

---

## **Gestión de Riesgos en Obras Subterráneas de Ingeniería**

**Por Roberto Kochen**

**Presidente y Director Técnico de GeoCompany ([www.geocompany.com.br](http://www.geocompany.com.br)) y Director de  
Ingeniería Civil del Instituto de Ingeniería**

### **Introducción**

Este trabajo se basa en la conferencia que el autor dictó en el evento “Tunnelling Code of Practice Event” (lanzamiento del “Código de Práctica para la Gestión de Riesgos en Obras de Túneles”, en su versión en portugués), organizado por Munich Re Group y Munchener do Brasil, el 18 de marzo de 2008. El evento se realizó en São Paulo, por iniciativa de Munich Re (una de las mayores empresas de reaseguros del mundo), para divulgar diversos aspectos importantes de la seguridad de túneles y obras subterráneas y discutir las buenas prácticas de gestión de riesgo en este tipo de obra de ingeniería.

En este trabajo se estudian diversos aspectos fundamentales de la gestión de riesgos en obras subterráneas, tales como la importancia de contar con un proyecto correcto y detallado, que incluso contenga medidas de contingencia, antes del inicio de las obras, la identificación de anomalías y riesgos geológicos y la correcta identificación, reducción y eliminación de riesgos geotécnicos.

El gran número de obras subterráneas, principalmente las urbanas, que están siendo ejecutadas en el mundo, puede dar lugar a accidentes, y para evitarlos o minimizar sus impactos es necesario respetar una serie de criterios, como los que constan en el Código de Práctica para la Gestión de Riesgos en Obras de Túneles, iniciativa de The International Tunnelling Insurance Group (ITIG), de gran importancia para aumentar la seguridad en este tipo de obra de ingeniería.

---

## **Riesgos en Obras Subterráneas (Construcción y Operación)**

Las obras subterráneas siempre entrañan más riesgo que las obras a cielo abierto al trabajar con materiales geológicos que, por más detallado que haya sido el estudio previo de campo y laboratorio, siempre pueden presentar alguna característica no prevista en un principio que sólo se detectará durante la construcción. El riesgo geológico siempre está presente en obras subterráneas, como bien lo demuestra el artículo técnico de Pastore (2009).

Con esta característica peculiar, el ingeniero geotécnico de proyecto de obras subterráneas tiene que “prever lo imprevisible”: anticipar posibles anomalías y características geotécnicas y geológicas a lo largo del trazado de los túneles y las obras subterráneas que podrán resultar en impactos y aumento de los riesgos en la construcción de estas obras de ingeniería. Los riesgos de las obras subterráneas, en el terreno de la Ingeniería, sólo son comparables a los de las obras hidráulicas y marítimas, en las que las fuerzas de la naturaleza, por su característica intrínseca de imprevisibilidad, desempeñan un papel relevante.

Los riesgos geológico-geotécnicos e impactos en las construcciones subterráneas siempre están presentes y son mayores en las excavaciones de grandes dimensiones. Para reducirlos es necesario analizar la probabilidad de los riesgos posibles (aquellos riesgos que efectivamente pueden concretizarse), identificar los riesgos que haya que superar ante las disconformidades geotécnicas y geológicas graves y estructurarse en lo que se refiere a las respuestas a los riesgos en casos concretos.

Riesgo es el evento o condición desconocida que podrá tener efectos positivos y/o negativos. Cuando causa efectos positivos, solemos llamarlo suerte. Cuando sus efectos son negativos, hay que identificarlos, mitigarlos y, de ser posible, eliminarlos. La propensión al riesgo es subjetiva, existen individuos y empresas más propensos al riesgo e individuos y empresas menos propensos. La figura 1 muestra esta situación para una obra subterránea típica en roca: aquellos con menos propensión a correr riesgos exagerarán al adoptar medidas de soporte (tirantes y pernos de anclaje). En contraposición, aquellos con más propensión al riesgo no adoptarán todas las medidas de soporte necesarias y convivirán con el riesgo de caída de bloques o incluso de colapso del túnel.

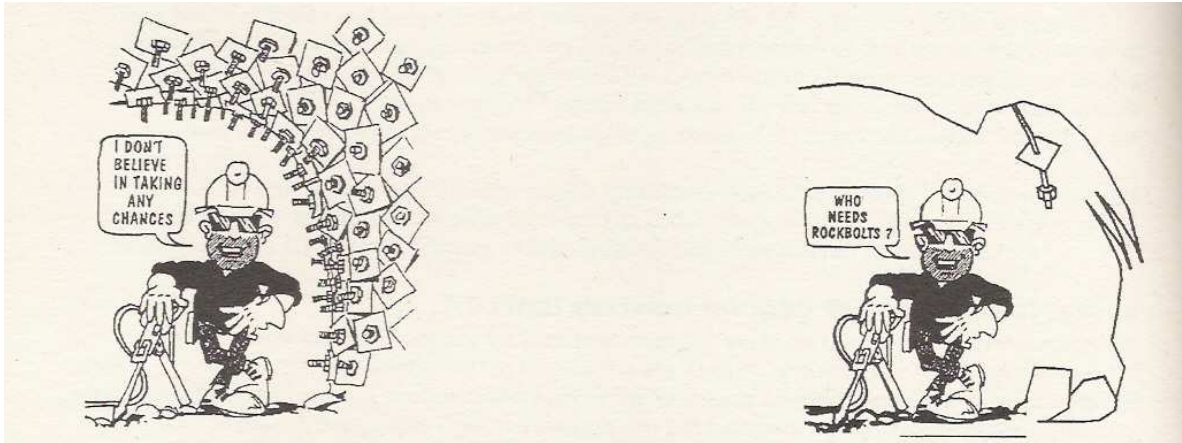


Figura 1 – La propensión al riesgo es subjetiva

En el caso de los túneles existen riesgos en las etapas de construcción y operación. Para ejemplificar el primer caso (riesgo en la construcción), la figura 2 muestra un colapso en la excavación de un túnel en el Metro de Munich, en 1994. El túnel alcanzó una capa de pedregullo y arena en el techo, no prevista, que dio lugar a la formación de un embudo hasta la superficie. El equipo de trabajo que estaba dentro del túnel fue evacuado a tiempo y sin ningún daño, sin embargo, un ómnibus que pasaba por la calle (a las 2.00 de la mañana, hora de poco movimiento) cayó en el socavón y hubo dos víctimas, el conductor y un pasajero.



Figura 2 – Accidente en el Metro de Munich en 1994 (Reiner, 2008)

En la categoría de riesgos en la operación, pueden ocurrir diversos tipos de accidentes. El más común –y posiblemente el más peligroso– es el de incendio (ilustrado en la figura 3), con gran potencial de víctimas. Un incendio reciente, ocurrido en el Túnel Montblanc, en Europa, provocó decenas de víctimas; igualmente, en el Túnel del Canal de la Mancha, daños en el revestimiento causados por un incendio paralizaron la operación durante varios meses, con el consiguiente perjuicio para la empresa concesionaria de este trayecto.



