúmenes de materiales requeridos
- Instrumentación de monitoreo (por ejemplo, superficie freática, infiltración, asentamiento).

Además, el informe debe considerar los requisitos para el mantenimiento continuo, el monitoreo y la verificación de las características geotécnicas e hidrogeológicas del depósito. Si corresponde, el informe de diseño también debe describir las implicaciones de los métodos para obtener relaves para la construcción o la producción de rellenos. Finalmente, como parámetros constructivos la práctica de la ingeniería recomienda (Villavicencia, 2014) que la compactación del muro de contención sea de un 95 % del proctor modificado (o 70 % de la densidad relativa), utilización de arenas con máxima cantidad de finos ($< 80\mu m$) entre el 10 % y 25 %, una densidad in situ de 1.7 a 1.8 g/cm^3 y pendiente del talud aguas debajo de 1:4 a 1:4.5 (H:V).

En términos de gestión de la construcción, es importante que se detallen antes de esta etapa los siguientes aspectos que aseguren la calidad de la ejecución de la obra:

- Especificaciones y programación de proyectos integrales para permitir la estimación de costos y la licitación y selección de contratistas.
- La selección de equipos de construcción apropiados capaces de cumplir con las especificaciones de diseño para el muro de inicio del depósito o el movimiento de tierras para levantar muros posteriores.
- La definición de roles de gestión de proyectos, incluidos el ingeniero de diseño, el ingeniero responsable (para el proyecto de construcción), el representante del propietario y el técnico de garantía de calidad, y el nombramiento de profesionales competentes para esos roles.
- El compromiso de supervisores de construcción experimentados para garantizar la adhesión al diseño y reconocer la necesidad de consultar con el ingeniero de diseño para aclarar el diseño y discutir sobre cualquier cambio requerido en el diseño.
- La participación del ingeniero de diseño durante la construcción, incluidas las inspecciones periódicas de las obras por parte del ingeniero de diseño y para garantizar que cualquier cambio realizado durante la construcción son aprobados por el ingeniero de diseño y están quedarán claramente documentados.

5.6.2. Desarrollo de la construcción

Supervisión y Documentación

Durante la etapa de construcción, una persona competente debe certificar que la ejecución del depósito cumple con las especificaciones y tolerancias de diseño, y preparar un informe que contenga como mínimo lo siguiente:

- Documentación sobre las condiciones encontradas durante la construcción (incluidas las pruebas de campo y de laboratorio) y las verifica contra las supuestas en el diseño.
- Registro detallado y una descripción de los aspectos geotécnicamente críticos, como la preparación de cimientos, el tratamiento de grietas en zanjas clave y cortadas o la compactación de relleno alrededor de las obras de salida. (este registro ayuda en el diseño y construcción de trabajos correctivos si ocurre algún problema posterior a la construcción)
- Informe de incumplimiento con medidas correctivas documentadas si las condiciones encontradas no cumplían con el diseño o las especificaciones originales.
- Informe de variación si se requirió que la construcción se desviara del diseño original.
- Información que demuestre que el régimen de prueba y medición fue apropiado y suficiente para validar los parámetros de diseño.
- Planos del depósito que muestren las posiciones reales de los elementos, como pozos, muros y taludes, desagües, pilas de tierra vegetal, fuentes de material, estanques de agua de proceso y de retorno, zanjas de infiltración, instrumentación de monitoreo, torres de decantación y tuberías y cables enterrados.

Es importante que los registros de construcción y los datos de monitoreo se preparen por separado en cada etapa de la misma, ya que estos formaran la base de la siguiente etapa. La persona encargada de realizar lo mencionado anteriormente, debe ser el Ingeniero Responsable, quien tiene la responsabilidad de la dirección técnica del trabajo, la supervisión durante la construcción y la certificación de los trabajos de construcción. ANCOLD (2012) define a un ingeniero responsable como “persona con las calificaciones y experiencia apropiadas responsables de la supervisión de la construcción de la presa de relaves. Idealmente, este debería ser el diseñador, y en su defecto, se debería desarrollar un vínculo bien definido entre el diseñador y el personal de supervisión para garantizar que los requisitos de diseño se cumplan en las fases de construcción y operativa”.

Modificaciones

Cuando sea necesario modificar el diseño del depósito durante la construcción, el proponente debe discutir esto con el departamento de competente. Es esencial que se obtenga un diseño revisado, planos de diseño y certificación de la modificación de la persona que certificó el diseño original. Es probable que se requiera una variación del plan de trabajo para permitir que el departamento apruebe el cambio. Al finalizar la construcción inicial, y al finalizar cada etapa de elevación o construcción, el proponente debe obtener la certificación del Ingeniero responsable de que el depósito se ha construido de acuerdo con los planes de diseño certificados y aprobados; y presentar el informe 'AS-BUILT' y la certificación de construcción al departamento competente.

