



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**GESTIÓN INTEGRADA DEL MANEJO DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN  
DE TÚNELES URBANOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**VALERIA NICOLE MIRANDA VALLEJOS**

PROFESOR GUÍA:

EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

MIEMBROS DE LA COMISION:

ALEXANDRE ARAO GOMES

ROBERTO GESCHE SCHULER

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: Valeria Nicole Miranda Vallejos  
FECHA: 14/09/2016  
PROFESOR GUÍA: Edgardo González Lizama

## **GESTIÓN INTEGRADA DEL MANEJO DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES URBANOS**

Desde el comienzo de la construcción de túneles urbanos en Santiago, en particular, desde el inicio de la ejecución de los del Metro de Santiago a partir de los años 90, la gestión del riesgo de personas, equipos y estructuras circundantes ha sido un factor de gran relevancia para todos los actores (Mandantes, Consultores, Inspecciones Técnicas de Obra, Contratistas y Subcontratistas).

En la actualidad, se cuenta con un vasto aprendizaje en términos de estándares de seguridad en la construcción de túneles urbanos, logrado a lo largo de todos estos años de experiencia, sin embargo, dicho aprendizaje aún no se encuentra enteramente organizado y catalogado dentro de un concepto integral.

Por lo anterior, este trabajo se propone documentar aprendizajes relevantes de los distintos actores involucrados en dichas obras respecto de los riesgos, con el objetivo de desarrollar un Plan de Manejo de Riesgo en la construcción de túneles urbanos (RMP: Risk Management Plan) donde se jerarquicen los principales factores de riesgo y que sirva de guía para futuros proyectos, recogiendo además los conceptos más importantes de las estrategias internacionales de mitigación de riesgos.

Lo primero es tener claridad en las etapas de proyectos de túneles que son principalmente: planificación, exploración geotécnica, diseño y construcción, durante las cuales se deben distinguir y describir las variables que afectan al proyecto.

Finalmente se plantea una propuesta de Plan de Manejo de Riesgo para la construcción de túneles urbanos.

## **Dedicatoria**

*A mi abuela con cariño.*

## **Agradecimientos**

A mi abuela Sonia, que hoy no está aquí conmigo y que sé está orgullosa.

A mi familia, especialmente a mi mamá y a mi hermana por soportarme en estos largos años de estudio. Las amo, sin ustedes esto no sería lo mismo.

A mi Jaime, que me dio el último empujón necesario para salir de ésta.

A mis profesores Edgardo González, Alexandre Gomes y Roberto Gesche, que con sus conocimientos me guiaron en este proceso final con mucha paciencia, buena voluntad y optimismo.

A mis amigos, tanto los del colegio: Naty, Gonzalo, Seba, Huachi, Caro, Feña, Chino y Kzu, que me han acompañado desde pequeña y que con su buena onda me ayudaron a seguir, como los que gané en esta casa de estudios: Álvaro, Ariel, Javi y Mauro, que me vieron caer y pararme las veces que fuese necesario sin dejar de creer en mí.

A todos ustedes muchas gracias por vivir este proceso junto a mí.

Valeria.

# Tabla de Contenido

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.1.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	2
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	2
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>3</b>
2.1 ETAPAS DE UN PROYECTO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	3
2.1.1 <i>Planificación</i> .....	4
2.1.2 <i>Exploración Geotécnica</i> .....	4
2.1.3 <i>Diseño</i> .....	6
2.1.4 <i>Construcción</i> .....	8
2.1.5 <i>Operación</i> .....	8
2.2 RISK MANAGEMENT PLAN (RMP) – PLAN DE MANEJO DE RIESGO .....	9
2.2.1 <i>Manejo de Riesgo</i> .....	9
2.2.2 <i>Evaluación del Riesgo</i> .....	10
2.2.3 <i>Registro del Riesgo</i> .....	10
2.3 GUÍA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO EN TÚNELES .....	11
2.3.1 <i>Uso de la gestión de riesgos</i> .....	11
2.3.2 <i>Objetivos de la gestión de riesgos</i> .....	12
2.3.3 <i>Gestión de riesgo en las etapas tempranas del diseño</i> .....	12
2.3.4 <i>La gestión del riesgo durante la negociación de la licitación y del contrato.</i> ..	12
2.3.5 <i>Gestión de riesgos durante la construcción</i> .....	12
2.3.6 <i>Componentes típicos de la gestión de riesgos</i> .....	13
2.3.7 <i>Herramientas de la gestión de riesgos</i> .....	13
<b>3. ANTECEDENTES .....</b>	<b>14</b>
3.1 ETAPAS DE UN PROYECTO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS .....	14
3.1.1 <i>Planificación</i> .....	14
3.1.2 <i>Exploración Geotécnica</i> .....	15
3.1.3 <i>Diseño</i> .....	16
3.1.4 <i>Construcción</i> .....	17
3.1.5 <i>Operación</i> .....	26

<b>4. PLAN DE MANEJO DE RIESGO - RISK MANAGEMENT PLAN (RMP).....</b>	<b>27</b>
4.1 USO DE LA GESTIÓN DE RIESGOS .....	27
4.1.1 Fase 1: Diseño Temprano (viabilidad y diseño conceptual) .....	27
4.1.2 Fase 2: Licitaciones y negociación de contratos.....	28
4.1.3 Fase 3: Construcción .....	29
4.2 OBJETIVOS DE LA GESTIÓN DE RIESGOS .....	32
4.2.1 Alcance.....	32
4.2.2 Objetivos de riesgo .....	32
4.2.3 Estrategia de gestión de riesgos .....	33
4.3 GESTIÓN DE RIESGO EN LAS ETAPAS TEMPRANAS DEL DISEÑO .....	34
4.3.1 Establecer la política de riesgos .....	34
4.3.2 Criterios de aceptación del riesgo .....	34
4.3.3 Evaluación cualitativa del riesgo .....	35
4.3.4 Evaluación de Riesgos Específica.....	36
4.4 LA GESTIÓN DEL RIESGO DURANTE LA NEGOCIACIÓN DE LA LICITACIÓN Y DEL CONTRATO.....	37
4.4.1 La gestión del riesgo durante la preparación de los documentos de licitación	37
4.4.2 Gestión de riesgos durante la elección del contratista .....	39
4.4.3 Cláusulas de riesgo en el contrato .....	39
4.5 GESTIÓN DE RIESGOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN .....	40
4.5.1 Gestión de riesgos del contratista.....	40
4.5.2 Gestión de riesgos del mandante .....	41
4.6 COMPONENTES TÍPICOS DE LA GESTIÓN DE RIESGOS .....	43
4.6.1 Identificación del peligro .....	43
4.6.2 Clasificación .....	43
4.6.3 Clasificación y aceptación del riesgo.....	49
4.6.4 Evaluación cuantitativa del riesgo.....	50
4.7 HERRAMIENTAS DE LA GESTIÓN DE RIESGOS .....	52
4.7.1 Árbol de fallas.....	52
4.7.2 Árbol de eventos .....	53
4.7.3 Árbol de decisión .....	54
4.7.4 Multiriesgo.....	55
4.7.5 Simulaciones.....	55
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>57</b>

## Índice de Ilustraciones

FIGURA 1: ETAPAS DE UN PROYECTO DE OBRAS SUBTERRÁNEAS (OOSS) .....	3
FIGURA 2: DEFINICIÓN SISTEMAS DE FORTIFICACIÓN, SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO .....	6
FIGURA 3: TIPOS DE FALLA DEL FRENTE DEL TÚNEL .....	7
FIGURA 4: PROCESO SISTEMÁTICO DE MANEJO DE RIESGOS.....	10
FIGURA 5: USO DE LA GESTIÓN DE RIESGOS.....	11
FIGURA 6: COMPONENTES DE LA GESTIÓN DE RIESGOS.....	13
FIGURA 7: ESQUEMA "ETAPAS EJECUCIÓN PROYECTO DE OOSS" .....	14
FIGURA 8: ESQUEMA EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA .....	15
FIGURA 9: ESQUEMA MÉTODOS CONSTRUCTIVOS .....	17
FIGURA 10: PROYECCIÓN DE SHOTCRETE MEDIANTE BRAZO ROBOTIZADO .....	19
FIGURA 11: PUNTOS DE CONTROL (PC) EN TÚNEL ESTACIÓN EN CONSTRUCCIÓN L3 DEL METRO DE SANTIAGO.....	22
FIGURA 12: EJEMPLO SIDE DRIFT EN TÚNEL ESTACIÓN EN CONSTRUCCIÓN L3 DEL METRO DE SANTIAGO .....	23
FIGURA 13: ACOPIO DE MATERIAL .....	25
FIGURA 14: RETIRO DE MARINA PIQUE CONSTRUCCIÓN L3 DEL METRO DE SANTIAGO.....	26
FIGURA 15: USO DE LA GESTIÓN DE RIESGOS .....	31
FIGURA 16: RIESGOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN.....	40
FIGURA 17: CLASIFICACIÓN DE RIESGO .....	49
FIGURA 18: EJEMPLO ÁRBOL DE FALLAS.....	52
FIGURA 19: EJEMPLO ÁRBOL DE EVENTOS .....	53
FIGURA 20: EJEMPLO ÁRBOL DE DECISIÓN.....	54

## Índice de Tablas

TABLA 1: RIESGOS ESTRATÉGICOS .....	28
TABLA 2: GESTIÓN DE RIESGOS, FLUJO DE ACTIVIDADES PARA EL MANDANTE Y EL CONTRATISTA .....	30
TABLA 3: FRECUENCIA DE OCURRENCIA (PERIODO DE CONSTRUCCIÓN).....	45
TABLA 4: LESIONES DE LOS TRABAJADORES Y DEL EQUIPO DE EMERGENCIA .....	45
TABLA 5: DAÑOS A TERCEROS.....	46
TABLA 6: DAÑOS O PÉRDIDAS ECONÓMICAS QUE AFECTAN A TERCEROS .....	46
TABLA 7: DAÑOS AL MEDIOAMBIENTE .....	47
TABLA 8: RETRASOS.....	47
TABLA 9: PÉRDIDAS ECONÓMICAS DEL MANDANTE.....	48
TABLA 10: MATRIZ DE RIESGO .....	50



# 1. Introducción

La construcción de túneles ha evolucionado a lo largo de la historia, desde la excavación manual de cavernas en la antigüedad, hasta a la época actual, donde en las faenas mineras y en las grandes ciudades del mundo se construyen túneles utilizando maquinarias de excavación convencional y maquinarias tuneladoras automatizadas.

De la misma forma, a lo largo de las últimas décadas, los procesos de gestión del riesgo también han evolucionado, ganando un merecido reconocimiento como herramientas efectivas en la reducción de accidentes y en otros tipos de imprevistos indeseables en los proyectos.

Dado que el principal factor constructivo en la ejecución de los túneles es el propio terreno, sea este suelo o roca, existe un inherente nivel de incertidumbre asociado a la disposición, composición y parámetros de éstos, lo que conlleva un grado de riesgo que debe ser debidamente considerado no sólo en términos de las posibles variaciones en los costos y plazos de construcción, sino que además, debe ser considerado de modo de evitar accidentes y/o impactos negativos de toda índole, ya sea dentro o fuera de la obra,

En la actualidad, no se pueden correr riesgos al proyectar un túnel urbano que puede afectar directamente a las estructuras circundantes y es por esto que se deben reconocer los riesgos que influirán en los proyectos, clasificarlos y establecer las medidas necesarias para llevarlos a niveles aceptables.

Existen diversos aspectos que deben ser tomados en cuenta al minuto de planificar un proyecto de túneles urbanos que son los que abordaremos en esta memoria y en base a estos problemas recurrentes se busca tener un Plan de Manejo de Riesgo (RMP<sup>1</sup>, por su sigla en inglés) con el fin de agilizar el proceso de gestión de riesgos.

Todo proyecto de túneles trabaja con un modelo geotécnico/geológico del terreno, el que busca estimar de la mejor forma las condiciones y comportamiento del terreno a excavar. Asimismo, este modelo siempre es de carácter estimativo, razón por la cual la construcción de túneles se debe basar siempre en un método observacional, apoyado en la continua caracterización del terreno excavado y la interpretación de los resultados de la instrumentación y el monitoreo geotécnico.

Es por esta razón que resulta interesante analizar las principales variables de riesgo que afectan las obras de túneles urbanos.

---

<sup>1</sup> RMP: Risk Management Plan

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos Generales**

Desarrollar un RMP para la construcción de túneles urbanos, particularmente para las condiciones encontradas en la ciudad de Santiago.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Diagnosticar los principales factores de riesgo frente a la construcción de túneles urbanos.
- Generar estrategias para el manejo del riesgo asociado a la construcción de túneles urbanos.

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1 Etapas de un proyecto de obras subterráneas

A continuación, en la Figura 1, se presentan las etapas de un proyecto de obras subterráneas:



Fuente: Gomes A.R.A. (2013)

**Figura 1: Etapas de un proyecto de obras subterráneas (OOSS)**

De la figura podemos observar claramente que en las etapas de ingeniería lo que prima son los riesgos económicos y en las etapas constructivas los riesgos asociados a las personas. A continuación se explican las etapas necesarias para concretar el proyecto.

### **2.1.1 Planificación**

La planificación es una etapa previa a la ejecución, donde se concibe el proyecto a desarrollar en las diversas etapas de ingeniería.

Está ligada directamente al diseño dado que este va a dar la pauta de lo que se va a ejecutar y los tiempos que esto implicará. El proceso de planificación es de suma importancia para el proyecto, pues se estiman los costos y plazos del proyecto.

Para la gestión de riesgos la etapa de planificación no presenta desafíos debido a que se desarrolla principalmente en oficina y alejado del terreno que es donde se presentan los principales peligros.

### **2.1.2 Exploración Geotécnica**

Durante esta etapa se realiza la recopilación de antecedentes de obras previas similares y el desarrollo de exploraciones que permiten obtener información del suelo en el que se realizará el proyecto. Cabe destacar que las exploraciones, por su propia naturaleza, cubren apenas un pequeño espectro del volumen total de terreno donde se emplazará una obra, de modo que es necesario extrapolar información a partir de éstas.