Figura 3 – Ejemplo de incendio en túnel vial

### **Identificación y Gestión de Riesgos en Obras Subterráneas**

Un buen plan de identificación de riesgos comienza con las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son los riesgos para esta obra subterránea específica? Por ejemplo, un túnel no urbano puede ocasionar asientos importantes sin ninguna consecuencia, mientras que esta misma característica no es aceptable en una obra urbana por la interferencia con las edificaciones y utilidades subterráneas a lo largo del trazado.
2. ¿Cómo puedo darme cuenta de que existen riesgos? Los riesgos son inevitables, no son buenos ni malos, simplemente forman parte de cualquier emprendimiento de ingeniería. Lo que hay que hacer es saber administrarlos, es decir, hay que identificarlos, reducirlos y, de ser posible, eliminarlos.
3. ¿Qué riesgos debo aceptar? ¿Qué riesgos debo rechazar? Definir un nivel máximo de riesgo es tarea de las entidades involucradas en el emprendimiento (propietario, constructor, comunidades afectadas y usuarios). Cabe recordar que la noción de riesgo es subjetiva, hay personas que corren en la Fórmula 1 y otras que ni siquiera conducen, motivo por el que un colegiado debe definir el nivel de riesgo aceptable y los riesgos que se deben rechazar.
4. ¿Qué hacer para ser consciente de los riesgos? El monitoreo, el seguimiento y la supervisión técnica, así como la evaluación constante del proyecto y de la construcción,

---

forman parte de los procedimientos de gestión y minimización de riesgos.

En cualquier emprendimiento de ingeniería, el riesgo se compone de tres elementos: probabilidad de ocurrir, elección y consecuencia. Para ejemplificar de forma sencilla y aclarar estos conceptos, consideremos el caso de un ingeniero que va de su casa a la oficina de la empresa en la que trabaja. Mojarse con agua de lluvia en el camino desde su casa hasta la oficina es un riesgo. La probabilidad de que esto ocurra se expresa por el número de días que llovió a la hora en que él recorrió ese camino durante el año pasado dividido entre 365. Las consecuencias (o impactos) de este evento son: i) gripe; ii) pasar por una situación embarazosa; iii) sentirse incómodo durante la jornada de trabajo.

Las posibles elecciones en este caso son: aceptar el riesgo (no me importa mojarme y detesto utilizar paraguas) o implantar un conjunto de controles que minimicen (o mitiguen) las posibilidades de ser víctima del evento, en caso de que ocurra.

Controles son políticas, procedimientos, prácticas o estructuras organizacionales proyectados e implantados de forma a conferir una garantía razonable de que los objetivos del emprendimiento serán alcanzados y los eventos indeseables serán detectados y corregidos en tiempo hábil.

Para el ejemplo anterior tenemos la siguiente situación: el objetivo es trabajar siempre seco.

Los controles en este caso se resumen a las siguientes prácticas:

◆ Como forma de detección:

- Consultas realizadas a diario para saber la previsión del tiempo (no salir de casa cuando esté previsto que lloverá).

◆ Como forma de prevención:

- Llevar diariamente un paraguas;
- Ir en automóvil diariamente –desde el estacionamiento cubierto de su casa hasta el estacionamiento cubierto del edificio donde se encuentra la oficina.

◆ Como forma correctiva:

- Administrar la crisis (trabajar mojado corriendo el riesgo de caer enfermo de gripe o neumonía).

Este sencillo ejemplo será traducido más adelante a una filosofía de gestión de riesgos en la

---

Ingeniería.

### **Puntos Básicos en la Gestión de Riesgos en Obras Subterráneas**

Para que un emprendimiento tenga éxito, desde el punto de vista del riesgo en obras subterráneas (es decir, realizar la obra dentro del plazo y cronograma previstos, sin accidentes de mediano o gran impacto), es necesario contar con los siguientes planes y procesos antes de comenzar la obra:

- Plan y estrategia de gestión de riesgos
- Proceso de identificación de los riesgos
- Proceso de cualificación de los riesgos
- Proceso de cuantificación de los riesgos
- Proceso de monitoreo y control de los riesgos

Los proyectos usuales de obras subterráneas comprenden las siguientes fases:

- Fase preliminar de estudio de viabilidad económica;
- Discusión sobre desapropiación de inmuebles, impactos ambientales y urbanos probables e interferencia con el medio urbano;
- Proyecto básico y cuantitativo;
- Preparación del término de referencia y licitación;
- Proyecto ejecutivo;
- Ejecución, seguimiento e inspección de la obra.

En todas estas fases, es necesario introducir desde el principio los conceptos de gestión de riesgos mediante sistemas de control adecuados para evitar un nivel de riesgo elevado en la construcción y operación del emprendimiento.

Toda esta sistemática se consolida en un **Plan de Gestión de Riesgos** para las obras subterráneas del emprendimiento que incluye una secuencia obligatoria de actividades, representada en la figura 4.

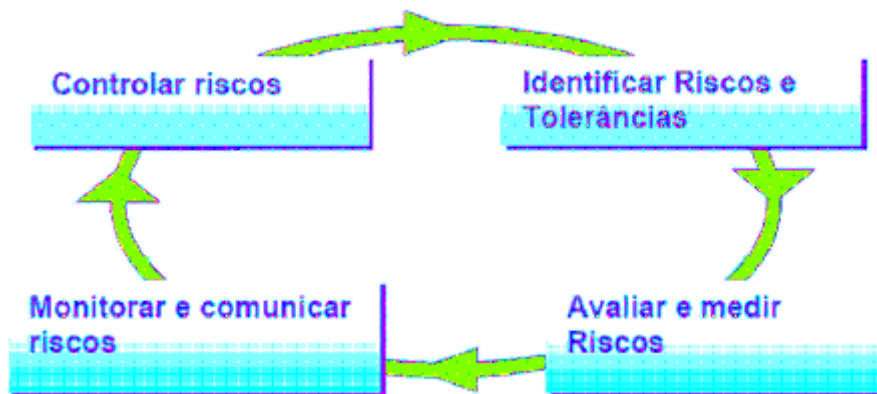


Figura 4 – Actividades del Plan de Gestión de Riesgos de Obras Subterráneas

[Tradução da imagem da figura 4:]

Controlar riesgos / Identificar riesgos y tolerancias / Monitorear y comunicar riesgos / Evaluar y medir riesgos

El **Plan de Gestión de Riesgos** es esencial para reducir riesgos en obras subterráneas actuales. Esto se debe a que las tendencias generales en la industria de la construcción que predominan en los contratos actuales aumentaron mucho el nivel de riesgo con relación a lo que ocurría décadas atrás. Actualmente, la industria de la construcción maneja:

- ◆ Métodos constructivos de alto riesgo
- ◆ Tendencia para contratos de precio global
- ◆ Condiciones de contrato unilaterales
- ◆ Cronogramas exigentes
- ◆ Presupuestos financieros reducidos
- ◆ Competición extrema en la industria de la construcción civil

Todos esos factores aumentan el nivel de riesgo en la construcción y operación del emprendimiento, siendo necesario preparar e implementar el Plan de Gestión de Riesgo en cada obra subterránea para llegar a niveles de riesgo aceptables.

