

Gestão de Risco em Túneis - Diretrizes

Henrique Leoni Rodrigues da Cunha
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, hlrcunha@gmail.com

Cainã Bemfica de Barros
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, cainabemfica@gmail.com

André Pacheco de Assis
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

RESUMO: Diferentemente de outras áreas da engenharia civil — como zoneamento sísmico, escorregamento de taludes, inundações, entre outros —, a gestão de risco em túneis é pouco aplicada e relativamente recente (CARVAJAL *et al.*, 2012). Desta forma, faz-se necessária uma popularização do tema, visto que é tendência mundial uma mudança de paradigma, como no caso da licitação do metrô de Copenhague. O objetivo deste trabalho é apresentar as diretrizes recomendadas pela ITA (International Tunneling and Underground Space Association) para a gestão de risco em túneis; descrever brevemente as ferramentas utilizadas para as análises necessárias; e apresentar a análise de risco de projeto e execução para um túnel.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Riscos, Túneis, Árvore de Falhas.

1 INTRODUÇÃO

A engenharia de túneis contemporânea é resultado de uma evolução histórica, começando com os modelos de cálculo empíricos — como os métodos alemão, austríaco, entre outros — e culminando em modelos sofisticados, capazes de simular numericamente o comportamento de maciços heterogêneos, os deslocamentos induzidos pela construção, e muito mais. Entretanto, até mais recentemente, todos os métodos de cálculo consideravam que as propriedades dos materiais nos quais o túnel seria escavado eram constantes, uma premissa raramente válida e que pode levar o projetista a conclusões errôneas. Surge nesse contexto então a abordagem probabilística: os materiais agora têm um comportamento estocástico, com suas propriedades variando de acordo com uma distribuição de probabilidade. Tal abordagem — que permite a determinação da probabilidade de falha de uma estrutura em vez do fator de segurança — é uma importante evolução na

mentalidade dos engenheiros, que agora admitem a existência de riscos inerentes a qualquer obra civil. Para a determinação de tal probabilidade, utilizam-se várias técnicas de análise de risco, tanto quantitativas como qualitativas. O objetivo deste trabalho é descrever brevemente a gestão de riscos; apresentar as *guidelines* propostas pelo ITA e as ferramentas de análise mais utilizadas; e apresentar uma análise de risco qualitativa.

2 GESTÃO DE RISCOS

A gestão de riscos pode ser definida como a cultura, os processos e as estruturas voltadas para a concretização de oportunidades potenciais, ao mesmo tempo em que se gerenciam os efeitos adversos que venham a surgir (PERINI, 2009). Esse tipo de gestão abrange as técnicas de análise de riscos, o processo de tomada de decisões em caso de um sinistro, o estudo econômico dos diferentes cenários possíveis, a especificação de cláusulas de contratos, entre outros. Para que sua

implementação seja adequada, é necessário que todas as fases do projeto sejam englobadas; cada fase apresenta um enfoque diferente, já que as informações as quais o projetista tem acesso são de diferentes ordens de precisão: durante o projeto básico, o enfoque são os riscos globais, como atividade sísmica ou riscos políticos; já nas etapas finais, o objetivo é um cálculo mais preciso das probabilidades de falha das diferentes formas de ruptura, como por falta de resistência mecânica do maciço.

De acordo com a ITA (2004), são três as etapas necessárias para a implementação da gestão de riscos: a primeira, que é realizada durante os estudos de viabilidade e do projeto conceitual; a segunda, que ocorre na fase de licitação e de elaboração dos contratos; e a terceira, que é realizada durante a construção do empreendimento.

A primeira etapa é iniciada pela adoção de uma política de riscos, que é definida pelo contratante, e consiste na determinação de limites que definem quais ações serão adotadas. Para riscos acima do limite superior, é necessária a adoção de medidas que os reduzam, independentemente do custo; para aqueles abaixo do limite inferior, nenhuma intervenção se faz necessária; para aqueles situados entre os dois limites — a zona chamada ALARP (*as low as reasonably practicable*) —, os riscos devem ser mitigados, desde que de forma economicamente viável. Um esquema baseado na curva de aceitação de riscos da Geotechnical Engineering Office, de Hong Kong, é mostrado na Figura 1.