Planos e informe AS-BUILT

Los registros AS-BUILT que detallan la construcción de cada etapa deben prepararse y conservarse para ayudar a determinar la estabilidad general y la vida futura del depósito. Los registros deben incluir planos topográficos de:

- Los contornos finales de la superficie del suelo dentro y fuera del depósito.
- Contornos originales de la superficie del suelo dentro y fuera del depósito.
- Ubicación de los pozos y pozos de prueba (y detalles con respecto a su relleno)
- Ubicación del sistema de drenaje.
- Ubicación y detalles de la instrumentación instalada.
- Confirmación de que el revestimiento se ha construido con las especificaciones requeridas.

5.7. Operación, Mantenimiento y Monitoreo

La gestión de los Depósitos de relaves es una tarea de vital importancia para garantizar la seguridad y correcto funcionamiento de las instalaciones, ya que aun asegurando que el depósito se haya diseñado y construido de manera satisfactoria, errores en la operación o vigilancia pueden desencadenar en fallas catastróficas y afectar a todo su entorno. Es por esto, que instituciones como el Mining Association of Canada (MAC) y el International Council on Mining Metal (ICMM) han desarrollado documentos donde se entregan las directrices generales y específicas para implementar un sistema que permita gestionar de manera más eficaz el riesgo y así minimizar los posibles daños. El marco del sistema de gestión se muestra en la Figura 5.3, donde es posible

identificar el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMS por sus siglas en inglés) y las consideraciones particulares en las que se basa. Además es importante la definición externa de responsabilidades, la cual se observa como Gobernanza (Ver inciso 5.2). A continuación, se describen las especificaciones para el desarrollo de un correcto Manual OMS y los protocolos para la medición de cumplimiento y efectividad para lograr un depósito sostenible.

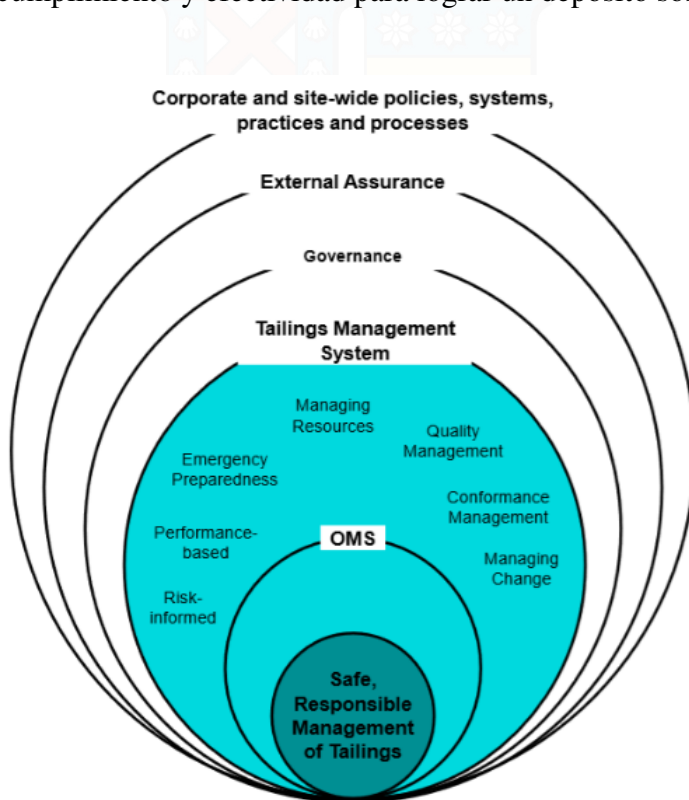


Figura 5.3: Marco general de Sistema de Gestión de Depósitos de relaves. Fuente: Tailings and Waste, 2019.

5.7.1. Manual OMS

El objetivo de un manual de OMS es facilitar la gestión de riesgos y el rendimiento de los depósitos de relaves, lograr la intención del diseño y cumplir con los requisitos legales, la política corporativa y los compromisos con las comunidades de interés. Para lograr esto, un manual de

OMS define y describe:

- Gobernanza.
- Los componentes de la instalación cubiertos en el alcance del manual de la OMS.
- Planes, procedimientos y procesos para:
 - La operación, mantenimiento y vigilancia de la instalación de relaves para garantizar que funcione de acuerdo con su diseño, cumpla con los objetivos de desempeño, las obligaciones normativas y de política corporativa, respalde el plan de gestión de riesgos y enlaces a la preparación para emergencias.
 - Evaluar el desempeño de la instalación e informar los resultados del desempeño
 - Gestionar el cambio.

El funcionamiento del Manual OMS queda descrito según muestra el diagrama de flujo de la Figura 5.4. Por otro lado, desarrollo de este debe estar dirigido por un equipo perteneciente a la empresa operadora con responsabilidades de varios aspectos de la gestión de relaves en el sitio, y debe haber una persona con la responsabilidad principal designada del Manual de OMS: el propietario del Manual de OMS. Se debe buscar la experiencia específica para su elaboración del Diseñador y del Ingeniero de Registro. El equipo de desarrollo debe ser multidisciplinario y reflejar todos los aspectos relacionados con la gestión de relaves y coordinarse con otros aspectos de las operaciones del sitio que se relacionan con relaves.