En el transcurso de los últimos años, el nivel de riesgo aumentó tanto en Brasil como en el resto del mundo. Por ejemplo, la figura 5 muestra un colapso ocurrido en Lausanne, Suiza, en la construcción de un túnel que provocó el derrumbe de un edificio en el centro de esta ciudad.



Figura 5 – Colapso en túnel en construcción en Suiza

En las figuras de 6 a 14, pueden verse algunos ejemplos de riesgos excesivos en la construcción de obras subterráneas que acabaron en colapsos.

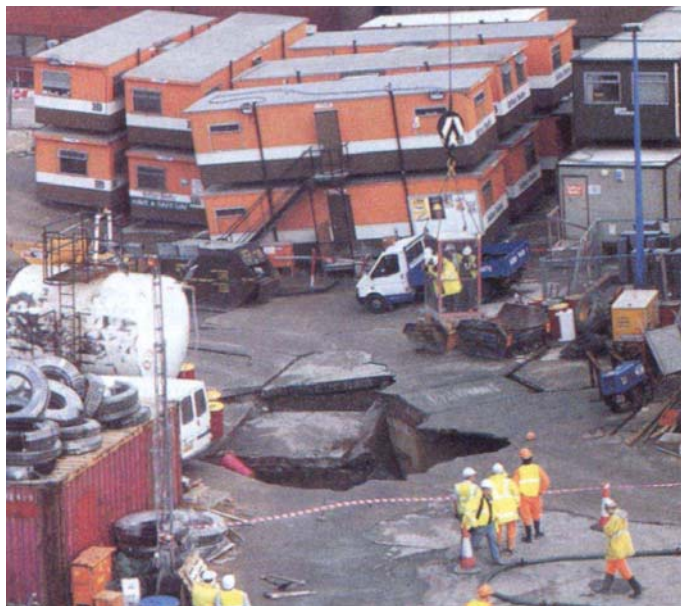


Figura 6 – Aeropuerto de Heathrow, Londres, 1994: inicio del colapso de los túneles con formación de socavón en la superficie



Figura 7 – Colapso de edificio subsiguiente al colapso de los túneles de Heathrow (1994)



Figura 8 – Vista general del área afectada por el colapso (Heathrow, 1994) después de la demolición de los edificios en ruinas



Figura 9 – Colapso del Túnel Hull (interceptor de desagües cloacales), Inglaterra, 1999: asentamientos excesivos y ruptura del macizo por encima del túnel



Figura 10 – Colapso del Metro de Taegu (*cut and cover*), Corea del Sur, 2000



Figura 11 – Colapso del Metro de Shangai, China, 2003



Figura 12 – Otro colapso en el Metro de Shangai, China, 2003



Figura 13 – Colapso en *cut and cover* de sistema vial en Singapur, 2004



Figura 14 – Colapso de obra subterránea en el Metro Kaohsiung, Taiwan, 2005

### **Riesgos en Obras Subterráneas: Panorama de la Última Década**

Las figuras de 5 a 14 muestran casos de gestión inadecuada de riesgos en obras subterráneas no aceptables según los estándares actuales. El panorama de la última década, en la que los riesgos en obras subterráneas aumentaron en parte por el crecimiento del número de obras y en parte por los motivos señalados en el apartado anterior, se puede caracterizar por:

- ◆ Aumento significativo del número de demandas de seguro (*claims*) para cubrir pérdidas causadas por accidentes como los anteriormente vistos;

- 
- ◆ Para las empresas de seguros y reaseguros, la situación llegó a un punto crítico, financieramente hablando, con los ingresos de primas situados muy por debajo de las demandas de seguro, lo que a mediano y largo plazos dificulta o incluso imposibilita la contratación de seguros para obras de ingeniería subterránea, pudiendo inviabilizar muchas de ellas, ya que los organismos multilaterales de financiamiento, como el BID y el Banco Mundial, exigen seguro para sus obras.
  - ◆ El valor de las reparaciones y perjuicios como resultado de accidentes en obras subterráneas es muy superior al costo inicial de la obra, lo que dificulta retomarla y concluirla.

Ante semejante panorama, existe la necesidad urgente de promover procedimientos proactivos de gestión de riesgos para evitar los daños causados por accidentes de gran porte, donde el monto de las pérdidas ocurridas muchas veces inviabiliza la obra.

### **Objetivos y Resultados de Procedimiento de Gestión de Riesgos**

En cada emprendimiento de obra subterránea, es necesario establecer estándares mínimos de evaluación de riesgos y procedimientos de gestión de riesgos. Para ello, hay que definir claramente las responsabilidades de las partes involucradas con la finalidad de reducir las probabilidades de pérdidas, así como el número y tamaño de las demandas (*claims*).

Después del accidente de Heathrow, el HSE – Health and Safety Executive, organismo del Ministerio de Trabajo de Inglaterra, analizó casos históricos recientes de ruptura o colapso de túneles. El HSE (1996) analizó 39 accidentes, ocurridos de 1973 a 1994, clasificados según cinco causas principales de ruptura:

- ◆ causas geológicas no pronosticadas (esta causa es diferente de aquella imprevisible, o sea, se trata de una causa geológica de un accidente que podría haberse previsto, pero que no lo fue por alguna razón);
- ◆ errores de proyecto, especificación y planificación;
- ◆ errores numéricos o de cálculo;
- ◆ errores de construcción;
- ◆ errores de control y gestión.

Los procedimientos de **Gestión de Riesgos** en obras subterráneas deben desarrollarse respetando las siguientes etapas de actividades:

- ◆ Detección de riesgo y acción correctiva

- ◆ Riesgo conceptual
- ◆ Recomendaciones para aumentar la seguridad
- ◆ Cuestionario (complementación de informaciones)
- ◆ Lista de verificación (*check list*)

El procedimiento de detección de riesgo y acción correctiva está ilustrado en la figura 15, en la que se muestra que, en el caso de que ocurra un evento adverso o desfavorable en la construcción del túnel, el incremento de riesgo debe evaluarse y tratarse con medidas mitigadoras lo más deprisa posible, antes de que el riesgo crezca y escape al control (provocando un accidente, colapso, etc.).