#### ***Sondajes y Calicatas***

Los sondajes son de gran utilidad para determinar cómo es el terreno a excavar. Existen diversos tipos de exploraciones que se pueden realizar en el suelo, entre los cuales destacan los sondajes, calicatas y ensayos geofísicos. En los sondajes y calicatas es posible efectuar ensayos in situ, y obtener muestras que pueden posteriormente ser llevadas para la realización de ensayos de laboratorio. Con estos ensayos se pueden determinar ciertos parámetros físicos del suelo, además del retiro de muestras alteradas o inalteradas, las cuales son utilizadas para realizar descripciones visuales del suelo, y determinación de parámetros geotécnicos.

Las calicatas por su parte, sirven tanto para inspeccionar, como para tomar muestras en estado inalterado<sup>2</sup> del suelo.

Estas exploraciones permiten realizar estratigrafías del suelo sobre el cual se excavará el túnel, y es una herramienta fundamental al momento de elegir por dónde trazar un túnel en la zona escogida y cómo diseñar los sostenimientos ante los distintos estratos que se pueden atravesar al ir excavando el terreno.

Cabe destacar que en el caso de la planificación del trazado de las líneas de Metro de Santiago, un factor fundamental es la utilidad de la ubicación de una estación para los pasajeros, por lo que el trazado no necesariamente está 100% determinado por las condiciones geotécnicas del lugar.

---

<sup>2</sup>Es evidente que la condición del suelo variará con respecto al terreno in situ, pues la toma de muestras en sí altera las condiciones naturales, pero es lo más cercano a la condición natural.

## ***Ensayos***

Para los suelos se pueden realizar ensayos de distinto tipo, entre los cuales destacan:

- Triaxiales, determinar los parámetros  $c$ ,  $\Phi$  del suelo
- Triaxiales cíclicos, ver la resistencia del suelo ante un sismo
- Compresión no confinada, determinar la resistencia de una arcilla no drenada
- Corte directo, determinar los parámetros  $c$ ,  $\Phi$  del suelo
- Granulometría
- Índices de plasticidad (para suelos finos).
- Consolidación, determinar los parámetros  $C_c$  y  $C_v$  correspondientes a la consolidación del suelo
- Densidad relativa e in situ, determinar las condiciones naturales del suelo y los posibles valores de densidad

## ***Estratigrafía***

Aquí es importante estimar de la mejor manera la composición y la disposición de los diversos estratos de suelo identificados.

Aunque en el caso de la cuenca de Santiago ésta está constituida mayormente de depositaciones uniformes de gravas arenosas asociadas a las depositaciones del Maipo y Mapocho, existen también zonas con suelos finos (limos y arcillas), así como depositaciones piroclásticas (la denominada “Pumicita”). Algunos sectores de Santiago presentan contacto entre las unidades gravosas y los suelos finos, generando intercalaciones variables en disposición y espesor que pueden impactar el rendimiento de excavación de los túneles.

## ***Singularidades***

Encontrarse con elementos tales como tuberías, fundaciones, fósiles, o cualquier otro objeto inesperado que proviene de obras en la superficie y que no se mencionan en los planos de diseño provoca una falta de información, pues no se puede determinar si son estructuras que aún cumplen una funcionalidad o son remanentes de estructuras antiguas.

## ***Agua***

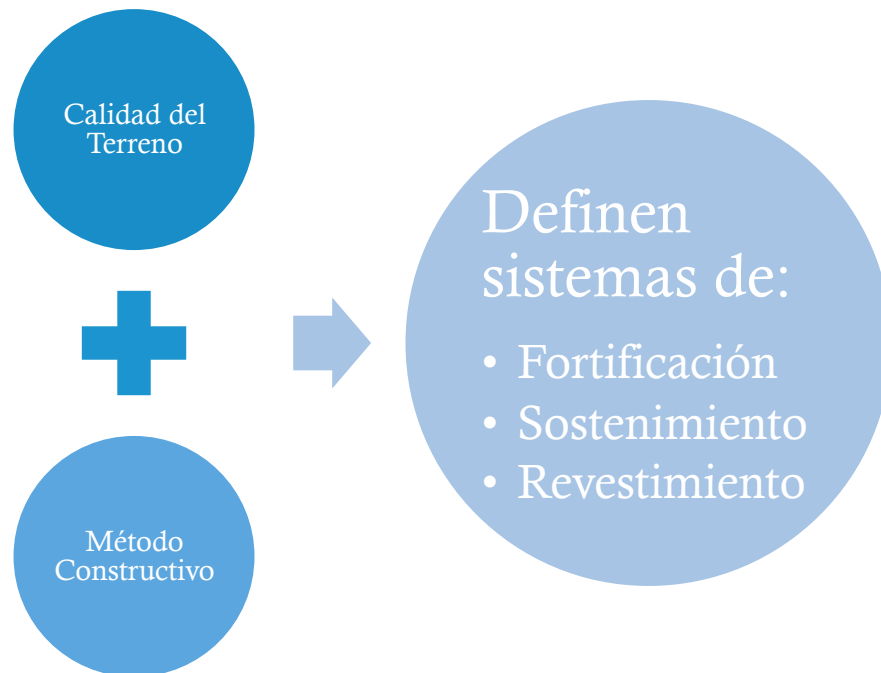
El agua juega un factor fundamental al excavar túneles. Es importante identificar posibles napas en el terreno y/o filtraciones cercanas, principalmente de tuberías.

En el caso de Santiago, el nivel freático se encuentra generalmente por debajo del nivel de excavación de los túneles, lo que es favorable, aunque en algunos sectores existen napas colgadas e infiltraciones o provenientes de aguas lluvias o de matrices de servicios húmedos dañadas.

### 2.1.3 Diseño

Luego de la etapa de exploraciones corresponde desarrollar la etapa de diseño del túnel, lo cual significa las siguientes acciones:

- Definir la **sección transversal** del túnel, en función de las necesidades de **operación**.
- Determinar el **método constructivo** en función de la **calidad del terreno** encontrado.
- Definir los sistemas de **fortificación, sostenimiento y revestimiento** del túnel en función de la **calidad del terreno y del método constructivo**.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2: Definición sistemas de fortificación, sostenimiento y revestimiento**

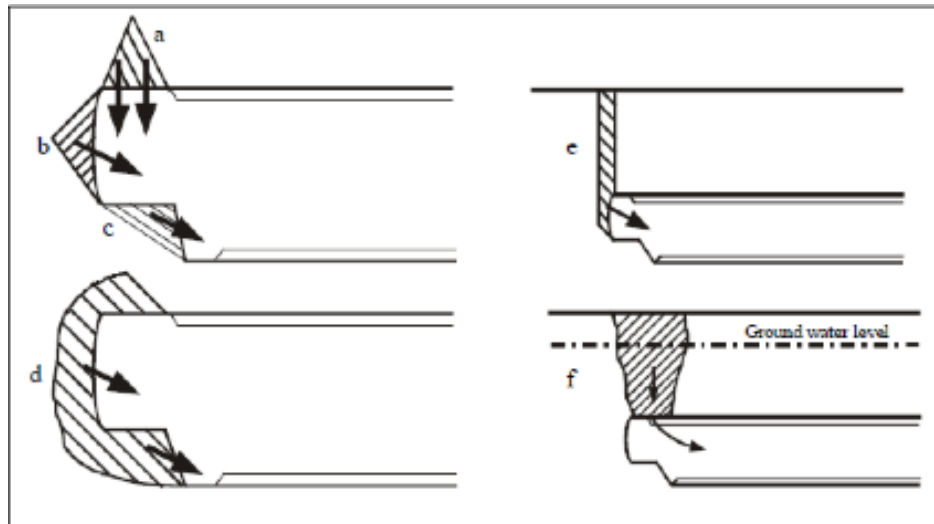
Para tener claridad de lo que esta etapa requiere se necesita conocer ciertos conceptos:

- Fortificación: Elemento de soporte usado para mejorar las propiedades del terreno.
- Sostenimiento: Soporte primario, instalado en secuencia con la excavación del terreno.
- Revestimiento: Revestimiento final, instalado para absorber las cargas estructurales y de servicio de largo plazo.

Una vez aclarados estos conceptos se debe entender el ciclo de excavación y soporte, a grandes rasgos, consiste en excavar la sección del túnel y a medida que se avanza sostener y/o reforzar el terreno con el fin de no permitir que el suelo ceda.

## Métodos Constructivos

La definición de la secuencia de excavación y soporte para la construcción de túneles desarrollados en suelos, particularmente a baja profundidad, como es el caso de la mayoría de túneles urbanos, queda condicionada por la evaluación de la estabilidad del frente de avance y el factor de seguridad frente al colapso local o global principalmente, así como el nivel aceptable de afectación permitido, causado por los movimientos del terreno generados por la excavación.



a) Corona, b) Frente local, c) Banco, d) Frente global, e) Frente local y f) Flujo de agua

Fuente: Gacitúa (2012)

### Figura 3: Tipos de falla del frente del túnel

Mediante el cálculo de estabilidad del frente se determina el tamaño de la sección y la longitud de excavación de cada avance. En terrenos de buena calidad, los avances pueden alcanzar 1,5 [m] o 2 [m]., mientras que en terrenos de mala calidad los avances pueden ser menores a 1 [m].

Normalmente en terrenos de baja cohesión, y dependiendo del tamaño de la excavación, se puede recurrir a la subdivisión de la frente que se puede materializar con galerías de avance (Side Drift) y/o en excavación en bóveda, banco y contrabóveda.

Durante la ejecución del túnel se realiza un monitoreo de la superficie sobre el túnel y de las estructuras circundantes con el fin de detectar asentamientos fuera de lo esperado. Por otro lado se miden las deformaciones en la cáscara del túnel para observar si el comportamiento de la interacción suelo-estructura se comporta de acuerdo a lo esperado.

Para el análisis de riesgo es fundamental el proceso de monitoreo dado que éste puede accionar las alarmas de peligro del proyecto en el caso que los asentamientos superficiales y/o deformaciones interiores se encuentren fuera de los márgenes de seguridad.

#### **2.1.4 Construcción**

Ejecución de lo planificado y diseñado. Es en este momento donde se pone a prueba la gestión de riesgos, pues es durante este proceso que el equipo enfrenta los peligros en el día a día del proyecto.

Lo ideal es seguir el RMP, pero evidentemente en terreno hay ciertos peligros que no se pueden anticipar y es a partir de estos casos de los que se debe aprender y mejorar el RMP por si la eventualidad vuelve a ocurrir y a futuro se tiene una nueva experiencia.

#### ***Métodos Constructivos***

Existe especial interés en los métodos constructivos a utilizar, pues cada uno de estos tiene riesgos asociados, en el caso de Santiago se utiliza típicamente el método de excavación convencional, según los principios del New Austrian Tunneling Method (NATM) para suelos.

#### **2.1.5 Operación**

Este aspecto se relaciona con el periodo de operación definitivo del túnel a lo largo de su vida útil, cuando se espera que este responda positivamente a lo requerido dado que fue diseñado para esto.

Cada una de estas etapas presenta ciertos factores de riesgo que se esperan controlar o mitigar con el RMP.

Para saber en qué consiste un plan de manejo de riesgos nos basaremos en lo planteado por: The Association of British Insurers & The British Tunnelling Society (2003) y The International Tunnelling Insurance Group (2012).



## **2.2 Risk Management Plan (RMP) – Plan de Manejo de Riesgo**

El objetivo de un plan de manejo de riesgos es promover y asegurar una buena práctica para la minimización y manejo de los riesgos asociados al diseño y construcción de túneles, urbanos en este caso.

Para nuestros propósitos se define **Peligro** como un evento que tiene potencial de impacto negativo en las variables asociadas al proyecto que podrían producir consecuencias no deseadas asociadas a la salud y la seguridad de los trabajadores, medioambiente, diseño, programación, costos, construcción y terceros (aquellos que pueden ser afectados por el alcance del proyecto).

Por su parte, **Riesgo** se define como la combinación de las consecuencias de un **Peligro** y su probabilidad de ocurrencia.

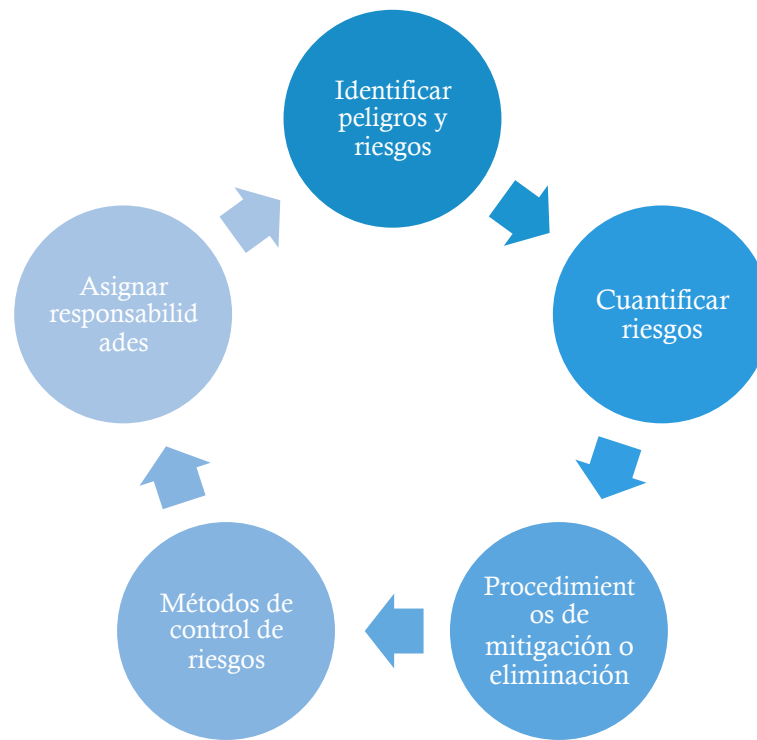
En términos coloquiales, los Peligros se identifican y los Riesgos se gestionan.

La reducción de los riesgos se logra a través de un apropiado diseño y procedimientos de construcción mejorados.

### **2.2.1 Manejo de Riesgo**

Se debe tener en cuenta que el manejo de riesgos es un proceso sistemático, que incluye:

1. Identificación de peligros y riesgos asociados, a través de la valoración del riesgo.
2. Cuantificar riesgos.
3. Identificar procedimientos para mitigar o en el mejor de los casos eliminar los riesgos.
4. Identificar los métodos a utilizar para el control de riesgos.
5. Asignar responsabilidades a las partes



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4: Proceso sistemático de manejo de riesgos**

### **2.2.2 Evaluación del Riesgo**

La evaluación del riesgo es la formalización del proceso de identificación de peligros, evaluación de sus consecuencias y probabilidad de ocurrencia de estos.