A continuación se describe el contenido mínimo de un Manual OMS según el documento Developing an Operation, Maintenance, and Surveillance Manual (MAC, 2019).

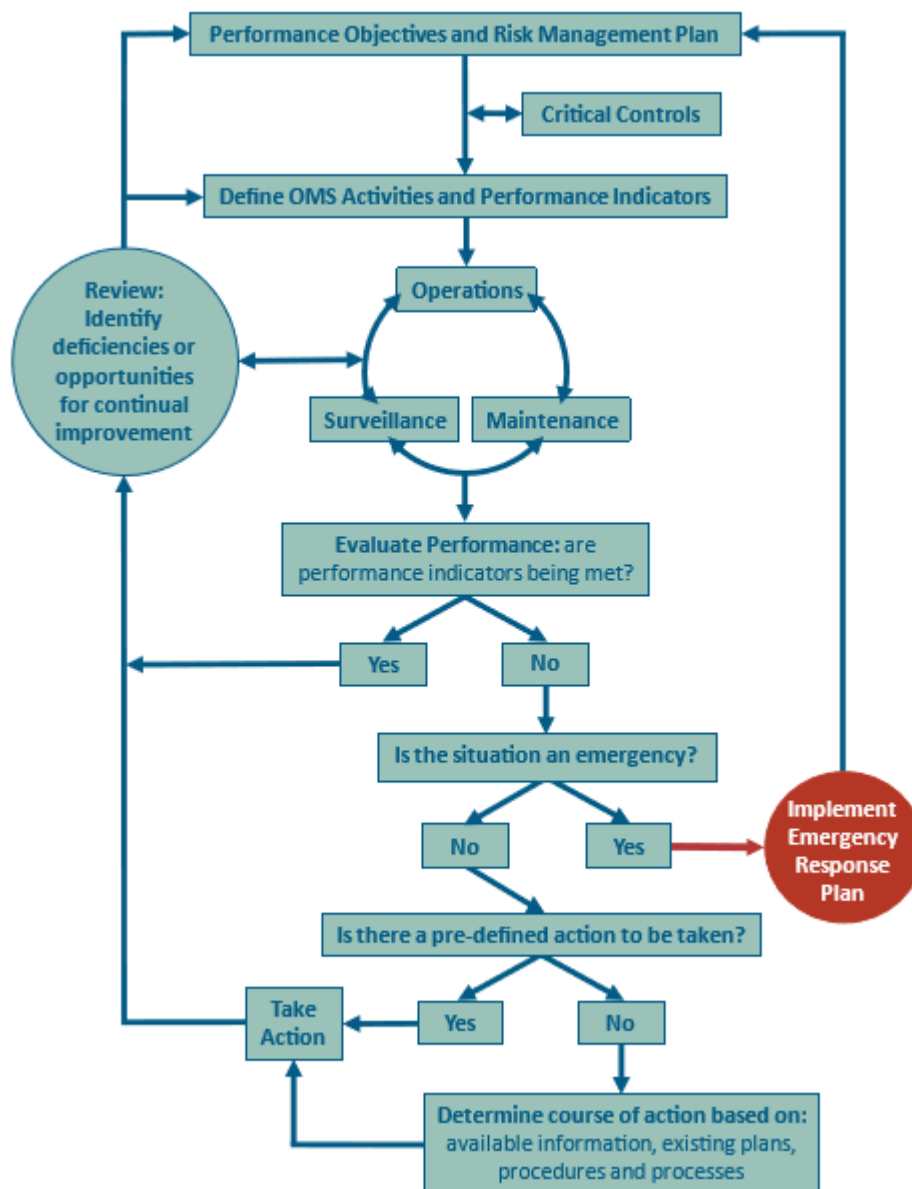


Figura 5.4: Diagrama de flujo de funcionamiento de un Manual OMS. Fuente: MAC, 2019.

Gobernanza en Manual OMS

Además de lo indicado anteriormente sobre Gobernanza, el Manual OMS debe contener en este inciso especificaciones sobre:

Sistema de Seguimiento de Actividades: Sistema que proporcione un mecanismo para asegurar a la persona responsable que la actividad se ha llevado a cabo según lo programado.

El sistema de seguimiento debe incluir un mecanismo para marcar eventos cuando la actividad no se haya llevado a cabo según lo programado, proporcionando a la persona responsable la información que necesita, de manera oportuna, para poder tomar las medidas adecuadas.

Sistema de Gestión de Calidad: Sistema que describa los requisitos, procesos y procedimientos de gestión de calidad para las actividades de mantenimiento y vigilancia.