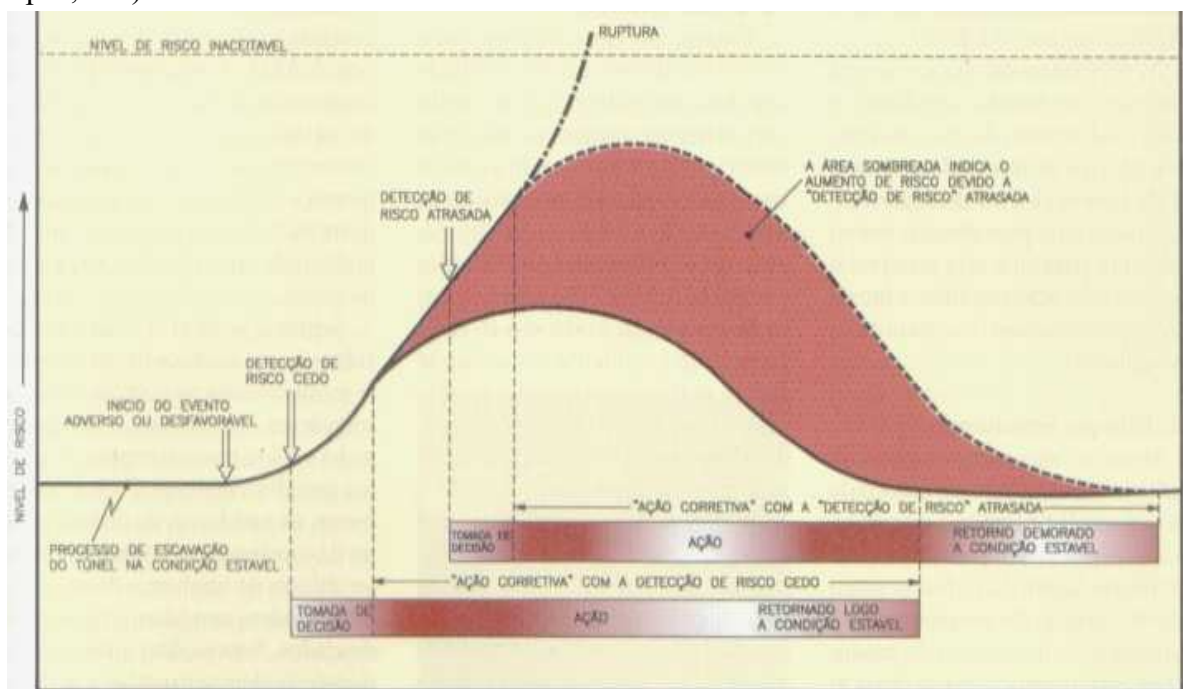


Figura 15 – Procedimientos de detección de riesgo y acción correctiva para la gestión de riesgos en túneles

[Tradução da figura 15:]

Nível de riesgo

Nível de riesgo inaceptable

Inicio del evento adverso o desfavorable

Detección de riesgo temprana

Detección de riesgo tardía

Ruptura

El área sombreada indica el aumento de riesgo debido a “detección de riesgo” tardía

Proceso de excavación del túnel en condición estable

“Acción correctiva” con “detección de riesgo” tardía

Toma de decisión

Acción

Vuelta demorada a la condición estable

“Acción correctiva” con “detección de riesgo” temprana

Toma de decisión

Acción

Vuelta rápida a la condición estable

El riesgo conceptual define los niveles de riesgo en el proyecto, construcción y operación de la obra subterránea. La etapa en la que se puede obtener una mayor reducción del nivel de riesgo de la obra subterránea es en el proyecto (fase preconstrucción). En la fase de construcción, el riesgo debe situarse por debajo del nivel de riesgo aceptable, y en la fase de operación este riesgo debe ser aún más bajo, puesto que los riesgos operacionales suelen ser diferentes de los riesgos constructivos (por ejemplo, colapso en la fase de construcción versus incendio en la fase de operación). La figura 16 ilustra el riesgo conceptual.

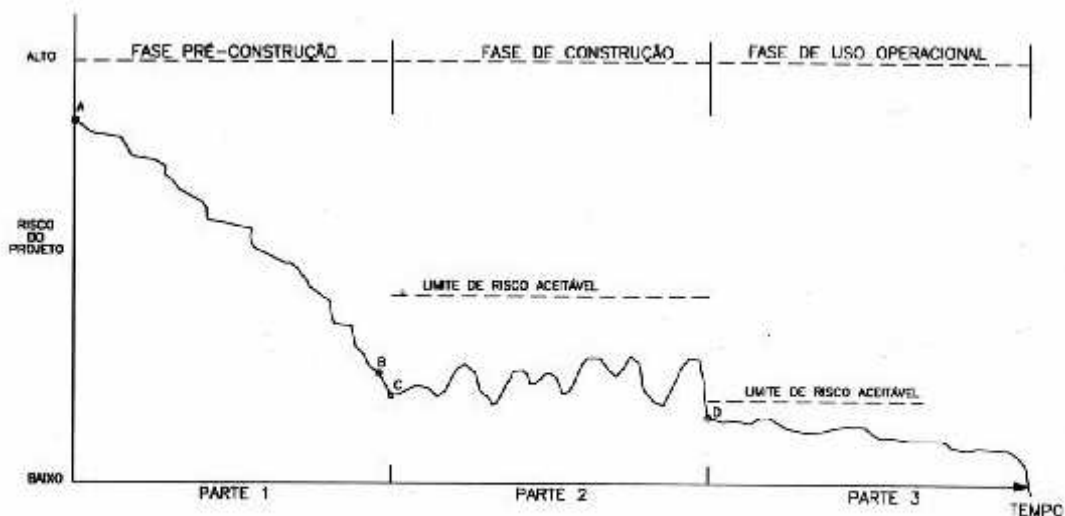


FIGURA 5.2 – Gráfico do risco de projeto desde sua concepção até a final de vida útil do túnel

Figura 16 – Riesgo conceptual en las fases de proyecto, construcción y operación (la fase de proyecto es la que posibilita una reducción mayor de riesgos en el emprendimiento)

[Tradução da figura 16:]

Riesgo del proyecto / Alto / Bajo

Parte 1 / Parte 2 / Parte 3 / Tiempo

Fase de preconstrucción / Fase de construcción / Fase de uso operacional

---

Límite de riesgo aceptable

Límite de riesgo aceptable

Figura 5.2 – Gráfico del riesgo de proyecto desde su concepción hasta el final de la vida útil del túnel

En lo que se refiere a la gestión de riesgos, es importante utilizar herramientas de análisis de riesgos y de decisión que nos lleven a estudiar los problemas geotécnicos de obras subterráneas de un modo más estructurado y formal, con el objetivo de minimizar los riesgos. Con este procedimiento, las decisiones dejan de ser intuitivas y empíricas y pasan a ser más estructuradas. Así, se evita correr riesgos sin antes haber analizado sus consecuencias.