La evaluación del riesgo requiere que se recolecte la información en un registro en cada etapa del proyecto.

### **2.2.3 Registro del Riesgo**

La preparación del registro del riesgo requiere identificar y clarificar de quien depende el riesgo debe ser detallado clara y concisamente como el riesgo será:

- Ubicado
- Controlado
- Manejado
- Mitigado

Los registros son actualizados constantemente a medida que se avanza en el proyecto.

Para llegar a este plan de manejo de riesgos es necesario seguir ciertas guías teóricas acerca de la construcción de este plan. Para esto basaremos esta experiencia en lo que indica Eskesen et al. (2004).

## 2.3 Guía para la gestión del riesgo en túneles

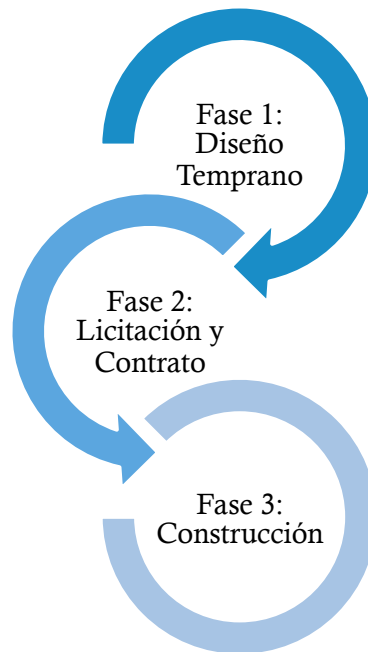
La naturaleza de los proyectos de túneles implica que cualquier mandante se enfrentará a riesgos considerables en el desarrollo de un proyecto de este tipo.

Debido a las incertidumbres inherentes, pueden existir retrasos y sobrecostos significativos. Sin embargo esto no es el foco de interés del presente trabajo. Lo que realmente preocupa aquí, es el potencial de accidentes a gran escala durante el trabajo de construcción de túneles. Además, para los túneles en las zonas urbanas hay un riesgo de daño a terceras personas y a sus bienes que también es de suma importancia.

Tradicionalmente, los riesgos se han gestionado indirectamente a través de las decisiones de ingeniería tomadas durante el desarrollo del proyecto. Esta guía [Eskesen et al. (2004)] considera que los procesos actuales de gestión de riesgos se pueden mejorar significativamente mediante el uso sistemático de las técnicas de gestión de riesgos en todo el desarrollo del proyecto del túnel.

### 2.3.1 Uso de la gestión de riesgos

En esta sección se presenta cómo la gestión del riesgo puede ser utilizada durante todo el proyecto, desde la fase de planificación temprana hasta el inicio de la operación:



Fuente: Adaptación de Eskesen et al. (2004)

**Figura 5: Uso de la gestión de riesgos**

### **2.3.2 Objetivos de la gestión de riesgos**

La política de riesgos debería contener:

- Alcance
- Objetivos de riesgo
- Estrategia de gestión de riesgos

### **2.3.3 Gestión de riesgo en las etapas tempranas del diseño**

La gestión de riesgos se inicia tan pronto como sea posible, preferiblemente durante la viabilidad del proyecto y las primeras etapas de planificación.

Es importante tener en cuenta que el éxito y los beneficios de la implementación efectiva de la gestión del riesgo dependen de la calidad de la identificación de las acciones de mitigación, en la participación activa, la experiencia y la opinión general de los participantes (mandante, diseñadores y contratistas).

### **2.3.4 La gestión del riesgo durante la negociación de la licitación y del contrato.**

Hay tres puntos importantes a considerar en este proceso:

- Gestión del riesgo durante la preparación de los documentos de licitación
- Gestión del riesgo durante la elección del contratista
- Cláusulas de riesgo en el contrato

### **2.3.5 Gestión de riesgos durante la construcción**

En la etapa de construcción, la estrategia más ventajosa tanto para el mandante como para el contratista es reducir la severidad de los riesgos tanto como sea posible a través de la planificación e implementación de la eliminación del riesgo y/o la mitigación de este.

### 2.3.6 Componentes típicos de la gestión de riesgos

Para poder entender de mejor manera cómo manejar un riesgo es necesario comprenderlo y para esto es necesario:



Fuente: Adaptación de Eskesen et al. (2004)

**Figura 6: Componentes de la gestión de riesgos**

### 2.3.7 Herramientas de la gestión de riesgos

La mayoría de las herramientas se han desarrollado para aplicaciones fuera de la industria subterránea. Sin embargo, se pueden utilizar para la construcción subterránea sin mayor ajuste.

- Árbol de fallas
- Árbol de eventos
- Árbol de decisión
- Multiriesgo
- Simulaciones

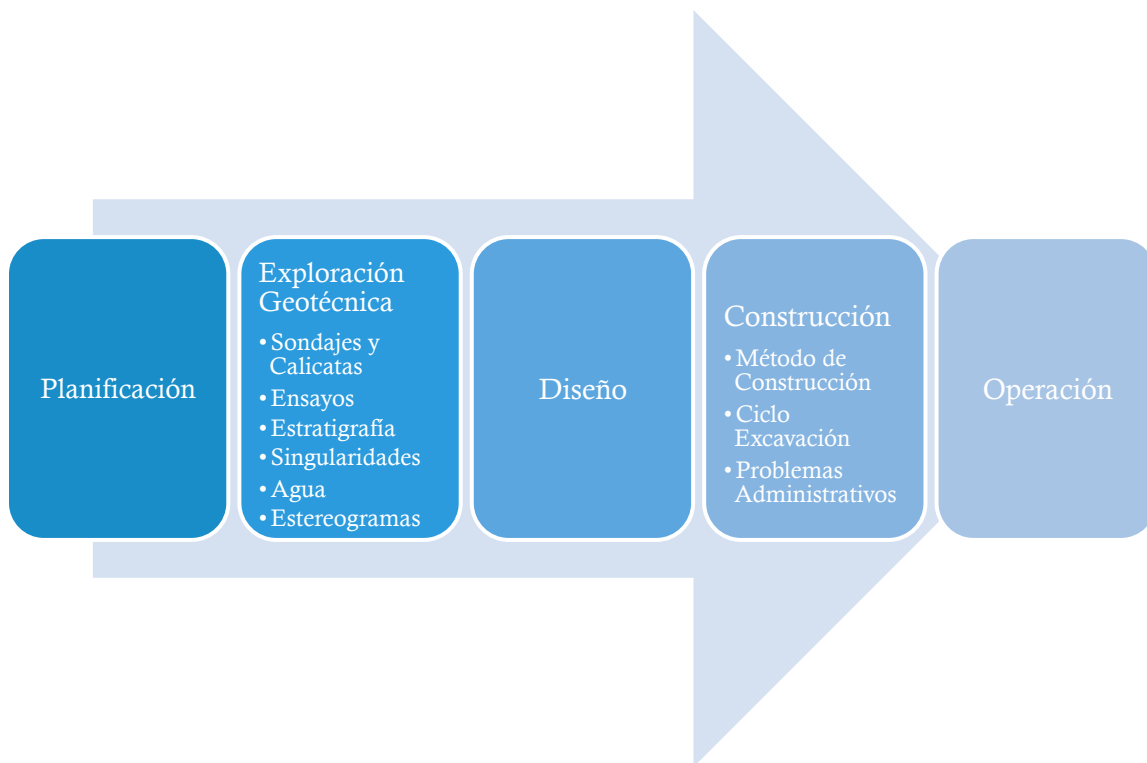
### 3. Antecedentes

#### 3.1 Etapas de un proyecto de obras subterráneas

Durante el desarrollo de un proyecto tunelero siempre existe la posibilidad de ocurrencia de accidentes, e incluso muertes, por las características propias de estas obras. De allí que las medidas de seguridad y los protocolos que se solicitan en faena intentan prevenir estos sucesos.

Se recoge del trabajo realizado por Gacitúa (2012) donde considera las incertezas a las que se enfrenta Metro de Santiago durante la construcción de túneles, se toman estas incertezas y se llevan a riesgos físicos que afectan directamente a las personas.

Es evidente que a menor información existe mayor riesgo, por lo que al evolucionar el proyecto aumentando la información disponible, van disminuyendo los riesgos de éste.



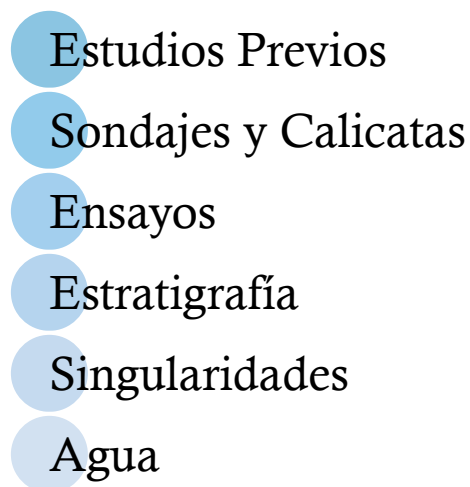
Fuente: Elaboración propia

**Figura 7: Esquema "Etapas ejecución proyecto de OOS"**

##### 3.1.1 Planificación

La planificación en sí no presenta ningún tipo de riesgo para las personas, de hecho su deficiente aplicación es lo que produce problemas.

### 3.1.2 Exploración Geotécnica



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8: Esquema Exploración Geotécnica**

#### ***Estudios Previos***

Siempre es bueno tener información disponible de los suelos para la proyección del túnel, pues de acuerdo a lo existente se puede proyectar el plan de prospecciones geotécnicas a ejecutar para cada proyecto.

#### ***Sondajes y Calicatas***

El principal riesgo se da para el caso de la calicatas, ya que corresponden a un pozo de lado o diámetro 1[m] y profundidad aproximada de entre 5 a 25 [m], lo que puede provocar caídas de altura con graves daños a terceros que circulan por el sector, así como para el mismo personal.

#### ***Ensayos***

Aquí la principal la duda es, si el ensayo fue realizado sin cometer faltas durante la preparación de la muestra y su posterior ejecución, y si la muestra de suelo utilizada para esto es representativa del suelo natural a excavar esto conducirá a una mala clasificación que podría incluso provocar accidentes fatales.

#### ***Estratigrafía***

Si el perfil geológico que se estableció en base a las exploraciones es omiso en algún riesgo o incertidumbre importante, se eleva el riesgo de que ocurran algún tipo de accidente debido a la condición inesperada del suelo, lo que puede generar pérdidas económicas, paralización de la obra con el fin de asegurar la estabilidad del frente de excavación y de no exponer a los trabajadores a posibles accidentes.

En el caso que se encuentre con un suelo de peor calidad al proyectado, esto puede ser por una mala estimación de la capacidad de soporte, napa de agua a un nivel inesperado, ángulo de fricción menor al definido, entre otras, será necesario aumentar el sostenimiento de manera inmediata con el fin de prevenir accidentes por derrumbes. Si el túnel se realiza a baja profundidad, que es el caso de túneles urbanos, hay un mayor riesgo de caída de planchones o descrostamientos.

Al encontrarse con una falla no proyectada, puede que se produzcan más sobre excavaciones, lo que debilita el terreno provocando desprendimientos de tierra.

### ***Singularidades***

El problema principal es afectar a terceros, por ejemplo, al pasar a llevar una cañería que va a otras propiedades provocando problemas con el agua.

Otra situación problemática es encontrar material arqueológico, como fósiles, pues esto afecta directamente el patrimonio cultural de la ciudad y se debe retrasar la obra con el fin de conocer el origen del material y el modo de actuar frente a esta situación.

### ***Agua***

Debido a los múltiples problemas que puede crear el agua durante el proceso constructivo, es necesario tener una estimación bastante precisa sobre la ubicación y variación en el tiempo de la napa de agua y tener conocimiento sobre los flujos de agua que se tendrán en el túnel. Tener conocimiento de la red de agua potable y alcantarillado de la zona en la que se construye es de suma utilidad.

En general, los problemas asociados al agua en Metro Santiago son de carácter operacional, durante la construcción, con la formación de lodo dentro del túnel, y para su operación, debido a las condiciones de infiltración en el interior de estaciones, pasos peatonales o recintos eléctricos.

#### **3.1.3 Diseño**

Dado que el diseño se realiza principalmente en las oficinas de ingeniería con poco contacto con el terreno, los niveles de peligro son bastante bajos. Como se dijo anteriormente el peligro está en terreno es por esto que las visitas de inspección son las potencialmente peligrosas, se pueden observar:

- Caídas de altura, por ejemplo, el caso de que las calicatas no hayan sido cubiertas.
- Caídas a nivel, producto de materiales de desecho que se encuentren en el lugar o por una mala ubicación de materiales a utilizar.

También se tiene el modelo numérico a utilizar y la confiabilidad de este, o la elección apropiada para la situación presente en la obra. El riesgo principal está asociado a cuan cercano a la realidad es el modelo seleccionado, y no tanto al manejo del mismo.



Otro problema que podría surgir es de un cálculo deficiente del factor de seguridad (FS), ya que se sobreestima la estabilidad del frente .

### 3.1.4 Construcción

En este caso los riesgos se asocian al método constructivo y a la secuencia de excavación utilizados en la ejecución del proyecto.

#### ***Método Constructivo***

Los colapsos del frente pueden ser de gran tamaño y volumen, produciendo mucho daño, tanto a la construcción misma como a los trabajadores, ya sea al interior del túnel o en superficie.

Es claro ver que para los distintos métodos de construcción se tienen niveles de riesgo diferentes. En el caso de los túneles urbanos en Santiago el método a ejecutar es el New Austrian Tunneling Method (NATM)

Al considerar el suelo como material de construcción, el peligro está en confiar en la capacidad de soporte del suelo o estimarla de manera errónea, obteniendo desprendimientos del suelo con alta probabilidad de accidentes.

Es por lo anterior que la ventaja del Método Observacional (NATM + Monitoreo Geotécnico) es el constante monitoreo de la estructura y lo que la rodea. En este caso se aplica el monitoreo para tener un control regular de que es lo que sucede con la estructura.