Após a definição desta política, é realizada a primeira análise dos riscos, que pode ser qualitativa, visto que pode não haver parâmetros suficientes para uma análise quantitativa. É importante que esta análise seja realizada na fase de pré-projeto a fim de permitir uma mudança na concepção do projeto caso os riscos se mostrem inaceitáveis (International Tunnelling Association, 2004). Caso algum risco mais importante seja identificado, torna-se necessária uma análise mais aprofundada. Neste caso, utilizam-se as ferramentas como árvores de falhas e de eventos. Caso um possível cenário seja identificado, mas não possa ser avaliado por

conta da ausência de dados mais adequados ou por alguma outra razão, cria-se o chamado registro de risco, uma análise qualitativa na qual os possíveis cenários são identificados — mas não quantificados — e podem ser reavaliados a *posteriori*.

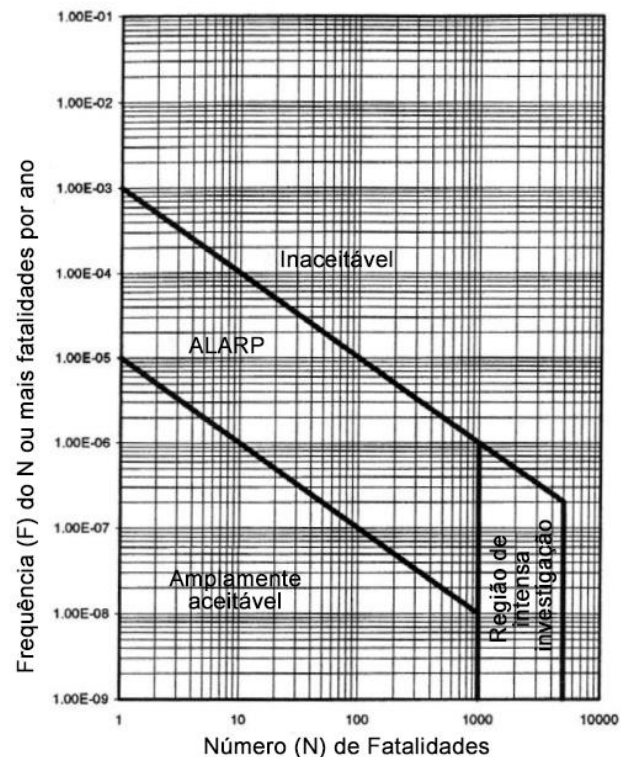


Figura 1. Curvas de aceitação de riscos (FELL, et al., 2005).

Na segunda etapa é feita implementação contratual das ações necessárias para que a política de riscos seja assegurada. É feita uma alocação dos riscos entre as partes de tal forma que aquela mais capaz de controlá-los será a responsável. É importante também definir em contrato a possibilidade de algum risco não detectado previamente ser estudado em fases mais avançadas de projeto.

Na terceira etapa, uma característica importante surge: os riscos dificilmente podem ser transferidos, como por meio da compra de uma apólice; o ideal agora é mitigá-los, em especial na parcela dos danos subsequentes. Nesta etapa, a gestão é feita de forma conjunta entre o empreiteiro, o projetista e o cliente; os empreiteiros e os projetistas definem uma política de análise e mitigação dos riscos, que é ou não aceita pelo cliente, que os supervisiona e os auxilia.

3 RISCOS E PERIGOS

O risco é dependente de uma probabilidade de ocorrência, a vulnerabilidade das vidas ou bens expostos e das consequências induzidas caso ocorra à falha. Já o perigo é o potencial de causar, quando não controlado, uma perda, desastre, morte ou outra ocorrência prejudicial. Assim, o risco é a quantificação do efeito em potencial do perigo.

Para avaliar os riscos é necessário conhecer os perigos. A Tabela 1 apresenta os perigos mais comuns e o fator que pode estar associado.

Tabela 1. Perigos comuns. Adaptado de Gattinoni et al. (2014).

Perigo	Fator Controlador
Queda de rocha	Condição estrutural não favorável: -Descontinuidade primária (fissuras de resfriamento, estratificação e xistologia) -Descontinuidade secundária (fraturas e falhas de origem tectônica, dobras, dissolução cártisca)
	Sismicidade
Instabilidade da parede lateral - "rock burst", lascagem e deslocamento	Condição estrutural não favorável: Litologia (rocha com comportamento frágil) Estado de tensões (altas profundidades, dobras, compressão entre rochas)
	Sismicidade
Convergência ou divergência	Litologia (rocha com comportamento dúctil) Estado de tensões Condições hidrogeológicas
Colapso de face	Litologia: solos pouco coesivos ou rochas soltas Condição estrutural favorece o deslizamento Condições hidrogeológicas Sismicidade Contração devido a altas tensões
Afluxo, rebaixamento e extinção de nascente	Permeabilidade Condição estrutural Condições hidrogeológicas
Entrada de Gases	Litologia Condição estrutural
Temperatura Alta	Profundidade alta Proximidade a corpos magmáticos
Superfície de Fixação e cavidades	Litologia (Rochas soltas e fracas) Profundidade baixa Condições hidrogeológicas

4 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Há muitas ferramentas para a avaliação e gestão dos riscos. Todas buscam quantizar a probabilidade de falha e as consequências das possíveis rupturas. Somente uma forma de quantizar a probabilidade será apresentada nesse trabalho.