### **Elaboración y Análisis Crítico del Proyecto**

El proyecto y la construcción de obras subterráneas, especialmente las que se ubican en áreas urbanas, generalmente se asocian a un nivel elevado de riesgos debido a la amplia gama de aspectos dudosos que entrañan. Desde el punto de vista de la gestión de riesgos en la construcción, el análisis crítico del proyecto es la primera medida de mitigación de riesgos que se debe tomar y que sirve para identificar los principales riesgos del emprendimiento. La clave del problema radica en evaluar si se observaron los condicionantes principales del proyecto y si los métodos principales de proyecto y construcción de obras subterráneas en áreas urbanas se eligieron, proyectaron y optimizaron con base en conceptos actuales de análisis de riesgos y análisis multicriterios.

La ejecución de obras subterráneas, sea en *cut and cover*, en pozos o en túneles NATM, no es una tecnología exenta de riesgos en la que pesen las innovaciones tecnológicas de los últimos años, como muestran las figuras de 5 a 14. Es necesario comprobar diariamente las condiciones geológicas y geotécnicas encontradas en la excavación para adaptarse a condiciones diferentes a las previstas en un principio, o en el caso de encontrarse ante condiciones anómalas.

El surgimiento de condiciones geológico-geotécnicas diferentes a las previstas da margen a una serie de riesgos que pueden ser desastrosos para el emprendimiento a menos que sean correctamente enfrentados, administrados y optimizados.

Por tanto, la construcción de obras subterráneas siempre tiene que antever la necesidad de una gestión de niveles de riesgo significativos para elegir métodos constructivos, de soporte y tratamiento de los macizos que permitan gozar de un nivel de seguridad adecuado para la obra.

---

Los puntos clave de esta gestión de riesgos son:

1. Identificar los riesgos con antelación;
2. Reconocer los riesgos de inmediato, así que sus señales se manifiesten;
3. Administrar los riesgos por medio de un Plan de Gestión de Riesgos (PGR) que utilice una metodología transparente y efectiva, la cual deberá adoptarse en las etapas iniciales del proyecto y de la construcción, para minimizar el surgimiento de riesgos y/o mitigar sus consecuencias.

Un PGR típico para una obra de excavación subterránea urbana engloba los siguientes aspectos:

- Identificación de riesgos;
- Evaluación, cualificación y cuantificación de riesgos;
- Mitigación de riesgos (definición de las respuestas a los riesgos identificados, incluyendo elecciones correctas de proyecto y construcción);
- Evaluación de riesgos residuales (posterior a las medidas de mitigación);
- Preproyecto de contramedidas para la gestión de riesgos residuales durante la construcción.

El PGR se elabora con objeto de administrar adecuadamente los riesgos residuales, los riesgos aceptables y cualesquier nuevos riesgos que puedan surgir durante el emprendimiento. El PGR requiere el preproyecto de contramedidas (medidas de contingencia), así como las reglas para activar las medidas de contingencia en cada etapa de construcción. Asimismo, el PGR debe ser dinámico, es decir, que es necesario revisarlo y actualizarlo continuamente (en el caso de túneles, con una frecuencia diaria).

---

Desde el punto de vista de la gestión de riesgos, cabe resaltar que:

- El análisis de obras subterráneas y la gestión de riesgos son mutuamente dependientes y deben ocurrir simultáneamente, paso a paso;
- Una evaluación de riesgo correcta y válida solamente se puede obtener como consecuencia del correcto entendimiento del proyecto y del proceso constructivo, lo cual únicamente es posible con un equipo de expertos, consultores e ingenieros con experiencia en el seguimiento diario de la obra;
- Sólo se llega a un proyecto criterioso y robusto de obra subterránea cuando se elabora dentro del planteamiento de la gestión de riesgos.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, es fundamental respetar los siguientes aspectos:

- El proyecto básico de la obra subterránea y de su método constructivo, sistemas de contención, tratamientos de suelo, etc., es la medida más eficaz posible para reducir los niveles de riesgo iniciales del emprendimiento. Para ello, es necesario e importante implementar el Análisis Crítico y de Riesgos del Proyecto, así como la Gestión Sistemática y Continua de los Riesgos durante la Construcción. En el proyecto inicial, el emprendedor debe definir el nivel de riesgo, al principio y durante la construcción, que considera aceptable y que está dispuesto a correr.
- La correcta elección del método constructivo de la obra subterránea es la primera y más importante medida para reducir/mitigar el riesgo o, por decirlo de otra manera, la respuesta primaria a los principales riesgos identificados.

### **Plan de Gestión de Riesgos (PGR) de Obras Subterráneas**

La Ingeniería de Obras Subterráneas tiene que basarse en la constatación de que prácticamente nada es seguro en lo que se refiere a los principales parámetros de partida:

- La interpretación geológica y geotécnica del comportamiento del macizo de suelo o roca;
- La interacción de la obra subterránea con el macizo adyacente de suelo o roca;
- La influencia del ambiente urbano adyacente en la obra subterránea;
- Las variables de método constructivo;
- El tipo de estructura que se va a proyectar y construir.

---

La ingeniería de una obra subterránea es una actividad interactiva que debe observar ciertos aspectos relevantes, tales como:

- Comparación entre lo previsto y lo observado (revelado por la excavación y su seguimiento/monitoreo diario);
- Modificación y ajuste del proyecto inicial a la realidad observada, que evoluciona con la obra y sus excavaciones por medio de un proceso dinámico y continuo (implementación del proyecto inicial, monitoreo de la excavación, seguimiento de la obra y optimización del proyecto) hasta que se termina la obra.

Como consecuencia de ello, la excavación y su control deben ser parte integral de su proceso constructivo para minimizar riesgos.

Como se ha discutido en los principios de Gestión de Riesgos anteriormente presentados, antes de iniciar el proyecto y la construcción de una obra subterránea, como primer paso se deben identificar riesgos potenciales relacionados con el proceso de excavación (geología & geotecnia, proyecto y método constructivo) y evaluar la probabilidad de que ocurran, así como sus consecuencias potenciales (impactos, daños, etc.). El segundo paso se refiere a la necesidad que existe de decidir si el nivel de riesgo identificado requiere que se apliquen medidas para mitigar/reducir riesgos. De ser necesario, el tercer paso consiste en la definición del preproyecto de estas medidas para mitigar/reducir riesgos para su eventual activación y uso durante la construcción.