Reportes: Se debe describir las relaciones de informes entre diferentes individuos y unidades con roles directos e indirectos relacionados con la gestión de relaves, y detallar como se llevará a cabo el flujo de información.

Capacitación y competencia: Descripción de los requisitos mínimos de conocimiento y competencia para cada puesto con responsabilidades definidas.

Salud y seguridad ocupacional: Descripción de las capacitaciones necesarias para la ejecución de actividades que presenten riesgos para la salud y seguridad del personal involucrado.

Descripción del depósito en Manual OMS

Se debe registrar, mantenerse y conservarse la información sobre las condiciones del sitio de emplazamiento, condiciones climáticas, requisitos legales, características de la instalación, rendimiento del depósito y de planes futuros que puedan afectar la instalación. En el Manual OMS se debe hacer referencia a este contenido con el objetivo de proporcionar un contexto que vincule las actividades de la OMS con el perfil de riesgo de la instalación, los objetivos de rendimiento, los controles críticos, los requisitos legales, etc., para ayudar a garantizar que el personal comprenda las posibles implicaciones para la gestión de relaves de su función individual responsabilidades, nivel de autoridad y acciones.

Operación en Manual OMS

Este componente del manual de OMS define y describe planes y procedimientos para implementar controles operativos que permiten que la instalación de relaves se opere de acuerdo con la intención de diseño, los objetivos de rendimiento, el plan de gestión de riesgos y los controles críticos para la instalación. Así, es necesario definir Objetivos de desempeño que permitan evaluar la intención de diseño de la instalación, requisitos ambientales y evaluación de riesgo. Estos deben desarrollarse en colaboración con el Ingeniero de Registro y el Ingeniero Responsable. El control de estos objetivos se debe realizar fijando indicadores cuantificables, con los que sea posible especificar el rango de rendimiento que puede requerir medidas correctivas. En la Tabla 5.17 se muestran algunos ejemplos de estos indicadores.

Tabla 5.17: Ejemplos: Indicadores de desempeño de Operación. Fuente: MAC, 2019.

Contenido de relaves
Especificaciones de fundaciones
Especificaciones de construcción
Disponibilidad de material de construcción y programación de expansiones
Actividades de compactación
Medidas de control de erosión
Medidas de control de emisión de material particulado

Además, se deben fijar Procedimientos Operativos Estándar que reflejen mejor las características de una instalación y respalden los objetivos de rendimiento y el plan de gestión de riesgos. Un enfoque típico planteado es desarrollar un conjunto de procedimientos operativos estándar que sirvan de base para una instalación bien administrada. Estos se deben fijar para tres áreas particulares como mínimo:

- Transporte y colocación de relaves.

- Construcción en curso de las instalaciones.
- Manejo del agua en el depósito.

Mantenimiento en Manual OMS

El mantenimiento incluye actividades preventivas, predictivas y correctivas llevadas a cabo para proporcionar un funcionamiento adecuado continuo de toda la infraestructura, o para ajustar la infraestructura para garantizar el funcionamiento de conformidad con los objetivos de rendimiento. El objetivo del mantenimiento es proporcionar medios preventivos y correctivos para lograr los objetivos de rendimiento y gestionar el riesgo durante todo el ciclo de vida de una instalación de relaves. En un Manual OMS se debe describir e identificar:

- Toda la infraestructura dentro del alcance del manual que tiene requisitos de mantenimiento.
- Actividades de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.

A continuación se muestran las definiciones entregadas de los tres tipos de mantenimiento:

Mantenimiento preventivo: Actividades de mantenimiento planificadas y recurrentes realizadas con una frecuencia fija o aproximada y que generalmente no surgen de los resultados de las actividades de vigilancia.

Mantenimiento predictivo: Mantenimiento predefinido realizado en respuesta a los resultados de las actividades de vigilancia que miden la condición de un componente específico contra los criterios de rendimiento.

Mantenimiento correctivo: Reparación de los componentes de la instalación de relaves para evitar un mayor deterioro y garantizar su funcionamiento de conformidad con los objetivos

de rendimiento.

Finalmente, se destaca que es importante recopilar y registrar la información de las actividades de mantenimiento. Es posible incluir en el Manual OMS listas de verificación o formularios de informe para facilitar dicha tarea.

Vigilancia en Manual OMS

La vigilancia implica Inspección y Monitoreo (es decir, la recopilación de observaciones y datos cualitativos y cuantitativos) de actividades e infraestructura relacionadas con la gestión de relaves. La vigilancia también incluye la documentación, el análisis y la comunicación oportunos de los resultados de la vigilancia, para informar la toma de decisiones y verificar si se están cumpliendo los objetivos de desempeño y los objetivos de gestión de riesgos, incluidos los controles críticos. Los resultados de la vigilancia se utilizan para identificar tendencias y comportamientos que son indicativos del rendimiento real de la instalación de relaves. Un programa de vigilancia eficaz es:

- Conducido por un rango de personal con responsabilidades directas e indirectas relacionadas con el manejo de relaves.
- Aplicado a lo largo del ciclo de vida de una instalación de relaves, mientras se adapta a las necesidades específicas de vigilancia de cada fase y las condiciones cambiantes del sitio.
- Basado en los objetivos de rendimiento específicos del sitio y el plan de gestión de riesgos.
- Usado para informar la toma de decisiones relacionadas con la gestión de relaves, en base a la notificación clara y oportuna de los resultados de la vigilancia.