Hay ciertos parámetros a considerar que afectarán directamente la ejecución del túnel:



Fuente: Elaboración propia

**Figura 9: Esquema Métodos Constructivos**

## **Aguas Subterráneas**

Un problema inherente al método de construcción es la presencia de aguas infiltradas en la frente del túnel, sea por el nivel de la napa o por la presencia cañerías con filtraciones. Si bien la presencia de aguas infiltradas no constituye un riesgo directo para los trabajadores, si lo es en la medida que la maquinaria de construcción no pueda transitar debidamente y quede expuesta a volcamientos en el barro.

Cuando el túnel se excava en suelo, el agua puede ser condicionante para la estabilidad estructural del túnel. Si se estima de mala manera la cantidad de agua que se infiltrará por las paredes de los túneles generará zonas inundadas poniendo en peligro la integridad de los trabajadores.

Cuando se excava en material granular (i.e. grava de Santiago), gracias a la alta permeabilidad de éste, permite una descarga rápida de agua dentro del túnel. El problema asociado es un gradiente hidráulico excesivo produciendo una erosión del contorno del túnel, debilitándolo y generando sobre excavaciones, lo que puede llevar a un colapso provocando serios accidentes.

## Shotcrete

La proyección del shotcrete presenta un peligro directo para la persona que ejecuta la aplicación (pitonero), quien se expone a caídas de material, ya sea del terreno o planchones de shotcrete mismo.

Cabe destacar sí, que los últimos años, se ha hecho mucho más recurrente el uso de un brazo robotizado para la aplicación del shotcrete. Esta aplicación protege al trabajador, traspasando el riesgo al brazo robotizado.



Fuente: Imagen propia

**Figura 10: Proyección de Shotcrete mediante brazo robotizado**

Se debe considerar además que el shotcrete se coloca por vía seca o húmeda, la vía húmeda es mucho más segura dado que la relación agua/cemento (A/C) no se maneja en terreno, se

dosifica en la planta de hormigón, lo que asegura la resistencia constante de éste, es decir, la vía seca presenta mayor riesgo dado que el pitonero puede manejar la cantidad de agua proyectada, con posibles disminuciones de la resistencia del sostenimiento lo que provoca potenciales desprendimientos.

También asociado al shotcrete está el problema de las sombras, volúmenes vacíos detrás de la armadura dado que el hormigón proyectado no alcanza la parte trasera de ésta, que puede desembocar en problemas de deformaciones en superficie.

### **Sello**

Un factor que afecta la estabilidad del frente y del suelo sin sostenimiento es la pérdida de cohesión del suelo. En algunas ocasiones la cohesión del suelo puede estar incrementada por la humedad natural (suelos finos). Si esta humedad se pierde se produce una pérdida de cohesión aparente y por lo tanto de estabilidad.

Esta situación se produce con la exposición del frente durante las paradas prolongadas de construcción. En estos casos es importante colocar un sello y un sostenimiento armado sobre el frente para evitar accidentes.

### **Marcos Reticulados**

Una garantía de seguridad para los trabajadores es la colocación de marcos reticulados como elementos de soporte temporal con el fin de servir como guía para la excavación; colocación de mallas, barras de refuerzo y shotcrete.

Es de especial importancia el apuntalamiento de los marcos contra el terreno debido a que es en esta faena donde se define si el marco va a soportar o no la carga para la que está diseñado, pues una mala ejecución podría distribuir las cargas de mala manera provocando inestabilidad.

### **Soporte**

Siguiendo los principios del NATM es importante en los suelos reducir al máximo los movimientos para evitar el deterioro del mismo, por este motivo la colocación del sostenimiento debe ser una labor de rápida ejecución, en particular cuando incluye el cierre de la contra bóveda del túnel.

Una confirmación de esta afirmación la entrega Karakus & Fowell (2004) donde demuestra que el cierre del sostenimiento en las primeras horas es de vital importancia para reducir las deformaciones futuras, en el caso de suelos blandos.

Sumado a esto existe siempre la posibilidad de ocurrencia de nidos de gravas con baja cohesión que generen sobre excavaciones, pudiendo generar una falla local.

## **Deformaciones Superficiales**

Al trabajar con el método NATM es necesario monitorear tanto el terreno como las deformaciones de la sección interior del túnel para detectar cualquier anomalía durante su construcción y garantizar su estabilidad.

Los puntos de control colocados en la superficie o enterrados sirven para medir deformaciones verticales y sub-verticales del terreno. Estas deformaciones son indicadores clave sobre la estabilidad del túnel y de cómo se va deformando el terreno cercano a éste. También sirve como indicador para ver si hay deformaciones en estructuras cercanas a la zona de excavación.

Las deformaciones del terreno dependen de los parámetros del suelo y el método constructivo. En general las deformaciones se deben restringir para conseguir el máximo de su resistencia y colaboración. Pero adicionalmente se deben considerar las estructuras de superficie afectadas por estas deformaciones o asentamientos. En general las estructuras sufren más por asentamientos diferenciales que por asentamientos uniformes.

Mair et al. (1996), en base a obras del Metro en Londres, concluyen que las edificaciones con asentamientos absolutos inferiores a 10 [mm] y distorsiones angulares ( $\beta$ ) menores a 1/500 presentan daños despreciables.

Por otra parte, Boscardin & Cording (1989) entregan como criterio de referencia, para obtener daños menores en edificios, limitar la distorsión angular ( $\beta$ ) a 1/500 y la deformación horizontal admisible a no más de un 1/1000.

Cuando se tienen deformaciones que sobrepasan los límites indicados por el diseño se hace necesario definir un protocolo de alternativas, que pueden incluir modificaciones en el método de construcción, aumento de espesor del revestimiento, paralización temporal de la obra, en fin, cualquier medida que permita afectar mínimamente a terceros.

Otro problema asociado al monitoreo es cuando los puntos de control colocados en la superficie sufren daños o movimientos inesperados que afectan o inutilizan las mediciones. Al quedar inutilizado un punto de nivel, se pierde la posibilidad de medir deformaciones y controlar éstas a tiempo, aumentando así el riesgo de no detectar asentamientos.

En cualquier caso, una adecuada lectura e interpretación de los valores de las deformaciones permiten detectar anomalías ajenas al terreno. De este modo, es más riesgosa la falta de constancia en las lecturas de las deformaciones que el daño de algún dispositivo, los que típicamente logran ser detectados por la inconsistencia entre la medidas previa y posterior al daño.

## Deformaciones Internas

El monitoreo dentro del túnel es menos preciso que el monitoreo de superficie, ya que los dispositivos de medición sólo pueden instalarse cuando el sostenimiento del túnel ya ha sido construido y por tanto, no logran captar toda la historia de la excavación y junto a ello, la cantidad de triangulaciones que se deben hacer desde el punto de referencia a cada dispositivo de medición es alta.

En la figura siguiente se muestran los Puntos de Control (PC) de un Side Drift de un Túnel Estación en construcción de la Línea 3 del Metro de Santiago.



Fuente: Imagen propia

**Figura 11: Puntos de Control (PC) en Túnel Estación en construcción L3 del Metro de Santiago**

### ***Secciones y Secuencias de Excavación***

Los métodos constructivos ofrecen distintas variantes de secciones y secuencias de excavación.

En general se consideran las siguientes secuencias de excavación, típicamente combinadas en túneles estación:

- A. Excavación con frente completo o Subdivisión del frente en galerías (Side Drift)
- B. Excavación en Bóveda, Banco y Contrabóveda.

Trabajar por etapas es una manera de prevenir los riesgos, pues debido a la falta de capacidad de soporte del suelo, baja resistencia y posibles deformaciones, se opta por excavar gradualmente con el fin de mantener la estabilidad y no poner en riesgo a los involucrados.



Fuente: Imagen propia

**Figura 12: Ejemplo Side Drift en Túnel Estación en construcción L3 del Metro de Santiago**

## ***Problemas Administrativos***

### **Acceso a la obra**

Lo primero a considerar es que la construcción del Metro de Santiago debe ejecutarse en la ciudad y por lo general las estaciones se ubican en puntos de especial interés para el público por lo que acceder a la obra tiene varias dificultades:

- ✓ Alto flujo de personas ajenas a la obra
- ✓ Congestión vehicular en hora punta
- ✓ Mismo acceso para vehículos y personas
- ✓ Limitaciones de ruido lo que implica limitaciones del horario de trabajo.

### **Materiales**

La obra considera un abastecimiento constante de materiales, el problema de trabajar en la ciudad es que:

- ✓ Espacio reducido para almacenaje
- ✓ Espacio reducido para maniobras



Es importante para la obra tener acopio de materiales constante, para así mantener el ritmo de trabajo estimado, pero tener los materiales necesarios disponibles en la obra en un espacio reducido implica tener materiales acumulados en vías de escape o zonas de seguridad lo que provoca alto riesgo de accidentes.



Fuente: Imagen propia

**Figura 13: Acopio de material**

### **Mantenición**

Tener los equipos sin la mantención necesaria pone en peligro directo al operador, pues algo puede fallar en cualquier momento, el peor de los casos es que existan fallas mientras el equipo esté en operación.

### **Subcontratación**

En las excavaciones subterráneas es común tener subcontratos, sin embargo estos generan un traspaso de responsabilidades muchas veces poco claro, por lo que al momento de ocurrir los accidentes no se tiene un responsable definido y con un plan de acción eficiente.

### **Retiro de marina**

El retiro de marina en los túneles urbanos se ha vuelto un problema singular, debido a que normalmente no se cuenta con una flota de camiones ni rampas de acceso para generar un retiro continuo. Normalmente se emplean grúas y un transporte vertical con capacidad limitada en los piques de acceso. Además, es posible que el pique esté situado en medio de la ciudad y el retiro de marina no se puede efectuar de noche por el ruido que genera.



Fuente: Imagen propia

**Figura 14: Retiro de marina Pique construcción L3 del Metro de Santiago**

Al no poder extraer toda la marina, esta se acumula en el túnel o en los piques, dificultando el movimiento al interior. Debido a esto, se puede llegar a producir algún accidente por falta de espacio, es lo mismo que sucede con la acumulación de materiales.

### **3.1.5 Operación**

Los problemas de operación que se tienen no son parte de lo estudiado en este trabajo, sólo se necesita saber cómo operará el túnel para definir ciertos parámetros de diseño, por ejemplo, la carga de personas.

## **4. Plan de Manejo de Riesgo - Risk Management Plan (RMP)**

### **4.1 Uso de la gestión de riesgos**

Se muestra cómo la gestión del riesgo puede ser utilizado durante todo el proyecto, desde la fase de planificación temprana hasta el inicio de la operación:

- Fase 1: Diseño
- Fase 2: Licitaciones y negociaciones de contrato
- Fase 3: Construcción

#### **4.1.1 Fase 1: Diseño**

Establecer políticas de riesgo y llevar a cabo la evaluación de riesgos está a cargo del mandante y requiere:

- ***Establecer la política de riesgos***

En el caso de Metro de Santiago está claramente definida en el documento: “Estándares de seguridad METROSAFETY para contratistas y subcontratistas según ley 20.123” (Ahumada, 2014)

- ***Criterios de aceptación de riesgos***

Se debe definir cuáles serán los criterios para clasificar los riesgos y poder definir su aceptabilidad.

- ***Evaluación cualitativa del riesgo del proyecto***

En términos generales se debe describir los riesgos y evaluar cualitativamente las posibles consecuencias de estos a fin de tener una idea de que es lo que puede suceder. En este caso se desarrolla en el Capítulo III - Antecedentes.

- **Análisis detallado de las áreas de especial interés o preocupación**

Metro de Santiago en su Reporte de Sostenibilidad 2014 define ciertos riesgos estratégicos:

**Tabla 1: Riesgos estratégicos**

<b>Riesgo Estratégico</b>	<b>Acciones</b>
<b>Ocurrencia de accidentes laborales significativos o recurrentes</b>	Implementación de las fases del proyecto Metro Safety.
<b>Ocurrencia de accidentes producto de aspectos ambientales no controlados</b>	Proyecto “Regularización Manejo de Sustancias Peligrosas”
<b>Sobrepasar los indicadores de accidentes a las personas en las obras de las Líneas 6 y 3 según lo definido por Metro y/o la ocurrencia de accidentes fatales o incapacitantes</b>	Definieron procedimientos con estándares de seguridad para empresas contratistas y revisión de plan de monitoreo.

Fuente: Metro de Santiago (2014)

#### **4.1.2 Fase 2: Licitaciones y negociación de contratos**

El contratista potencial tiene cierta inferencia en la gestión de riesgos en relación con la oferta, pero el mandante sigue siendo el responsable principal.

- Requisitos de los documentos de licitación
- La evaluación de riesgos en la evaluación de las ofertas
- Cláusulas de riesgo en el contrato

En el caso de Metro de Santiago, se tiene bastante experiencia en lo que a subcontratación se refiere, por lo tanto las bases para este tipo de documentos existen. Lo que sería de especial interés es exigir a los contratistas información sobre la gestión de riesgos realizada en proyectos anteriores, CV de sus líderes en gestión, dado que se tiene conocimiento de los posibles riesgos enfrentarlos a casos hipotéticos para tener una idea de su reacción, por ejemplo.