La aplicación de un PGR requiere el seguimiento y la verificación del proyecto durante la excavación, es decir, el método es dinámico, con la actualización continua de los parámetros de proyecto y construcción de las obras subterráneas que vayan a ejecutarse, con base en los resultados de trechos ya construidos.

En suma, los principios de un PGR son los siguientes:

- **PREVISIÓN**
  - Análisis crítico y de riesgos del proyecto inicial
  - Predefinición de medidas de mitigación/reducción de riesgos
- **MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO**
  - Obras subterráneas
  - Macizo adyacente
  - Estructuras colindantes
- **OPTIMIZACIÓN DEL PROYECTO**

---

- APLICACIÓN DE MEDIDAS PREDEFINIDAS

El Plan de Gestión de Riesgos (PGR) para esta obra incluye identificar los principales riesgos que deben mitigarse y eventuales provisiones para contingencias a efectos de hacer frente a tales riesgos, tanto si la obra cuenta como si no cuenta con seguros que cubran los riesgos identificados.

Es necesario elaborar procedimientos técnicos que conduzcan a un proyecto optimizado de las obras subterráneas. Tales procedimientos serán instrumentales con el fin de administrar riesgos residuales durante la construcción. El PGR específico para cada obra debe desarrollarse contando con la colaboración de todas las entidades implicadas en la obra, incluida la proyectista y consultora especializada, que actuará como promotora y facilitadora del proceso.

Más específicamente, el enfoque técnico que prevalecerá para llevar a cabo con éxito todos los servicios de la Gestión de Riesgos, con integración de las diferentes entidades que intervengan en la obra, es el siguiente:

- Revisión y evaluación de los macizos de suelo y roca presentes en las excavaciones subterráneas, teniendo en cuenta el método constructivo de las obras subterráneas;
- Revisión y evaluación de las incertidumbres y variaciones en las condiciones geológico-geotécnicas identificadas en el proyecto y en el método constructivo;
- Plan de estudio geológico-geotécnico adicional, si fuere necesario;
- Cálculos de estabilidad de las excavaciones subterráneas y evaluación de las necesidades de contenciones/soportes/tratamientos de suelo;
- Elaboración de un Registro de Riesgos que contenga riesgos identificados (iniciales, geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, de proyecto y construcción) referentes a las obras subterráneas, estimación de la probabilidad de que ocurran y respectivos impactos, así como medidas sugeridas de proyecto y construcción para reducir los riesgos iniciales a niveles aceptables;
- Verificación del monitoreo geotécnico, y su adecuación, para evaluar el comportamiento de las obras subterráneas, de los macizos y del medio urbano adyacente.

Para llevar a cabo este trabajo resulta imprescindible disponer de un equipo altamente cualificado de ingenieros geotécnicos especializados y de un consultor. Es necesario realizar

---

visitas periódicas al lugar de las obras para integrarse con el equipo de la constructora y de sus contratados y para comprender los requisitos del proyecto y las necesidades específicas de la construcción. La consultora debe actuar de forma integrada y cooperar con las directrices de la constructora del propietario.

El “**Código de Práctica para la Gestión de Riesgo en Obras de Túneles**”, cuyo lanzamiento de la versión en portugués fue objeto del evento en el que el autor dictó una conferencia, es un documento relevante para la buena práctica de la Ingeniería de Obras Subterráneas, organizado por The International Tunnelling Insurance Group (ITIG) – Grupo Internacional de Seguros de Túneles, vinculado al ITA (International Tunnelling Association). Este documento tiene por objeto promover y asegurar la mejor práctica para minimizar y administrar riesgos asociados al proyecto y a la construcción de túneles, pozos y obras similares. En el documento se establece una práctica para la identificación de riesgos, su asignación para las partes de un contrato y la gestión y control de riesgos mediante la utilización de evaluaciones de riesgo y registros de riesgos.

Estas son condiciones usuales, adecuadas y aceptadas por las compañías de seguros más respetadas para un completo plan de gestión de riesgos destinado a obras subterráneas.

Los procedimientos de gestión, instrumentación y ejecución de las obras son complejos y requieren un elevado grado de conocimiento técnico y ejecutivo. Cada túnel posee diversos eventos potencialmente generadores de riesgo. Estos eventos deben clasificarse de acuerdo con su grado de riesgo a la seguridad, economía y eficiencia de la obra.

Para determinar el grado de riesgo de cada evento, se puede utilizar la clasificación probabilística presentada en la tabla 1, en la que, mediante la frecuencia de casos ocurridos de un determinado evento, se define la probabilidad del riesgo para la obra.

Frecuencia / Probabilidad	
< 10%	Bajo
10 – 50%	Mediano
> 50%	Alto

**Tabla 1:** Clasificación de frecuencia / probabilidad del riesgo

---

Los eventos de riesgo se presentan en dos tablas: **tabla 2** (parte A) y **tabla 3** (parte B). La parte “A” incluye las categorías de riesgo más comunes en obras subterráneas, como túneles NATM. En esta tabla, se exponen las características principales de cada evento y la evaluación del riesgo se divide en tres factores principales:

- Probabilidad de que ocurra;
- Consecuencia o impacto;
- Riesgo inicial.

La tabla “B” presenta las medidas correctivas que se deben adoptar para reducir el riesgo de cada evento en tres etapas:

- Metodología para detectar el riesgo;
- Medidas para reducir el riesgo;
- Análisis del riesgo residual.

La composición de las tablas A y B resume, de forma simplificada, el análisis de riesgo de este tipo de obra subterránea (túneles NATM) al incluir los principales eventos potencialmente causadores de disconformidades y generadores de riesgo. Estos eventos pueden ocasionar daños relevantes y graves e, incluso, el colapso parcial del emprendimiento. Estas tablas son ejemplificativas e hipotéticas, por lo que se deben adecuar a la especificidad de cada obra subterránea para poderse aplicar en situaciones reales.