Actividades de vigilancia

Existen dos tipos de actividades de vigilancia, observación e inspecciones del sitio y monitoreo de instrumentos. A continuación se describen dichas actividades.

Observación e inspecciones del sitio

La observación e inspecciones del sitio se utilizan para identificar y rastrear cambios visibles en la condición del depósito de relaves. La observación y las inspecciones del sitio incluyen las observaciones directas del personal en o cerca de las instalaciones de relaves. Estas deben estar descritas en el Manual OMS según:

- Procesos y procedimientos para documentar observaciones.
- Procesos para reportar cualquier observación que haya sido documentada.

Las inspecciones se deben dividir en inspecciones especiales y de rutina, y en el Manual OMS se debe describir:

- Frecuencia para realizar inspecciones de rutina (por ejemplo, podría ser una o más por turno para algunos tipos de inspecciones, semanal, mensual o trimestral para otros);
- Circunstancias que provocarían la necesidad de inspecciones especiales;
- Condiciones o aspectos que deben observarse como parte de la inspección.
- Procesos y procedimientos para documentar e informar los resultados de las inspecciones.

Monitoreo de Instrumentos

El monitoreo de instrumentos proporciona información sobre parámetros o características que no pueden detectarse a través de la observación o inspecciones del sitio, no pueden observarse con suficiente precisión y exactitud o necesitan ser monitoreado a alta frecuencia o continuamente.

Para el monitoreo de instrumentos, el Manual de OMS debe describir:

- Parámetros que se incluirán como parte del monitoreo de instrumentos, incluidos aquellos que no están directamente relacionados con la instalación de relaves.
- La frecuencia de adquisición de datos para cada parámetro.
- Instrumentos a utilizar para cada parámetro.
- Quién es responsable de la adquisición de datos para cada parámetro.
- Ubicaciones de instrumentos, o ubicaciones donde se deben recolectar muestras.
- Metodología y procedimientos para la adquisición de datos, incluidos los relacionados con la gestión de la calidad.
- Procesos y procedimientos para documentar los resultados de la vigilancia instrumental y la interpretación de los resultados.
- Quién es responsable de documentar los resultados.

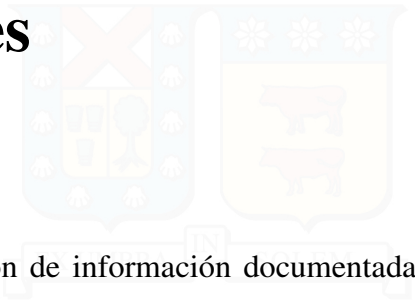
Análisis de los resultados de la Vigilancia, comunicaciones y toma de decisiones

Para el uso efectivo de los resultados de la vigilancia en la gestión de relaves y la toma de decisiones, los resultados se deben recopilar, examinar, analizar e informar de manera oportuna y

efectiva. Para todas las actividades de vigilancia, un manual de la OMS describe:

- El rango esperado de observaciones o el desempeño de los parámetros de vigilancia, por lo que cualquier resultado fuera de ese rango puede ser identificado e informado.
- Metodología y procedimientos para el análisis de datos, incluidas las comparaciones con el rendimiento esperado y los controles críticos.
- Quién es responsable del análisis de datos para cada parámetro.
- Forma en la cual los resultados de la vigilancia y el análisis deben ser reportados.
- Plazos para el análisis de datos y la presentación de informes.
- Procedimientos para informar resultados si: Las observaciones y el rendimiento están dentro del rango esperado; Cualquier observación o desempeño está fuera del rango esperado.

6 Conclusiones



Del análisis y recopilación de información documentada en las distintas normativas y guías internacionales, es posible notar que el Decreto Supremo N°248 (2007) es un cuerpo legal que cubre la totalidad de los temas a tener en consideración para la ejecución de un proyecto de depósitos de relaves. Esto en general, no se presenta así en los cuerpos normativos extranjeros, donde se regulan los distintos aspectos de seguridad de un depósito mediante distintas normativas y guías por separado. Sin embargo, el DS N°248 se enfoca en la descripción general de documentación mínima a presentar para la aprobación de un proyecto, dejando de lado detalles de aspectos importantes como consideraciones de diseño para asegurar la estabilidad física, mantener un correcto manejo de aguas, o aspectos administrativos de responsabilidad como la Gobernanza de las instalaciones.