### **4.1.3 Fase 3: Construcción**

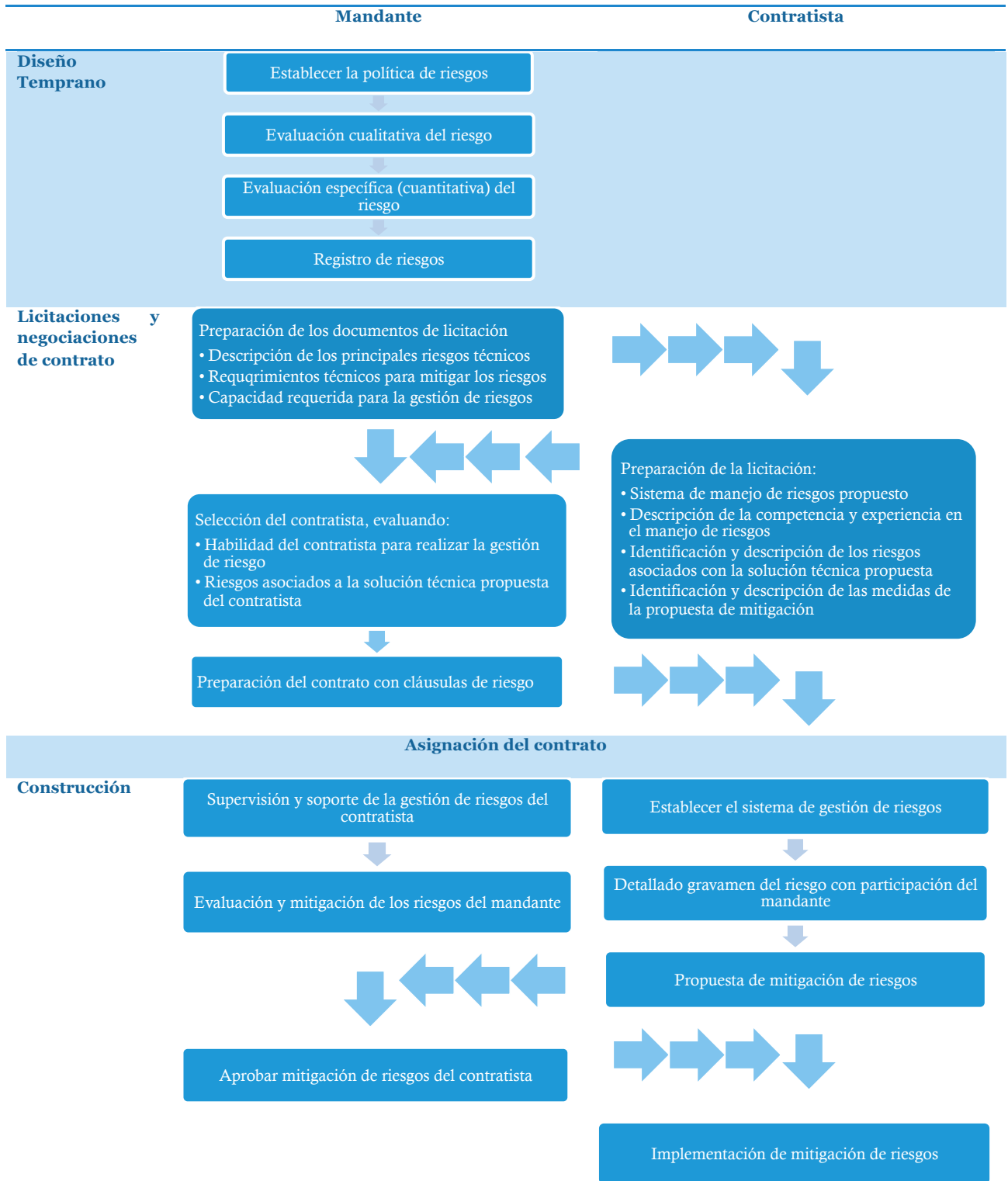
La responsabilidad principal pasa al contratista, para establecer un sistema de gestión de riesgos y llevar a cabo una gestión eficaz. El mandante debe supervisar, inspeccionar y participar en este trabajo, para evaluar y mitigar los riesgos no cubiertos por el contratista.

Entonces son de especial interés:

- Gestión de riesgos del contratista
- Gestión de riesgos del mandante
- El equipo de gestión de riesgos conjunta entre el mandante y el contratista.

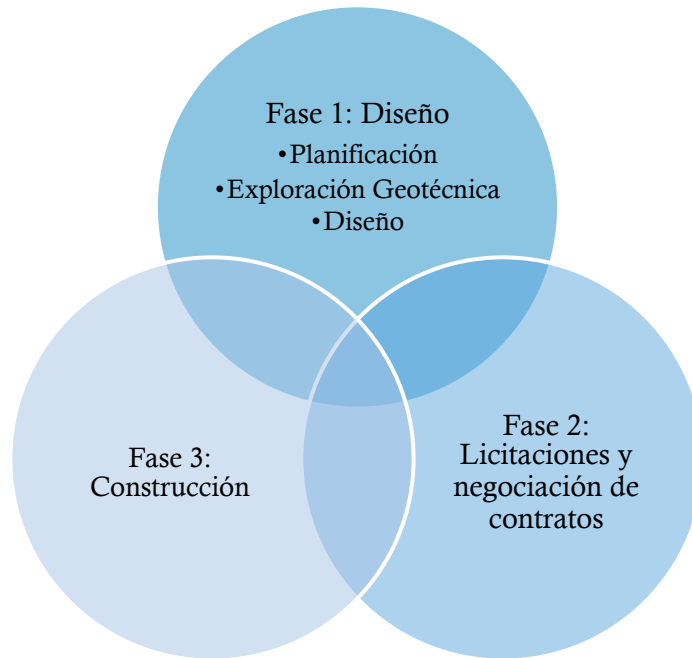
El trabajo en conjunto bajo un ambiente de cooperación puede ser una fórmula para reducir el costo al mínimo para el mandante mientras que maximiza el beneficio para el contratista.

**Tabla 2: Gestión de riesgos, flujo de actividades para el mandante y el contratista**



Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

Con respecto a lo planteado anteriormente y a las etapas de ejecución de la construcción se tiene:



Fuente: Elaboración propia

**Figura 15: Uso de la gestión de riesgos**

De la asociación mostrada en la figura se ven los distintos riesgos definidos en el Capítulo III - Antecedentes y se les puede asignar a la fase del proyecto correspondiente.

## **4.2 Objetivos de la gestión de riesgos**

### **4.2.1 Alcance**

Puede incluir los siguientes riesgos o consecuencias:

- Riesgos para la salud y seguridad de los trabajadores, incluyendo lesiones personales y, en casos extremos, pérdida de la vida.
- Riesgo para la salud y seguridad de terceros.
- Riesgo a la propiedad de terceros, en concreto edificios y estructuras existentes, edificios del patrimonio cultural y cualquier infraestructura bajo y sobre la superficie.
- Los riesgos para el medio ambiente, incluyendo la contaminación de la tierra, el agua o el aire y los daños a la flora y la fauna.

### **4.2.2 Objetivos de riesgo**

EL objetivo general de la política de riesgos de construcción podría ser la gestión adecuada de los riesgos en todo el proyecto, que estará garantizada en todas las etapas mediante:

- Identificación de los peligros.
- Identificación de las medidas para eliminar o mitigar los riesgos.
- Implementación de medidas para eliminar o mitigar los riesgos cuando sea económicamente factible o requerido de acuerdo con los objetivos específicos de riesgo o la legislación sobre salud y seguridad.

Económicamente viable puede definirse utilizando el principio ALARP (as low as reasonably practicable), es decir, para reducir los riesgos cubiertos a un nivel *tan bajo como sea razonablemente posible*. Se busca reducir la probabilidad de ocurrencia de eventos con grandes consecuencias.

La política de riesgos también puede incluir algunas declaraciones generales sobre la asignación de los riesgos entre las partes, por ejemplo, el riesgo debe asignarse a la parte que tiene los mejores medios para controlar el riesgo.



### **4.2.3 Estrategia de gestión de riesgos**

Se debe tener en cuenta que es un proceso cíclico y se debe revisar el RMP en cada etapa.

Cualquier estrategia de gestión de riesgos debe incluir:

- Definición de las responsabilidades de gestión de riesgos de las distintas partes implicadas (los diferentes departamentos dentro de la organización: mandantes, consultores, contratistas, aseguradores en caso de existir).
- Descripción de las actividades que se llevarán a cabo en las diferentes etapas del proyecto con el fin de lograr los objetivos.
- Esquema que se utilizará para el seguimiento de los resultados obtenidos a través de las actividades de gestión de riesgos mediante el cual se informa sobre los peligros identificados (naturaleza y significación) es de libre acceso y puede ser comunicado a todas las partes.
- Seguimiento de las hipótesis iniciales con respecto a la fase operativa.
- Seguimiento, auditoría y procedimientos de revisión.

## **4.3 Gestión de riesgo en las etapas de diseño**

### **4.3.1 Establecer la política de riesgos**

Como se mencionó anteriormente para el caso de Metro de Santiago está claramente definida en el documento: “Estándares de seguridad METROSAFETY para contratistas y subcontratistas según ley 20.123” (Ahumada, 2014)

### **4.3.2 Criterios de aceptación del riesgo**

Los objetivos de riesgo expresados en términos generales en la política de riesgo del mandante deben ser " traducidos" en los criterios de aceptación de riesgos adecuados para su uso en las actividades de evaluación previstas para llevarse a cabo. Esto puede incluir:

- Criterios de aceptación del riesgo que se utilizarán en una evaluación cualitativa del riesgo.
- Criterios de aceptación del riesgo que se utilizarán en una evaluación cuantitativa del riesgo.
  - ✓ Un límite por encima del cual el riesgo se considera inaceptable y por lo tanto debe ser reducido sin importar los costos.
  - ✓ Un límite por debajo del cual el riesgo no necesita ser reducido.
  - ✓ Un área entre los dos límites donde la mitigación de riesgos se considerará e implementará de acuerdo a las circunstancias, por ejemplo, utilizando el principio ALARP.

Debe existir un documento explicativo de cómo se establecieron los criterios de aceptación de riesgo en relación con los objetivos de riesgo definidos en la política de riesgo del mandante.

Y la definición debe estar guiada por las experiencias anteriores en la construcción de líneas y/o extensiones.

### 4.3.3 Evaluación cualitativa del riesgo

Durante la etapa inicial de diseño, una evaluación cualitativa del riesgo debe realizarse centrado en la identificación de los peligros potenciales para las actividades previas a la construcción:

- Planificación
- Exploración geotécnica
  - ✓ Sondajes y calicatas
  - ✓ Ensayos
  - ✓ Estratigrafía
  - ✓ Singularidades
  - ✓ Agua
  - ✓ Estereogramas
- Diseño

Información generada en el Capítulo III - Antecedentes.

Los principales objetivos de este trabajo son para concientizar a todos los interesados de los principales riesgos involucrados en la construcción y para proporcionar una base estructurada para las decisiones de diseño que deben tomarse en la etapa inicial.

Finalmente, el trabajo se puede utilizar como punto de partida para la gestión de riesgos durante la licitación.

El momento de la evaluación cualitativa del riesgo debe ser tal que los grandes cambios de diseño son todavía posibles. La evaluación cualitativa del riesgo debe incluir:

- Identificación de los peligros
- Clasificación de los peligros identificados
- Identificación de las medidas de mitigación de riesgos
- Los detalles de los riesgos en el registro del proyecto, indicando la clase de riesgos y mitigación de riesgos para cada peligro.

La identificación y clasificación consiste en un equipo multidisciplinario de expertos experimentados guiados por analistas de riesgo con experiencia. El objetivo debe ser la identificación de todos los eventos peligrosos concebibles que amenazan el proyecto.

En el proceso de identificación y clasificación se deben considerar las causas comunes de eventos peligrosos, tales como:

- Complejidad y conocimiento de la tecnología aplicada.
- Condiciones terrestres y subterráneas inesperadas.
- Incompetencia técnica y/o gerencial.
- Errores humanos.
- Falta de comunicación y coordinación entre las interfaces internas y externas.
- Las combinaciones de varios eventos no deseados que individualmente no son necesariamente críticos.

Los peligros identificados se clasifican de acuerdo a la magnitud del riesgo que representan. El propósito de esta clasificación es proporcionar un marco para las decisiones a tomar sobre la aplicación de medidas de mitigación de riesgo. Los sistemas de clasificación se deben establecer cubriendo las frecuencias y consecuencias.

Cuando los niveles de riesgo entran en conflicto con los criterios de aceptación del proyecto, es necesario identificar acciones de reducción de riesgos y proporcionar documentación para que las decisiones de acción de mitigación se lleven a cabo. Los resultados deben ser registrados en el registro de riesgos del proyecto.

En este punto, debería ser posible establecer si la aplicación de un conjunto de acciones de mitigación del riesgo, de hecho, reducen el riesgo a un nivel aceptable. Si este no parece ser el caso, otros enfoques deben ser explorados.

#### **4.3.4 Evaluación de Riesgos Específica.**

Para los peligros de interés específico, por ejemplo, debido a la gravedad de los riesgos involucrados, o la importancia de la decisión de diseño, un análisis de riesgo más detallado que el análisis cualitativo general se debe llevar a cabo. El resultado de este análisis también debe documentarse en el registro de riesgos del proyecto.

El trabajo puede comprender:

- Análisis de árbol de fallas de las causas de los riesgos
- Análisis de árbol de eventos de las consecuencias de un suceso.
- Cuantificación completa de los riesgos, por ejemplo, con el propósito de evaluar la relación costo-beneficio de la implementación de medidas de mitigación o proporcionar una base cuantitativa para una decisión entre alternativas de acción.

## **4.4 La gestión del riesgo durante la negociación de la licitación y del contrato.**

### **4.4.1 La gestión del riesgo durante la preparación de los documentos de licitación**

#### ***Principales actividades de gestión de riesgos***

Las siguientes actividades de gestión de riesgos deben llevarse a cabo durante la preparación de los documentos de la licitación:

- Especificación de los requisitos técnicos y de otro tipo en los documentos de licitación tales que los riesgos se gestionan de acuerdo con la política de riesgos. Los resultados de la evaluación cualitativa del riesgo llevada a cabo durante la etapa inicial de diseño deben ser utilizados como parte de las bases.

La especificación de los requisitos técnicos y otros requerimientos debería detallar las responsabilidades de los riesgos en conformidad con los principios generales adoptados para el proyecto que abarca la asignación de los riesgos, por ejemplo, los riesgos se asignan a la parte que tiene los mejores medios para controlarlos.

- La evaluación cualitativa del riesgo llevada a cabo en las etapas tempranas del diseño debe repetirse cuando los documentos de la licitación se encuentran cerca de la finalización, para las modificaciones finales de los documentos de licitación y para documentar que el riesgo se ha gestionado de acuerdo con la política de riesgos.
- Definición de la información solicitada a los licitadores con el fin de permitir una evaluación de la capacidad de los licitadores para la gestión del riesgo y de las diferencias en la gestión de riesgo entre las propuestas.
- Especificación de los requisitos en el documento de licitación relativo a las actividades de gestión de riesgo de los contratistas durante la ejecución del contrato.