Evento	Riesgo	Características Principales	Evaluación de Riesgo		
			Probabilidad de Ocurrencia	Consecuencia o Impacto	Riesgo Inicial
1	Estabilidad de frente	Cara inestable por flujo de agua y/o suelo poco conexo y/o caída de bloques y suelo rígido agrietado.	Mediano	Alto	Mediano
2	Asientos y convergencias – divergencias excesivas	Desplazamientos excesivos que generan deformaciones del macizo y convergencias o divergencias elevadas.	Bajo	Mediano	Bajo
3	Esfuerzos elevados en el revestimiento	Cargas elevadas pueden dar como resultado esfuerzos elevados en el revestimiento y sus uniones. La armadura y el factor de seguridad del revestimiento deben ser capaces de absorber esfuerzos anómalos con seguridad.	Bajo	Mediano	Bajo
4	Tratamientos de suelo	Tratamientos de suelo con problemas de ejecución pueden provocar casos de infiltración de agua, inestabilidad de la cara, asientos excesivos, etc.	Bajo	Alto	Bajo
5	Pérdida de estabilidad en la excavación de la bancada	Avances excesivos en la excavación de la bancada pueden producir grietas en el revestimiento y/o pérdida de estabilidad de la sección.	Mediano	Alto	Bajo
6	Seguimiento o monitoreo de obra inadecuado	Los túneles NATM requieren un seguimiento de la construcción y monitoreo de la instrumentación diarios para evaluar la conformidad de los métodos constructivos y la adecuación de la seguridad de la excavación.	Bajo	Mediano	Bajo
7	Error humano	Para construir túneles NATM, es necesario poseer un elevado grado de especialización y experiencia con objeto de evitar errores operacionales. Errores y accidentes ocurren cuando la organización de la obra es deficiente, el equipo no es el apropiado y se sufren presiones elevadas en lo que se refiere al costo/cronograma de la obra.	Bajo	Bajo	Bajo

**Tabla 2: Parte A – Categorías de riesgo – Túnel NATM (ejemplo).**

Evento	Riesgo	Detección del Riesgo	Medidas de Reducción del Riesgo	Riesgo residual
1	Estabilidad de frente	Infiltración de agua en la excavación, grietas en el revestimiento, deformaciones excesivas, asientos importantes, daños en edificaciones cercanas, lecturas de instrumentación anómalas/elevadas, no estabilizadas.	Adhesión al método constructivo especificado en proyecto, aprobado y validado, drenaje de frente, tratamiento de suelo, reducción del paso de avance de la bóveda y/o bancada, clavado de la cara, etc. Es posible que sea necesario elaborar medidas para restablecer el nivel de seguridad adecuado de la obra.	Bajo
2	Asientos y desplazamientos excesivos	Lecturas de instrumentación anómalas/elevadas/ no estabilizadas, grietas en el revestimiento, daños en el arco invertido, etc.	Control diario del proceso constructivo, verificación y control de calidad de los tratamientos de suelo, verificación del paso de avance de la cimbra y de la bancada, etc.	Bajo
3	Esfuerzos elevados en el revestimiento	Deformaciones en el revestimiento, grietas, convergencias excesivas, anomalías en el hormigón lanzado, deformaciones en las barras de las cimbras metálicas, asientos excesivos en las bases de las cimbras, monitoreo/instrumentación del refuerzo del revestimiento con cimbras, etc.	Excavación cuidadosa según procedimiento especificado en proyecto, aprobado y validado, reducción de la separación entre cimbras, utilización de mallas metálicas o fibras metálicas para armar el hormigón lanzado del revestimiento, tratamientos de suelo, redimensionamiento del revestimiento, etc.	Bajo
4	Tratamientos de suelo	Seguimiento "pari passu" de la ejecución de tratamientos, control de ejecución riguroso por unidad de tratamiento, control geométrico de ejecución.	Proyecto ejecutivo detallado, aprobado y verificado de los tratamientos de suelo, monitoreo de la ejecución y del análisis del desempeño de los tratamientos de suelo, pruebas de control de calidad, etc.	Bajo
5	Pérdida de estabilidad en la excavación de la bancada	Lecturas de instrumentación anómalas/elevadas/no estabilizadas. Grietas en el revestimiento de la bóveda, caída de bloques de la cara de la excavación, etc.	Control riguroso de la excavación, con monitoreo e instrumentación. Reducción del paso de avance de la bancada, refuerzo de la excavación de la bancada, refuerzo del sistema de drenaje, etc.	Bajo
6	Seguimiento y monitoreo de obra inadecuados	Equipo insuficiente y sin experiencia para realizar el monitoreo/seguimiento técnico, falta de procedimientos adecuados de cara al monitoreo/seguimiento diario, equipo sin entrenamiento o experiencia en obras subterráneas, plan de gestión de riesgo inadecuado para las características de la obra, etc.	Procedimientos adecuados de monitoreo y seguimiento de obras, procedimientos de verificación y adhesión al proyecto ejecutivo, entrenamiento adecuado de los responsables del seguimiento y monitoreo de la obra, evaluación y adecuación de los procedimientos.	Bajo
7	Error humano	Riesgo aleatorio, en el caso de que las medidas de reducción del riesgo anteriormente descrito hayan sido implementadas de forma satisfactoria.	Antes de comenzar la operación, es necesario capacitar/entrenar al personal involucrado en la obra para familiarizarlo con los procedimientos anteriores y con los procedimientos de riesgo del proyecto. Hay que prever sistemas de supervisión y control y actuar en conformidad con ellos durante toda la obra. Validación de procedimientos y actividades por empresa especializada en obras subterráneas. Sistemas de control y monitoreo on line, verificados y validados.	Bajo

**Tabla 3: Parte B – Medidas de reducción de riesgo, en el caso de que ocurra, como consta en la parte A – Túnel NATM (ejemplo).**

## 1. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este trabajo técnico presentó consideraciones sobre “Análisis y Gestión de Riesgos en la Construcción de Obras Subterráneas”. En virtud de la complejidad geológica y de los desafíos técnicos de este tipo de obra, se comprueba que existe la necesidad de adoptar medidas de seguridad y cautela adicionales a las de las obras convencionales, tales como elaboración e implementación de planes de gestión de riesgo, análisis crítico y validación de proyectos, seguimiento técnico de obra, monitoreo y otros procedimientos de mitigación de riesgo.

Para reducir o eliminar riesgos inherentes al proyecto y a la ejecución de obras subterráneas, normalmente ejecutadas en regiones complejas desde un punto de vista geológico, se recomienda observar el “Código de Práctica para la Gestión de Riesgos en Obras de Túneles”, propuesto por The International Tunnelling Insurance Group (ITIG).

En este trabajo se presentan los riesgos potenciales inherentes a las principales actividades de construcción de túneles y obras subterráneas. Asimismo, se hacen constar las principales medidas que deben adoptarse en la obra y que son necesarias para caracterizar ciertos aspectos relevantes, como los siguientes:

- Seguridad de la obra;
- Medidas para mantener los riesgos de construcción dentro de niveles aceptables, teniendo en cuenta las características geológicas (normalmente complejas) de cada obra subterránea;
- Economía de la obra, considerando factores como cronograma e impacto de la obra en el medio ambiente;
- Criterios empleados en el proyecto que dan como resultado una obra económica y segura.

El trabajo incluye planillas en las que, de forma resumida, se ejemplifican los riesgos con potencial para concretizarse en la obra en función de la frecuencia con que ocurrieron en obras similares y probabilidad del incremento del riesgo global de la obra. Las planillas también incluyen el grado de intensidad de dichos riesgos para tenerlos en cuenta en el Plan de Gestión de Riesgos de la obra.