A árvore de falhas (*Fault tree*) é um diagrama lógico que relaciona diferentes eventos-causa e estabelece a relação lógica entre eles, podendo ser do tipo E ou do tipo OU. Sua utilização pode ocorrer para indicar as possíveis razões de um comportamento inadequado de uma estrutura, por exemplo. A Figura 2 apresenta um exemplo de árvore de falhas.

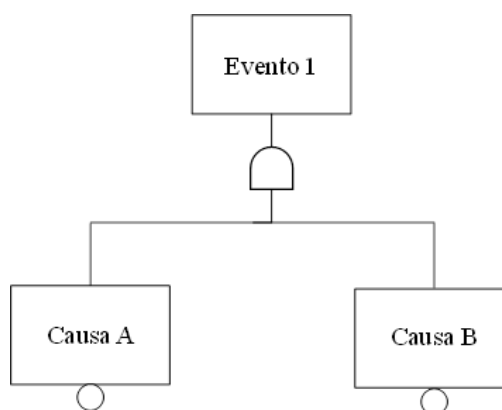


Figura 2. Árvore de Falhas.

5 RISCO NA FASE DE PROJETOS

Na concepção do projeto é necessário avaliar as possíveis formas de ruptura para o túnel, e as causas relacionadas. Com o intuito de demonstrar as verificações mínimas necessárias ao projetista, foi construído a árvore de falhas apresentada na Figura 3.

É ideal que o projetista avalie o máximo de condições que o túnel pode ser submetido na sua vida útil para que o projeto contemple todas as soluções previamente calculadas e dimensionadas. Mas na prática, não é assim que acontece, seja pela falta de informação ou variabilidade do local de execução, seja pela impossibilidade prática de prever todas as condições. Dessa forma, ainda temos muitos riscos na execução que serão apresentados na seção seguinte.

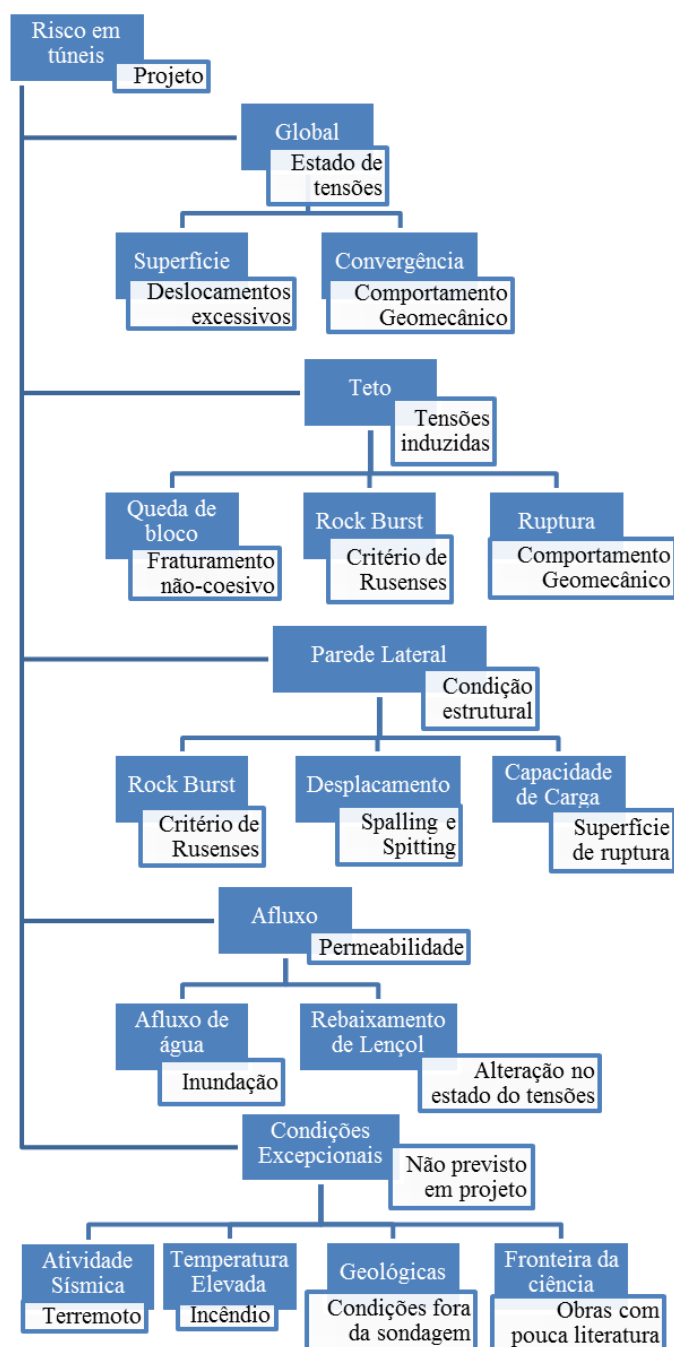


Figura 3. Árvore de Falhas para análise em projeto.