#### ***Información que debe entregarse durante la licitación.***

Con el fin de garantizar una base para comparar y evaluar los licitadores, los documentos de licitación deben incluir:

- Información sobre la gestión de riesgos en proyectos similares y sus resultados.
- CV de las personas que se encarguen de la gestión de riesgos y los detalles de cualquier organización especializada en la que han participado.
- Descripción general de las intenciones de los licitadores con respecto a su organización específica del proyecto y sus objetivos de gestión de riesgos.

- Visión general y descripción de los principales riesgos percibidos por el licitador en el proyecto.
- Los licitadores proponen estrategias para la gestión de los principales riesgos para el proyecto y cómo el éxito se define y se mide.
- Información técnica del proyecto:
  - ✓ Mecánica de suelos.
  - ✓ Memoria de cálculo de estructuras asociadas, comúnmente utilizado en extensiones de proyectos previos.
  - ✓ Memoria de cálculo de estructuras circundantes (si es posible)

La información ayudará a ilustrar si el contratista es capaz de llevar a cabo el análisis de riesgo sistemático necesario, y el rendimiento que se espera de gestión de riesgos.

***Requerimientos que deben ser especificados en los documentos de licitación***

Los documentos de licitación deben especificar que el contratista debe realizar la gestión de riesgos en conformidad con la política de riesgo del mandante. El sistema de gestión de riesgos del contratista y su enfoque deben ser compatibles con los del mandante.

Requisitos relativos al sistema de gestión de riesgos de los contratistas deben ser descritos.

Esto podría incluir aspectos tales como:

- Organización y calificación del personal de gestión de riesgos.
- Tipos de riesgo a ser considerados y evaluados. Estos se relacionan con problemas de construcción y las actividades de diseño relacionados bajo el control de los contratistas.
- Actividades, es decir, la descripción de un requisito mínimo de actividades que se incluirán en la gestión de riesgo de los contratistas, incluyendo la identificación de riesgos sistemática, clasificación de los riesgos por la frecuencia y consecuencia, y la identificación de medidas de mitigación y/o eliminación de riesgos.
- Cronograma de actividades de gestión de riesgos.
- Coordinación con el equipo de gestión de riesgos del mandante.
- Coordinación con el equipo de gestión de riesgos de otros contratistas.
- Coordinación entre la gestión de riesgos y los contratistas de otros sistemas, tales como gestión de calidad y gestión ambiental.
- Control de riesgos de las actividades de los subcontratistas.

- Los requisitos específicos relativos a la gestión de riesgos en campos específicos deben establecerse claramente

La política de riesgo del mandante, criterios de aceptación y el sistema de clasificación de riesgo deben ser incluidos en los documentos de licitación. Las actividades de gestión de riesgos del mandante deben ser brevemente mencionadas.

Cabe señalar, que en los documentos de licitación el contratista es responsable de la gestión efectiva de riesgos, independientemente de la extensión y detalle de la información sobre los riesgos entregados por el mandante. Se recomienda en los documentos de licitación que el mandante participe en la gestión de riesgos durante la construcción y que un equipo de gestión de riesgos se defina con participantes del contratista y del mandante.

#### **4.4.2 Gestión de riesgos durante la elección del contratista**

Proporcionar la información clara a los licitadores mediante los documentos de licitación, la aplicación de técnicas de gestión de riesgos por el mandante puede ser valiosa en la selección del licitador correcto. Identificación de problemas de riesgo en las ofertas pueden ser utilizados como base para las negociaciones de condiciones.

La evaluación de los problemas de riesgo en las ofertas debe incluir:

- Una evaluación de la capacidad de los contratistas para identificar y controlar los riesgos mediante la elección y la implementación de soluciones técnicas. Una evaluación, necesaria, de su capacidad para aplicar la gestión sistemática de riesgos en el trabajo que se llevará a cabo.
- Evaluación sistemática de las diferencias entre las propuestas de proyectos por parte de diferentes licitadores.
- Evaluación de la experiencia en la gestión de riesgos.

Para cada riesgo identificado, los licitadores deben ser comparados y las áreas en las que hay diferencias deben ser resaltadas.

El enfoque recomendado es llevar a cabo una evaluación cuantitativa del riesgo en el proyecto. Esto podría llevarse a cabo en el período de tiempo entre la emisión y la recepción de ofertas. El riesgo en cada licitación se cuantifica mediante la evaluación cuantitativa del riesgo del mandante y para cada riesgo se comparan las diferencias con el licitador en la frecuencia y consecuencia.

#### **4.4.3 Cláusulas de riesgo en el contrato**

Cuando se ha elegido a un contratista, las negociaciones entre el mandante y el contratista pueden dar lugar a una descripción contractual detallada del sistema de gestión de riesgos para ser implementado en el proyecto. Esto puede basarse en una combinación de las intenciones del mandante y los procedimientos sugeridos por el contratista con el fin de mejorar la cooperación entre las partes.

Soluciones técnicas alternativas también se negociarán sobre la base de las evaluaciones de riesgos realizadas y expresadas en el contrato.

La evaluación de riesgos de la oferta seleccionada puede haber identificado algunas áreas de riesgo previamente no detectados o de especial preocupación. Para reducir estos riesgos a un nivel aceptable, se agregan cláusulas de mitigación de riesgos adicionales en el contrato.

## 4.5 Gestión de riesgos durante la construcción

Los principales riesgos durante la construcción se asocian a:



Fuente: Elaboración propia

**Figura 16: Riesgos durante la construcción**

### 4.5.1 Gestión de riesgos del contratista

El contratista es responsable del cumplimiento de la política de riesgo del mandante y debe empezar por establecer un sistema de gestión de riesgos cuidadosamente planificado, bien estructurado y fácil de usar.

El contratista debe identificar los peligros y clasificar los riesgos utilizando sistemas que sean compatibles con los sistemas utilizados por el mandante y debe proponer medidas de mitigación para reducir los riesgos identificados. En los casos en que la aplicación de las medidas de mitigación podría conducir a un gran retraso o causar una pérdida para el mandante, este debe aprobar la mitigación prevista antes de su implementación.



La estrategia de gestión de riesgo de los contratistas debe ser aplicada por todos los miembros de su personal independientemente de sus funciones de trabajo. La identificación de peligros y control de los riesgos, así como las técnicas utilizadas, deben ser vistas como una parte esencial de todas las actividades de diseño y construcción del proyecto. Información y formación debe recibir, según sea necesario, todo el personal involucrado en el proyecto. El mandante debe ser invitado a presenciar y participar en las reuniones, presentaciones y sesiones de entrenamiento de gestión riesgo del contratista.

Consideración y acciones oportunas son la esencia de las medidas de mitigación de riesgos. El objetivo es anticipar, y poner en marcha medidas eficaces de prevención proactivas. Los procesos de identificación de peligros, la clasificación de los riesgos, la toma de decisiones y acciones de mitigación de riesgo deben ser bien comprendidos y el contratista debe ser capaz de implementar rápidamente los resultados.

Se recomienda que el contratista mantenga un registro de riesgos del proyecto que contiene detalles de los peligros identificados con sus niveles de riesgo evaluados. Todos los accidentes, incidentes, cuasi accidentes y otros eventos experimentados se deben investigar. Los resultados de las investigaciones se darán a conocer a través del proyecto de manera oportuna con miras tanto a la prevención de una situación similar y en el objetivo de la mejora continua del sistema de gestión de riesgos.

Los planes de contingencia y de emergencia se deben diseñar, aplicar y mantener durante todo el proyecto para hacer frente a accidentes y emergencias previsibles. Esto implicará la cooperación, la comunicación con todas las partes del proyecto y los servicios públicos de urgencia.

A lo largo de la fase de construcción el contratista también es responsable de la aplicación de las iniciativas previstas por el titular para mitigar los riesgos.

#### **4.5.2 Gestión de riesgos del mandante**

Se recomienda que el mandante siga llevando a cabo la evaluación del riesgo, de aquellos de los que es responsable y de los que no. La principal preocupación son los accidentes que involucren personas, tanto trabajadores como terceros, equipos y estructuras circundantes. Las medidas de mitigación deben ser identificadas e implementadas por el propietario, sin embargo, algunas medidas de mitigación pueden ser entregadas al contratista para la ejecución.

Además de esto, el propietario debe alentar y supervisar la gestión de riesgo de los contratistas. Auditorías de control de calidad instituidos por el mandante son una forma de hacer esto.

Estas actividades permitirán al mandante conocer los riesgos identificados por el contratista, y permitirá al propietario garantizar que el sistema de gestión del riesgo de los contratistas se aplica correctamente y funciona con eficacia.

El propietario debe supervisar las prácticas en el lugar, para estar alerta cuando faltan a las medidas de mitigación de riesgo que se han acordado. Tales hallazgos pueden apuntar a

fallas en los sistemas de contratistas para poner en práctica las medidas de mitigación de riesgos elaborados y acordados en una fase anterior.

## **4.6 Componentes típicos de la gestión de riesgos**

### **4.6.1 Identificación del peligro**

El proceso de identificación puede basarse en:

- I. Una revisión de la experiencia operativa mundial de proyectos similares extraídos de la literatura.
- II. El estudio de la orientación genérica sobre los riesgos asociados al tipo de trabajo que está llevando a cabo.
- III. Las discusiones con el personal calificado y con experiencia del equipo de proyecto y otras organizaciones de todo el mundo.

Es importante identificar los peligros potenciales en un proceso estructurado. Se propone a continuación una sugerencia para la agrupación.

Peligros generales:

1. Disputas contractuales
2. Insolvencia y problemas institucionales
3. Interferencia entre las autoridades
4. Interferencias con terceros
5. Conflictos laborales

Peligros específicos:

6. Sucesos accidentales
7. Condiciones adversas imprevistas
8. Diseños, especificaciones y programas inadecuados
9. Falla de equipo pesado
10. Trabajos bajo el estándar definido, lento o fuera de tolerancia

Los peligros más arriba se han agrupado en generales y específicos. Los peligros específicos deben ser considerados para cada parte del proyecto, mientras que los riesgos generales pueden ser considerados generalmente para cada contrato. Se puede argumentar que los 10 peligros se encuentran en diferentes niveles, pero la experiencia ha demostrado que cubren razonablemente todos los posibles problemas.

Para el caso de los riesgos físicos los peligros destacados son los causantes de los principales problemas.

### **4.6.2 Clasificación**

La frecuencia de ocurrencia y la magnitud de las consecuencias de cada peligro deben ser evaluadas de acuerdo con un sistema de clasificación establecido específicamente para satisfacer las necesidades y la escala del proyecto. Además, un sistema de clasificación de riesgo debe establecer que, basándose en la clasificación de la frecuencia y consecuencia de

un peligro determinado, ofrece una clasificación del riesgo (lo que indica la acción a realizar de acuerdo con el nivel de riesgo).

La clasificación de la frecuencia, consecuencias y riesgos debe establecerse de acuerdo con los objetivos de riesgo y criterios de aceptación del riesgo definidos para el proyecto.

El sistema de clasificación de la frecuencia debe ser común para todos los tipos de riesgos cubiertos, mientras que un sistema de clasificación de consecuencia se debe establecer por separado para cada tipo de riesgo a cubrir. De preferencia, los diferentes sistemas de clasificación de consecuencia deben coordinarse de tal manera que un sistema común de clasificación de riesgo se puede utilizar para todos los tipos de riesgos cubiertos.

Un ejemplo de clasificación de la frecuencia, consecuencia y el nivel de riesgo se resume en lo siguiente, utilizando los sistemas de clasificación de 5 veces. La clasificación propuesta utiliza como base evaluaciones de riesgos anteriores para proyectos similares y recomendaciones obtenidas en la literatura.

### ***Clasificación de la frecuencia***

Son necesarias las estadísticas publicadas, el juicio de expertos: dentro del equipo del proyecto y el personal de las organizaciones colaboradoras, para llegar a la clasificación.

Con el fin de facilitar la labor de los miembros del equipo, las directrices para la evaluación de frecuencia se deben establecer tanto explícita como lo más clara posible.

Una forma de evaluar la propuesta de frecuencia es tener un equipo de evaluación de riesgos, que consta de los ingenieros expertos en túneles con experiencia para formular sus propias directrices para las clases de frecuencia. Estos podrían estar relacionados con el número de eventos experimentados por los participantes, el número de eventos que han oído hablar, el número de cuasi accidentes que han experimentado y el número de cuasi accidentes que han oído hablar; todos en relación con el número de proyectos en los que han estado implicados o que están al tanto. Sería de gran beneficio que un analista de riesgos guiara a un equipo de evaluación de riesgos a través de la identificación y evaluación de peligros.

Una separación en cinco clases o intervalos generalmente se recomienda como una forma práctica de clasificar frecuencia. La clasificación de frecuencia puede configurarse en relación el número de eventos (ocurrencia de peligros)/unidad, por ejemplo, a una "al año" o "por km de túnel". Sin embargo, se propone como el método más adecuado a utilizar una clasificación que se relaciona con el número potencial de eventos durante todo el período de construcción. Un ejemplo de dicha clasificación se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3: Frecuencia de ocurrencia (Periodo de Construcción)**

Clase de frecuencia	Intervalo	Valor Central	Descripción de la clase de frecuencia
5	>0,3	1	Muy probable
4	0,03 → 0,3	0,1	Probable
3	0,003 → 0,03	0,01	Ocasional
2	0,0003 → 0,003	0,001	Improbable
1	<0,0003	0,0001	Muy improbable

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

El valor central representa el valor del logaritmo del intervalo dado

### **Clasificación de las consecuencias**

Se recomienda que las consecuencias se clasifiquen en cinco clases o intervalos. La selección de los tipos de consecuencias y la posible gravedad variará de acuerdo con el alcance y la naturaleza del proyecto. Los ejemplos siguientes están basados en la práctica general, pero es importante tener en cuenta que las directrices y clases de clasificación deben ser definidas para cada proyecto en particular teniendo en cuenta la política de riesgos específicos. En el ejemplo utilizado, la base ha sido proyectos de construcción subterránea con un valor del proyecto de aproximadamente 1 trillón de dólares y la duración aproximada es de 5-7 años.