Del catastro realizado con los datos publicados por SERNAGEOMIN (2019), se destaca el alto porcentaje de depósitos con menos de 1 millón de metros cúbicos de capacidad máxima autorizada, llegando a un 86 % de las instalaciones totales existentes. Esto da grandes indicios de que la pequeña minería en Chile es abundante, y que poseer diferencias en los niveles de exigencias para el diseño, construcción y operación de los depósitos conseguiría una mayor

eficiencia en la seguridad, manejo de información y rapidez en los procesos de aprobación de estos proyectos, donde un sistema de clasificación basado en riesgos se presenta como una buena herramienta para esto.

Los sistemas de clasificación basados en riesgos y nivel de consecuencias generados por una posible falla están siendo utilizados en todos los países analizados, presentando diferencias en la cantidad de categorías o el uso de características geométricas para medir indirectamente el peligro de las estructuras. Sin embargo, los sistemas de clasificación tienden a ser similares y considerar los efectos en los factores humanos, económicos y medioambientales para determinar su categoría. Además, otro punto en común corresponde a la determinación de la Zona de Inundación debido a fallas de rotura del sistema de contención del depósito o debido a derrames por rebose de la capacidad de la instalación. Esta zona de inundación, se solicita para determinar el área impactada, generar sistemas de operación y manuales de emergencias. En el Decreto Supremo N°248 se hace referencia a esta solamente indicando que se debe obtener la *Distancia Peligrosa*, pero no se indica ningún uso ni requisito especial para su determinación.

Por otro lado, es necesario poner énfasis en el sistema de Gobernanza de un depósito, ya que este define cargos, líneas de comunicación, alcances de responsabilidad y encargados del control y mantenimiento. Esto, se debe solicitar como es expuesto en los documentos de Mining Association of Canada (2019) o el International Council on Mining and Metals (2019) para minimizar el riesgo mediante una correcta gestión.

Respecto a las consideraciones de diseño para asegurar la estabilidad física, es importante alinear los requisitos con un sistema de clasificación basado en consecuencias como el descrito anteriormente. Identificar específicamente periodos de retorno para las solicitaciones sísmicas,

eventos de inundación y tormentas para las diferentes categorías generaría diseños más eficientes y de mejor comportamiento.

El manejo de la infiltración del depósito en la actual normativa chilena es altamente general, especificando solamente la descripción de algunas obras de drenaje para evitar dicho fenómeno. Sin embargo, las especificaciones encontradas en los diferentes documentos analizados presentan una mayor profundidad donde se solicita determinar volúmenes, tasas y velocidades de infiltración con métodos justificados para ser utilizado en una evaluación ambiental. Así, se recomienda incluir dichas especificaciones en el cuerpo normativo actual.

Finalmente, el desarrollo de un Manual OMS como el descrito en el capítulo anterior se considera una práctica de gran valor para garantizar la seguridad de un depósito. Es importante destacar que un correcto diseño de una instalación de almacenamiento de relaves no basta para evitar una falla en la estructura. Es por esto, que contar con un Manual que describa claramente las condiciones normales de operación, las instancias de monitoreo normal y especial, y las metodologías para la mitigación y corrección de desvíos del funcionamiento normal de la instalación es recomendado incluir como requisito para la aprobación de un proyecto en Chile.

7 Bibliografía



ANCOLD. (2012). Guidelines on Tailing Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure. Australia.

Australian Government, (2019). Australian Rainfall and Runoff A Guide To Flood Estimation.

Australia. Bernedo ,et al. (2011). Dam Breach Analysis in Tailings Storage Facilities (TMF). ASCE World Environmental and Water Resources Congress, Palm Springs, California.

Blight, G.E., Tronscoso, J., Fourie, A.B., and Wolski, W. 2000. Issues in the geotechnics of mining-wastes and tailings. In Proceedings of GeoEng2000, an International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, November 2000. pp. 1253–1285.

Bureau of Land Management, (1976). Federal Land Policy and Management Act, EEUU.

Carvajal, (2018). Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves. Chile.

CDA, (2007). Dam Safety Guidelines. Canada.

CDA, (2014). Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams. Canada.

Concha, (2018). Tailings Dams Failures: Updated Statistical Model for Discharge Volume and

Runout. Enviroments.

Decreto Supremo N°248. (2007). Reglamento para la aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los depósitos de relaves, Gobierno de Chile.

Department of Mines Western Australia, (1995). Mines Safety and Inspection Regulations. Australia.

Department of Mining and Petroleum (DMP), (2013), Code of Practice. Western Australia, Australia.

Department of Mining and Petroleum (DMP), (2015), Guide to Departmental requirements for the management and closure of TSFs. Western Australia, Australia.

Department of Mining and Petroleum (DMP), (2015), Guide to the preparation of a design report for TSFs. Western Australia, Australia.

Department of the Environment and Energy, (1999). Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999. Australia.