Se recomienda habituarse a preparar un PGR específico, adecuado a las características de cada obra subterránea, e implementarlo.

Para obtener éxito en las diferentes fases de un emprendimiento de obra subterránea (proyecto,

construcción y operación), es necesario equilibrar demandas de gestión de riesgo entre condiciones geológicas / proyecto estructural / sistemas de refuerzo y tratamiento de suelos, por un lado, y gestión del emprendimiento, por otro lado (supervisión, entrenamiento, monitoreo de la obra, relación entre el cliente y el constructor, calidad de la mano de obra e interpretación del monitoreo). La figura 17 ilustra este concepto de equilibrio entre gestión del emprendimiento y gestión de riesgos.

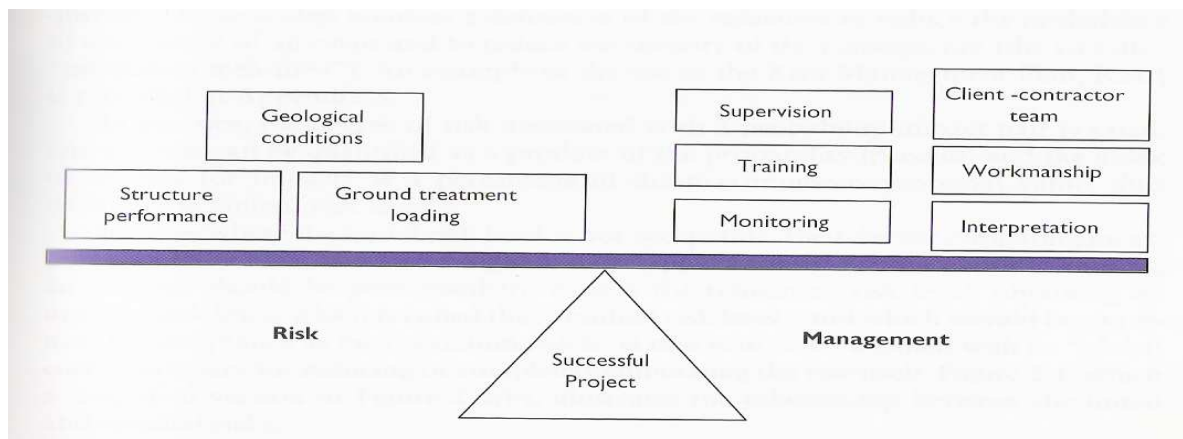


Figura 17 – Concepto de equilibrio entre gestión del emprendimiento y gestión de riesgos

Otras ideas, como las que figuran a continuación, también son importantes para minimizar la probabilidad de encontrar condiciones inesperadas de naturaleza crítica:

- ◆ Planificar el estudio geológico-geotécnico en más de una etapa y en función del método constructivo seleccionado;
- ◆ Seleccionar el método constructivo en función de las condiciones geológicas y geotécnicas utilizando análisis de riesgos y de decisión;
- ◆ Al principio del proyecto, identificar los riesgos y mejorar las estrategias de control de riesgos efectivos;
- ◆ Buscar apoyo de la A.T.O. (Asesoría Técnica de la Obra);
- ◆ Elaborar planes y procedimientos de contingencia;
- ◆ Perfeccionar procesos de ingeniería, proyecto y construcción;
- ◆ Implementar la práctica corriente en otros países del *peer review* (análisis crítico – revisión y validación de proyectos);
- ◆ Implementar la contratación al mejor precio (precio final más bajo para el conjunto proyecto – obra – operación – mantenimiento) y no al menor precio de construcción;
- ◆ Iniciar la obra solamente cuando se disponga del proyecto ejecutivo detallado;
- ◆ Implantar una cultura de seguridad entre:

- Projectistas
- Constructores
- Propietarios

Asimismo, es fundamental que cada obra tenga un RMP – *Risk Management Plan* (Plan de Gestión de Riesgos) y un RR – *Risk Register* (Registro de Riesgos), elaborado específicamente para cada túnel y obra subterránea de tal forma que, en conjunto con la lista de verificación (*check list*), reduzca los riesgos en la construcción.

Cabe recordar que ningún proyecto de obra subterránea está libre de riesgos. Los riesgos se pueden administrar, minimizar, compartir, transferir o aceptar, pero jamás se pueden ignorar. Con estos procedimientos y procesos, los éxitos serán cada vez más frecuentes y, por ende, la falta de éxito será cada vez menos frecuente.

### **Agradecimientos**

Este trabajo es un homenaje al Prof. Dr. Nelson Infanti, eminente profesional de la Geología brasileña, pionero en el análisis y gestión de riesgos geológicos.

### **Referencias Bibliográficas**

1. “NATM for Tunnels in Soft Ground, - Design and Practice Guide”, ICE - The Institution of Civil Engineers, Thomaz Telford, Londres, Inglaterra, 1996).
2. “Riscos Associados a Obras Subterrâneas”, Prof. Andre Assis, Palestra, CBT, 2006
3. “Segurança, Colapso e Ruptura de Túneis Urbanos em NATM”, Francisco Ribeiro e Roberto Kochen, Revista Engenharia no. 540, Instituto de Engenharia, São Paulo, SP, 2000.
4. “Tunnelling Insurance”, Hartmut Reiner, evento de lanzamiento del Código de Práctica para la Gestión de Riesgos en Obras de Túneles en la versión en portugués, Munich Reinsurance Company, São Paulo, 2008.
5. “Munich Re and Engineering Business”, Achim Ferman, evento de lanzamiento del Código de Práctica para la Gestión de Riesgos en Obras de Túneles en la versión en

portugués, Munich Reinsurance Company, São Paulo, 2008.

6. “Riscos em Obras Subterrâneas – Identificação, Mitigação, Eliminação”, Roberto Kochen, evento de lanzamiento del Código de Práctica para la Gestión de Riesgos en Obras de Túneles en la versión en portugués, Munich Reinsurance Company, São Paulo, 2008.
7. “Risco Geológico em Obras Civis”, Eraldo Pastore, Revista Engenharia no. 592, Instituto de Engenharia, São Paulo, SP, 2009
8. “The Risk to Third Parties from Bored Tunnelling in Soft Ground”, W. S. Atkins, Health and Safety Executive – HSE, Research Report 453, Londres, Inglaterra, 2006.
9. “Gerenciamento de Riscos em Obras Subterrâneas”, Diego de Almeida Pereira & André Assis, SAT – South American Tunnelling, São Paulo, 2008.
10. “Risk Management Applied to Mechanized Tunneling in Urban Areas”, Piergiorgio Grasso, Vittorio Guglielmetti & Shulin Xu, SAT – South American Tunnelling, São Paulo, 2008.
11. “Options and Risks for Hard Rock Shield TBM”, Ernst Buchi, Felsbau 25, No. 5, 2007.