### **Lesión de trabajadores o personal del equipo de emergencia.**

La lesión de los trabajadores o del equipo de emergencia. La clasificación de consecuencia y por lo tanto los criterios de aceptación de los daños a los trabajadores y del equipo emergencia deben ser calibrados en contra de la política de riesgos del proyecto para formar una base realista para la evaluación del riesgo. Un ejemplo de clasificación consecuencia con la descripción pauta de las lesiones se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4: Lesiones de los trabajadores y del equipo de emergencia**

	Desastroso	Severo	Serio	Considerable	Insignificante
Nº	$F > 10$	$1 < F \leq 10$	$1F$	$1SI$	$1MI$
<b>Fatalidades - Lesiones</b>		$SI > 10$	$1 < SI \leq 10$	$1 < MI \leq 10$	

*F, fatality (muertes); SI, serious injury (heridas graves) y MI, minor injury (heridas menores)*

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

## Daños a terceros

Al considerar las lesiones a terceros, en comparación con las lesiones a los trabajadores y los equipos de emergencia, la tolerancia al riesgo suele disminuir. El argumento es que el tercero no tiene ningún beneficio de las obras de construcción y no debe ser sometido a un riesgo más alto que si la obra no se está llevando a cabo. Se propone un ejemplo de clasificación consecuencia en la Tabla 5.

**Tabla 5: Daños a terceros**

	Desastroso	Severo	Serio	Considerable	Insignificante
<b>Nº Fatalidades - Lesiones</b>	$F > 1$ $SI > 10$	$1F$ $1 < SI \leq 10$	$1SI$ $1 < MI \leq 10$	$1MI$	–

*F, fatality (muertes); SI, serious injury (heridas graves) y MI, minor injury (heridas menores)*

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

## Daño a la propiedad de terceros

Daños o pérdidas económicas a la propiedad de terceros deben ser cubiertos por una clase de consecuencia distinta, con una clasificación menos tolerante en comparación con la pérdida económica sufrida por el propietario. La práctica demuestra que los clientes de grandes contratos de ingeniería civil son generalmente expuestos a riesgos económicos por encima de lo que se considera razonable para terceros que, en muchos casos, no son los beneficiarios directos del proyecto. Un ejemplo de clasificación de consecuencia se propone en la Tabla 6.

**Tabla 6: Daños o pérdidas económicas que afectan a terceros**

	Desastroso	Severo	Serio	Considerable	Insignificante
<b>Pérdidas en millones de Pesos Chilenos (\$)</b>	$> 2267$	$226,7$ $\rightarrow 2267$	$22,7$ $\rightarrow 226,7$	$2,3 \rightarrow 22,7$	$< 2,3$

La tabla original tiene los valores en euros, con un valor de:  $\epsilon = \$755,53$

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

## Daño al medioambiente

Las cuestiones ambientales son generalmente manejadas en otros términos dentro del sistema de gestión ambiental de un proyecto. Es bastante complejo clasificar el daño ambiental en un contexto de riesgo. Se propone evaluar el daño probable al medioambiente en relación con la permanencia potencial y severidad del daño (potencial). La Tabla 7 describe un ejemplo preliminar de tal clasificación que necesita un mayor desarrollo.

**Tabla 7: Daños al medioambiente**

Tipo de Daño	Guía para proposición de daños
<b>Desastroso</b>	Daño severo permanente
<b>Severo</b>	Daño menor permanente
<b>Serio</b>	Efectos de larga duración
<b>Considerable</b>	Daño severo temporal
<b>Insignificante</b>	Daño menor temporal

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

## Retrasos

La potencial consecuencia de retraso inicialmente se puede evaluar como el retraso de la actividad específica independientemente de si la actividad está en la ruta crítica. Se debe realizar una evaluación distinta para evaluar el retraso estimado de la ruta crítica.

A fin de lograr una sola matriz de riesgo para cubrir todas las consecuencias, intervalos de un factor de 10 se podrían mantener en caso de retraso (Retraso 1 en la Tabla 8), pero los descriptores menos significativos –“insignificante” y “considerable”- son inevitables.

Alternativamente, una clasificación más realista puede ser definida (Retraso 2 en la Tabla 8), pero este sistema puede requerir una matriz de riesgo exclusivo para retraso debido a que la clasificación difiere de la de las otras consecuencias. Sin embargo, se recomienda esta clasificación porque se entiende más fácilmente.

**Tabla 8: Retrasos**

[meses/peligro]	Desastroso	Severo	Serio	Considerable	Insignificante
<b>Retraso 1</b>	> 10	1 → 10	0,1 → 1	0,01 → 0,1	< 0,01
<b>Retraso 2</b>	> 24	6 → 24	2 → 6	0,5 → 2	< 0,5

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

## Pérdidas económicas para el mandante

Este tipo consecuencia se relaciona con los costos adicionales para el mandante como consecuencia de situaciones de peligro ocurridas, y cubre los costos adicionales durante la fase de construcción se espera la asuma el mandante. Pérdidas al contratista (o asegurador) no están incluidas. Sin embargo, si no puede comprobar fácilmente si los costos adicionales deben ser cubiertos por el mandante o por otras partes, se debe asumir que la pérdida es asumida por el mandante.

Costos adicionales directos como consecuencia de los retrasos se incluyen en este ejemplo, mientras que los otros costos indirectos -costos principalmente financieros- debidos a cualquier retraso no están incluidos.

Un ejemplo propuesto de clasificación consecuencia de la pérdida económica al propietario (por peligro) se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9: Pérdidas económicas del mandante**

	<b>Desastroso</b>	<b>Severo</b>	<b>Serio</b>	<b>Considerable</b>	<b>Insignificante</b>
<b>Pérdidas en millones de Pesos Chilenos (\$)</b>	> 22720,8	2272,1 → 22720,8	227,2 → 2272,1	22,7 → 227,2	< 22,7

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

Es necesario aclarar que los ítems de pérdidas económicas para el mandante y retrasos no son de especial interés para los riesgos denominados físicos que son los que nos convocan.

## Pérdida de popularidad

Para los proyectos que son política, económica o ambientalmente sensibles y donde la opinión pública podría tener un fuerte impacto en el desarrollo del proyecto, como lo es el desarrollo de una nueva línea de Metro, la pérdida de popularidad podría ser una categoría de consecuencia relevante de evaluar. Sin embargo, se propone tener en cuenta esta pérdida como parte de la pérdida del mandante.

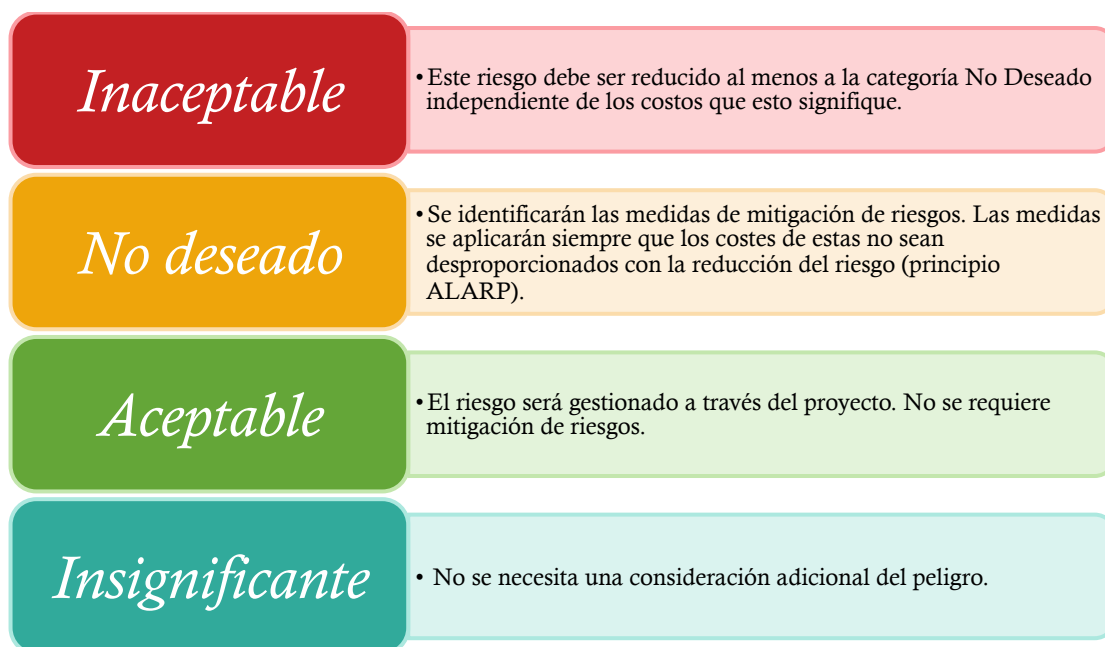
La pérdida de la popularidad se producirá sobre todo en el caso de consecuencias a terceros y al medioambiente. Todas las consecuencias de los peligros, que conducen a la mala fama en la prensa, pueden tener un impacto significativo en la buena voluntad pública y política al proyecto.



### 4.6.3 Clasificación y aceptación del riesgo

Un ejemplo de una matriz de riesgos se muestra en la Tabla 10. El ejemplo está en línea con la práctica general, pero es importante tener en cuenta que el sistema de clasificación de riesgos debe definirse para cada proyecto en particular teniendo en cuenta la política de riesgo específico.

Las acciones que se llevan a cabo para cada peligro dependen de si el riesgo relacionado es clasificado como inaceptable, no deseado, aceptable o insignificante. Ejemplos de este tipo de acciones son:



Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

**Figura 17: Clasificación de riesgo**

Las descripciones de las acciones que se llevarán a cabo pueden incluir la definición del nivel en la organización del proyecto en el que se deben tomar las decisiones sobre las medidas de mitigación de riesgo.

La matriz de riesgos presentada en la Tabla 10 se piensa como base para la decisión sobre la aceptabilidad de cada peligro considerado. Mediante el control de la magnitud de los riesgos derivados de los peligros individuales, el riesgo total involucrado en el proyecto es controlado sin tener en cuenta una estimación del riesgo total.

Como se trata de una clasificación simple, estas directrices no presentan una ponderación sugerida o una combinación de los diferentes grupos de consecuencia.

**Tabla 10: Matriz de Riesgo**

Frecuencia	Consecuencia				
	Desastrosa	Severa	Seria	Considerable	Insignificante
<b>Muy probable</b>	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	No deseado	No deseado
<b>Probable</b>	Inaceptable	Inaceptable	No deseado	No deseado	Aceptable
<b>Ocasional</b>	Inaceptable	No deseado	No deseado	Aceptable	Aceptable
<b>Improbable</b>	No deseado	No deseado	Aceptable	Aceptable	Insignificante
<b>Muy improbable</b>	No deseado	Aceptable*	Aceptable	Insignificante	Insignificante

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

\*Dependiendo de la redacción de los objetivos de riesgo se puede argumentar que la reducción del riesgo se considerará para todos los riesgos con una consecuencia “Severa”, y por lo tanto ser clasificados como “No deseado” incluso para una muy baja frecuencia.

#### 4.6.4 Evaluación cuantitativa del riesgo

El método de la matriz de riesgos se considera demasiado general para proporcionar estimaciones de riesgos cuantitativos fiables. Sin embargo, es una tarea factible cuantificar los riesgos identificados.

El riesgo puede simplemente ser cuantificado para cada peligro mediante la asignación de un número F para la frecuencia y un número C para la consecuencia. El riesgo de este peligro se calcula entonces como F veces C y el riesgo total del proyecto es una suma sobre todos los peligros.

Este enfoque simple proporciona una única cifra de riesgo para cada tipo de riesgo, lo que indica una mejor estimación para el riesgo.

La desventaja de este enfoque simple es que no describe las incertezas del riesgo estimado.

Una descripción de las incertidumbres se puede obtener teniendo en cuenta cada consecuencia como una variable estocástica y la asignación de una distribución para cada variable en lugar de una sola cifra. La distribución se puede obtener mediante la asignación de un término que presente más probabilidades de ocurrir, un máximo y un mínimo. El mismo enfoque se puede utilizar para la estimación de frecuencia, pero la veracidad de este enfoque se debate, de tal manera que un chequeo de sensibilidad del resultado en cambios en las frecuencias puede ser más apropiado. A partir de las figuras más probables, mínimo y máximo, se puede asumir una distribución normal (Gauss) u otras distribuciones.

Las ventajas de este enfoque más complejo son:

- En lugar de una sola cifra, el riesgo es descrito mejor mediante la asignación de una figura más probable, mínima y máxima para cada consecuencia (y posiblemente también la frecuencia).
- Teniendo en cuenta las considerables incertidumbres en las frecuencias y consecuencias, que normalmente tendrán que ser asignados con base en criterios de ingeniería en lugar del análisis estadístico, el uso de los rangos estimados en lugar de una cifra facilita la evaluación de riesgos.
- La estimación de riesgos resultante es una distribución de probabilidad en lugar de una sola cifra.

Los métodos de cuantificación descritos anteriormente son los más adecuados para la estimación de pérdida económica y retraso, pero, en principio, se puede utilizar para todos los tipos de riesgo y consecuencia.