Earth Resources Regulation (ERR), (2017). Technical Guideline: Design and Management of Tailings Storage Facilities. Victoria, Australia.

Falcon-Hernandez (2018). Small Tailings Deposits in Chile: National Impact of Oublicly Available Data. Vienna, Austria.

FEMA, (2004a). Federal Guidelines for Dam Safety. EEUU.

FEMA, (2004b). Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams, EEUU.

FEMA, (2005). Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams. EEUU.

FEMA, (2013). Federal Guidelines for Dam Safety: Emergency Action Planning for Dam, EEUU.

Fernandes, et al. (2016). Deep into the mud: Ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brasil.

Fundación Chile, (2016), Desde el cobre a la Innovación . Roadmap Tecnológico 2015 – 2035 . Recuperado de [http:// programaaltaley .cl/publicaciones/](http://programaaltaley.cl/publicaciones/)

Government of Ontario, (1990). Ontario Mining Act. Canada.

Government of Quebec, (2000). Quebec Mining Act. Canada.

Government of Western Australia, (1978). Mining Act of 1978. Western Australia, Australia.

Government of Western Australia, (1981). Mining Regulations of 1981. Western Australia, Australia.

ICMM, (2019). Borrador de Norma Global de relaves.

ICOLD (2001) . Design Features of Dams to Resist Seismic Ground Motion, Guidelines and case studies. Bulletin 120.

ICOLD (2011) .Improving Tailings Dam Safety: Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure. Bulletin 139.

ICOLD (2013) . Sustainable Design and Post-Closure Performance of Tailings Dams Bulletin 153.

ICOLD (2016) . Small Dams: Design, Surveillance and Rehabilitation. Bulletin 157.

ISO, (2018). ISO 31000. Gestión del riesgo: Los principios y directrices.

Jeyapalan, et al. (1983). Analyses of flow failures of mine tailing dams. *Journal of Geotechnical Engineering*.

Lucia, (1981). Review of experiences with flow failures of tailings dams and waste impoundments. 1981. 228 f.. PhD. Dissertation – University of California, Berkeley.

Ministério de Minas e Energia, (2017). Portaria nº 70.389, Brasil.

Ministério de Minas e Energia, (2019). Resolução nº13 Agência Nacional de Mineração, Brasil.

Ministerio de Minería de Chile. (2012). Decreto 41: Aprueba Reglamento de la Ley de Cierre, de Faenas e Instalaciones Mineras.

Ministerio de Minería de Chile. (2012). Ley 20.551: Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.

Ministerio de Obras Públicas (2015). “Decreto MOP N°50, de 2015, Que aprueba reglamento a que se refiere el artículo 295 inciso 2°, del Código de Aguas” .

Ministerio Secretaría General de la Presidencia, (2016). Ley 19.300: Aprueba Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Chile.

Ministry of Energy and Mines, (2016). Health, Safety and Reclamation Code for Mines. British Columbia, Canada.

Ministry of Energy and Natural Resource, (2017). Guidelines for Preparing Mine Closure Plans. Quebec, Canada.

Renova Foundation Update, (2017). Available online: <http://www.bhp.com>

Rico, M. (2007). Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, v. 154, p. 79-87.

Rico, M. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, pp. 846-852.

Rocha, (2015), F. F. Retroanálise da ruptura da Barragem São Francisco – Miraf, Minas Gerais, Brasil.

SERNAGEMIN, (2018). Anuario de la Minería de Chile. Recuperado de: https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/Libro_Anuario_2018_.pdf

SERNAGEOMIN. (2015). Preguntas Frecuentes sobre Relaves.

Smith, G.P., Davey, E.K. and Cox, R.J. (2014), Flood Hazard UNSW Australia Water Research Laboratory Technical Report 2014/07 30 September 2014.

Taguchi, (2014). Fault Tree Analysis of Slurry and Dewatered Tailings Management – A Frame Work. Dissertação de Mestrado, University of British Columbia, Canadá, 89 p.

Tailings and Waste, (2019). Corporate Governance of Tailings Facilities. Challenges and Case Studies of Implementation. Canada.

The Mining Association of Canada , (2017). A Guide to the Management of Tailings Facilities. Canada.

The Mining Association of Canada, (2019). Developing an Operation, Maintenance, and Surveillance Manual. Canada.

The Mining Association of Canada, (2019). Towards Sustainable Mining – Tailings Management Protocol. Canada.

Troncoso, J. 2002. Dynamic properties and seismic behavior of thickened tailings deposits. In Proceedings of the International Symposium on Paste and Thickened Tailings Disposal, The Catholic University of Chile, Santiago, Chile.

Troncoso, J., Vergara, A., and Avendaño, A. 1993. The seismic failure of Barahona tailings dam. In Proceedings of the Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Mo., 1–4 June 1993. pp. 1473–1479.

VALE, (2018). Relatório Técnico Estudo de Ruptura hipotética - Dam Break. Brasil.