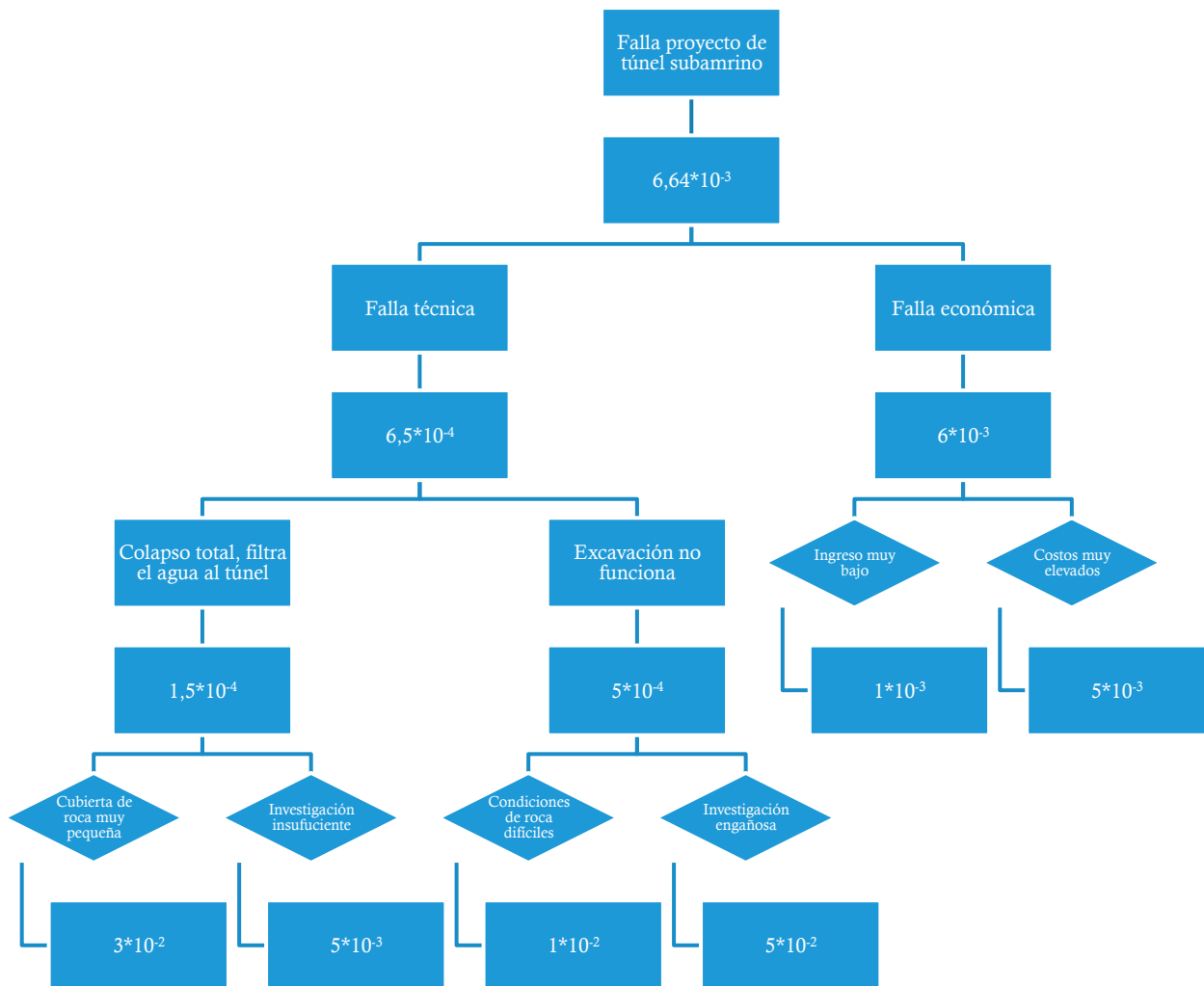
Multiriesgo, explicado más adelante, es un método para establecer estimaciones de costos y horarios incluyendo incertidumbres. El método puede ser utilizado para cubrir la contribución a los costos y el tiempo de los peligros con más alta frecuencia de ocurrencia mediante la inclusión de las consecuencias de dichos peligros en las estimaciones. El método no se puede utilizar para cubrir las contribuciones de peligros con una baja frecuencia que pueden ser significativos dentro de la construcción subterránea, ya que tienen muy altas consecuencias.

## 4.7 Herramientas de la gestión de riesgos

La mayoría de las herramientas se han desarrollado para aplicaciones fuera de la industria subterránea. Sin embargo, estas se pueden utilizar para los problemas encontrados en la construcción subterránea sin mayor ajuste.

### 4.7.1 Árbol de fallas

Puede ser utilizado para analizar una conexión causal única o combinada que precede a un evento negativo. Análisis del árbol de fallas se utiliza ya sea con o sin cuantificar las probabilidades de los eventos. Mediante el uso de esta herramienta, los problemas complejos con muchos eventos que interactúan pueden ser estructurados.

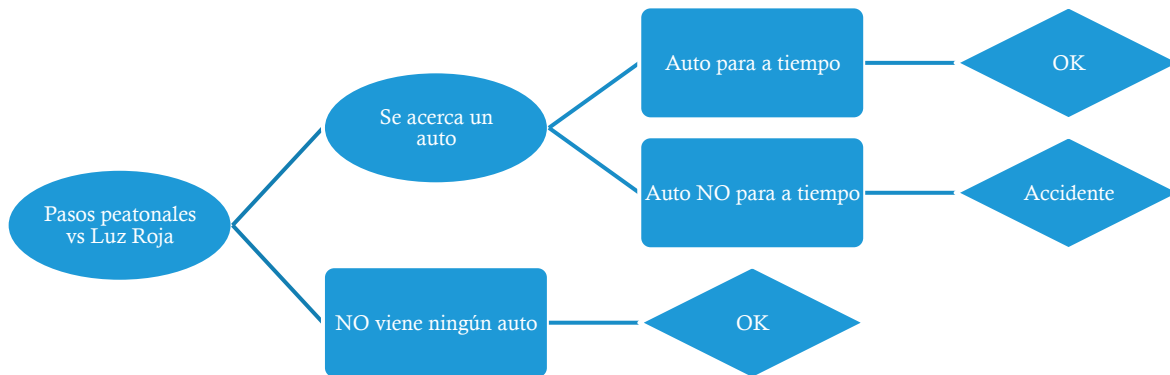


Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

**Figura 18: Ejemplo árbol de fallas**

### 4.7.2 Árbol de eventos

La descripción del desarrollo de un acontecimiento inicial, a través de posibles secuencias a un estado final definido puede llevarse a cabo mediante análisis de árbol de eventos. Evaluación de probabilidades para diferentes resultados dan un análisis cuantitativo.



Rombos: Nodos terminales

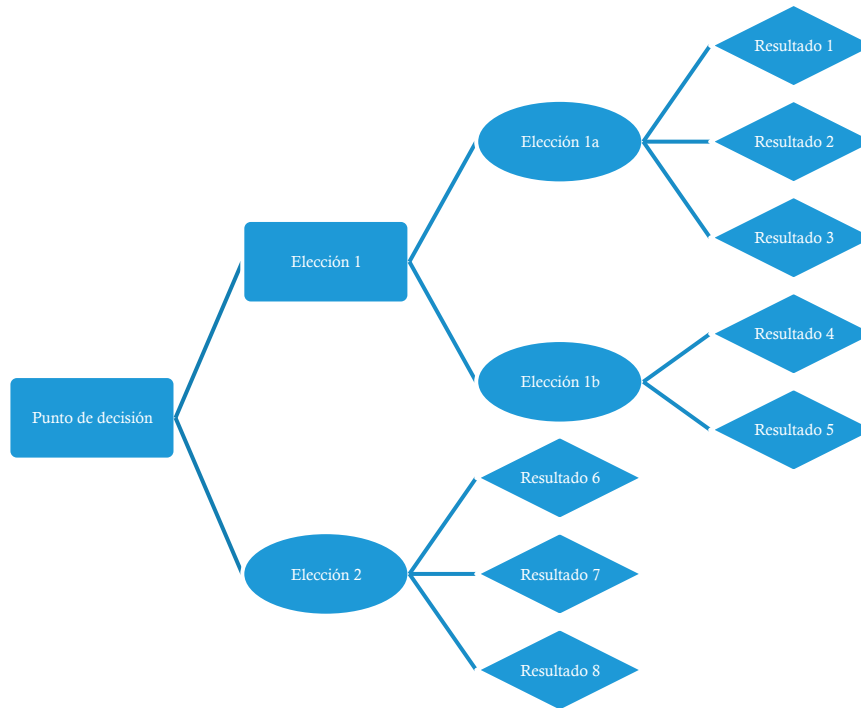
Círculos: Nodos de oportunidad

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

**Figura 19: Ejemplo árbol de eventos**

### 4.7.3 Árbol de decisión

El árbol de decisión se utiliza para analizar la mejor decisión basada en la información disponible. Muchas de las decisiones en la construcción subterránea contienen una gran incertidumbre, y mediante el uso del árbol de decisión éstas se presentan en un formato estructurado. Esto entonces podría formar una mejor base para la toma de decisiones.



Rombos: Nodos terminales  
Círculos: Nodos de oportunidad  
Cuadros: Nodos de decisión.

Fuente: Traducción libre de Eskesen et al. (2004)

**Figura 20: Ejemplo árbol de decisión**

#### **4.7.4 Multiriesgo**

Este es un método para calcular funciones con variables estocásticas (aleatorias). Multiriesgo es más útil cuando existe un alto grado de incertidumbre. El método computacional utiliza una estructura de 7 pasos consecutivos:

1. Identificar un número (algunos) de las principales partidas de gastos.
2. Estimar el costo de cada ítem por tres valores: mínimo, más probable y máximo.
3. El rango de valores y la incertidumbre esperado se calcula para cada partida de gastos.
4. Se calcula la suma total y varianza.
5. Si la varianza total es demasiado grande, el elemento que tiene la mayor influencia en la incertidumbre se divide en subtemas independientes.
6. Pasos 2-5 se repiten hasta que se llegue a una varianza total aceptable.
7. El resultado se presenta como un costo promedio y la desviación estándar.

La planificación del tiempo sigue los mismos principios.

El método se basa en ítems estadísticamente independientes. Si este no es el caso, entonces los elementos de tiempo y de costos se identifican como "ítems generales" para todo el proyecto. Ejemplos de artículos generales de costos son los salarios, los problemas de autoridad, el clima y el nivel de calidad, y estos son tratados como elementos separados.

#### **4.7.5 Simulaciones**

El tipo de estimación que encontramos en obras subterráneas a menudo incluye ecuaciones con varias variables estocásticas. Soluciones analíticas para este tipo de problemas pueden ser muy complicadas, incluso si una expresión analítica puede ser establecida. Mediante el uso de la simulación, una solución aproximada se puede calcular.

Un resultado aproximado para la ecuación puede entonces ser simulado. Cuanto mayor sea el número de simulaciones, más adecuado es el resultado. Después de la simulación de 1.000, 10.000, 100.000 o el número de simulaciones que se elija, los resultados se presentan como distribuciones de incertidumbre, de los cuales histogramas, valor medio, la desviación estándar y otros parámetros estadísticos se pueden determinar dependiendo del método de simulación escogido.

## 5. Conclusiones

El aporte de este trabajo de título es proponer herramientas para el desarrollo de Planes de Manejo de Riesgos (RMP) en Obras Subterráneas, en particular, en túneles urbanos, donde actualmente el Metro de Santiago es uno de los principales mandantes.

De la información recabada se puede observar que el Metro de Santiago conoce bien sus riesgos y tiene políticas adecuadas para el efecto, aunque se estima que todavía existe espacio para incorporar las herramientas presentadas en este trabajo.

Cuando se conocen los datos y las formas de gestión utilizadas en el mundo se puede construir el RMP enfocado a las necesidades particulares de túneles urbanos, en esta ocasión se desarrolló la etapa cualitativa completamente, se describen los riesgos asociados, peligrosidad y sus posibles consecuencias, además de entregar estrategias para el manejo de riesgo.

La gestión de riesgos muchas veces no se ve como una tarea de la ingeniería de diseño, pero en este momento es una de las grandes preocupaciones de Metro de Santiago en la extensión de sus líneas, por lo que desarrollar una estrategia de gestión de riesgos específica es de suma urgencia y debe ser considerada como parte de la planificación del proyecto.

Del trabajo realizado se rescata la estructuración de la información existente, para así a futuro continuar con el análisis de riesgo con una base integrada de información de los distintos actores.

Es importante mencionar que el procesamiento de datos queda propuesto como una extensión de este trabajo de título, pero se entrega una guía en el presente de como llevar a cabo el análisis cuantitativo.

Con respecto a la diferenciación entre la construcción de túneles en general y la construcción para túneles urbanos, la principal es que en general, se construyen en roca, mientras que dentro de la ciudad se construye en suelo, lo que cambia drásticamente los riesgos y por ello el foco de este trabajo en túneles urbanos.

Cuando se construye en zonas urbanas de gran afluencia de público con el fin de conectar la ciudad, se debe ser en extremo cuidadoso con las personas que circulan alrededor de la construcción, lo mismo que con las estructuras existentes, a diferencia de los túneles en general que no se encuentran en zonas de alto tráfico de personas ni de estructuras circundantes.

Un tema interesante a consignar es que la teoría del manejo de riesgos a nivel mundial hace una diferenciación en la clasificación de consecuencias entre los daños a terceros y los daños a los trabajadores. A juicio de la autora, se debería modificar esta clasificación integrando todos los aspectos en un marco único.



## 6. Bibliografía

- Ahumada, G. (2014). *Estándares de Seguridad METROSAFETY para contratistas y subcontratistas según Ley 20.123*. Política de Riesgos, Metro de Santiago, Prevención de Riesgos, Santiago.
- Arao Gomes, A. (2013). Etapas de un proyecto de Obras Subterráneas. *Unidad 2: Diseño Geotécnico de Túneles, Apunte CI5534 Construcción de Túneles*, 5. Santiago, Chile.
- Atkinson, J. H., & Potts, D. M. (June de 1977). No Access Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil. *Géotechnique*, 27(2), págs. 203-215.
- Boscardin, M. D., & Cording, E. J. (January de 1989). Building response to excavation-induced settlement. (A. S. Engineers, Ed.) *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), págs. 1-21.
- Bowles, J. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). The McGraw - Hill Companies, Inc.
- Empresa de Transporte de Pasajeros Metro de Santiago (2014). *Reporte Sostenibilidad 2014*. Metro de Santiago, Santiago.
- Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J., & Holst Veicherts, T. (2004). *Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2*. ITA/AITES, Tunnelling and Underground Space Technology. Lausanne, Switzerland: Elsevier.
- Gacitúa, J. M. (2012). *Análisis cuantitativo y jerárquico de incertezas en la construcción de túneles*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago, Chile.
- Grasso, P. (2015). Risk & Safety Management in Tunnelling. *Mechanized Tunnelling*. Santiago, Chile.
- Karakus, M., & Fowell, R. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). En ROCKMEC (Ed.), *7th Regional Rock Mechanics Symposium*. Sivas, Turkey.
- Mair, R. J., Taylor, R. N., & Burland, J. B. (1996). Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. *International Conference of Geotechnical Aspects of on Underground Construction in Soft Ground*, (págs. 713-718). London, UK.
- The Association of British Insurers & The British Tunnelling Society. (2003). *THE JOINT CODE OF PRACTICE FOR RISK MANAGEMENT OF TUNNEL WORKS IN THE UK*. London, UK: The British Tunnelling Society.
- The International Tunnelling Insurance Group. (2012). *A CODE OF PRACTICE FOR RISK MANAGEMENT OF TUNNEL WORKS*. ITIG; BTS; IMIA; ITA/AITES.