Verdugo, R. (2011). Seismic performance of slopes and earth and tailings dams (2010 Maule Earthquake). In Proceedings of the Fifth International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering (5-ICEGE), Santiago de Chile, 10–13.

Villavicencio, et al. (2018). Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanente. Santiago, Chile.

Villavicencio, G. (2013). Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. Can. Geotech. J., pp. 449-464

WISE Uranium Project, (2013). Chronology of major tailings dam failures. [Online.] Available from <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> [accessed 5 March 2013].

8 Anexos

Tabla 8.1: Normativas vigentes en Chile.

Nº Norma	Tipo de norma	Materia	Nombre de la norma	Año	Diseño	Construcción	Operación	Cierre	Otros
DS N°248	Reglamento	Minería	Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relave.	2007	X	X	X	X	
DS N°50	Reglamento	Obras Públicas	Reglamento que establece las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas del art. 294 del Código de Aguas.	2015		X			
Ley 19.300	Ley marco	Medio Ambiente	Ley sobre Bases Generales del Medioambiente	1994					X
DS N° 148	Reglamento	Salud	Reglamento sanitario sobre manejo de recursos peligrosos	2003					X
DS N°40	Reglamento	Medio Ambiente	Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto ambiental	2013					X
Ley 20.551	Ley	Minería	Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras	2011				X	

Tabla 8.2: Guías y normativas de Australia

Nº Norma	Tipo	Materia	Nombre de la Norma o Guía	Año	Diseño	Construcción	Operación	Cierre	Otro
09-a0-02	Act	Minería	Mining Act	1978					X
11-j0-00	Reglamento	Minería	Mining Regulations	1981					X
Nº91	Act	Medio Ambiente	Environmental Protection and Biodiversity Conservation Act	1999					X
06-a0-03	Reglamento	Minería	Mines Safety and Inspection Regulations	1995			X		
-	Guía	Minería	Code of Practice - DMP	2013	X	X	X	X	
-	Guía	Minería	Guide to the preparation of a design report for tailings storage facilities	2015	X	X	X	X	X
-	Guía	Minería	Design and Management of Tailings storage Facilities - ERR	2017	X	X	X	X	X
-	Guía	Minería	Guide on Tailings Dams - ANCOLD	2012	X	X	X	X	X

Tabla 8.3: Guías y normativas de Canadá

Nº Norma	Tipo	Materia	Nombre de la norma	Año	Diseño	Construcción	Operación	Cierre	Otros
c.M.14	Estatuto	Minería	Ontario Mining Act	1990					X
m.13.1	Estatuto	Minería	Quebec Mining Act	2000					X
-	Guía	Minería	Health, Safety and Reclamation Code for Mines British Columbia	2016	X	X	X		X
M08-03a-1711	Guía	Minería	Guidelines for Preparing Mine Closure Plans	2017				X	
-	Guía	Obras Públicas: Tranques y represas	Dam Safety Guidelines	2007	X	X	X		
-	Guía	Obras Públicas: Tranques y represas	Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams	2014		X	X		X
-	Guía	Minería	Management of Tailings Facilities MAC	2017			X		X
-	Guía	Minería	Operation, maintenance and Surveillance Manual MAC	2019			X		X

Tabla 8.4: Guías y normativas de Estados Unidos

Nº Norma	Tipo	Materia	Nombre de la norma	Año	Diseño	Construcción	Operación	Cierre	Otros
Sess. 2, ch. 152	Estatuto	Minería	General Mining Act	1872					X
Pub. L94-579	Estatuto	Medio Ambiente	Federal Land Policy and Management Act	1976	X				X
FEMA 93	Guía	Minería	Federal Guidelines for Dam Safety	2004	X			X	
FEMA 64	Guía	Minería	Federal Guidelines for Dam Safety: Emergency Action Planning for Dam Owners	2013	X	X	X	X	
FEMA 65	Guía	Obras Públicas	Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams	2005	X				
FEMA 333	Guía	Obras Públicas	Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams	2004	X			X	
EPA 530-R-94-038	Guía	Minería	Technical Report Design and Evaluation of Tailing Dams	1994	X				

Tabla 8.5: Guías y normativas de Brasil

Nº Norma	Tipo	Materia	Nombre de la norma	Año	Diseño	Construcción	Operación	Cierre	Otros
Ley 12.334	Ley	Obras Públicas	Establece la Política Nacional de Seguridad de Represas Crea el Registro Nacional de Represas de Minería, el SIGBM y establece la base para la ejecución, la cualificación de los responsables técnicos, el contenido mínimo y el nivel de detalle del Plan de Seguridad de las Represas, de las Inspecciones de seguridad Regular y Especial	2010	X	X			X
70.389	Decreto	Minería	Establece medidas regulatorias para asegurar la estabilidad de los depósitos de relaves	2017	X		X		
Nº 13	Resolución	Minería		2019			X		