6 RISCO NA EXECUÇÃO

A execução tem uma grande participação na ocorrência de acidentes em túneis. Tendo em vista que a detecção dos itens que pode levar a falha por vezes não é tão óbvia, podendo passar despercebido algum dos detalhes, também foi concebida uma árvore com as falhas mais comuns para a etapa de execução, apresentada na Figura 4.

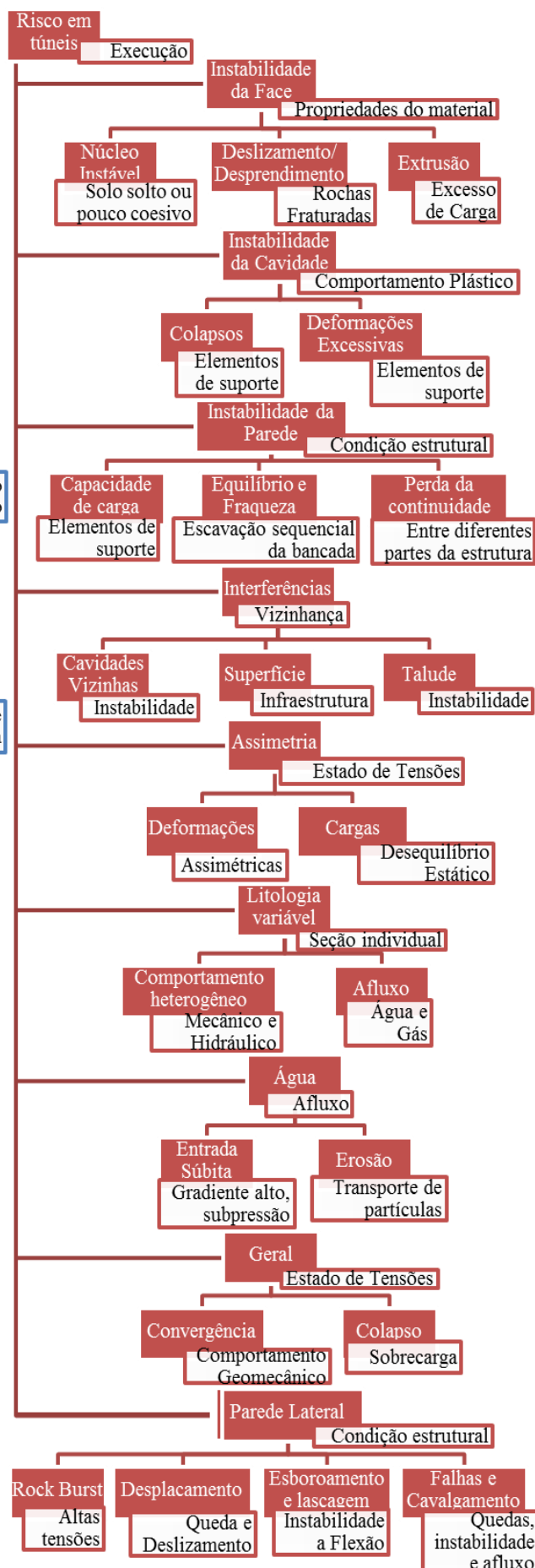


Figura 4. Árvore de Falhas durante a execução.

A melhor forma de mitigar os perigos com eficiência é conhecer as técnicas e métodos que possam ser aplicadas para cada risco. A Tabela 2 apresenta algumas formas que podem ser utilizadas a fim de controlar o perigo.

Tabela 2. Mitigação dos perigos na execução. Adaptado de Gattinoni et al. (2014).

Perigo	Principais elementos de mitigação
Instabilidade	Face Para ser aplicado no núcleo durante a fase de avanço: -Tirantes cimentados ou injetados (parafusos GRP, auto-atarrachantes) -Colunas de "jet-grouting" -Injeções
	Para ser aplicado na face: -Concreto projetado reforçado com fibra
	Cavidade Primeira camada do revestimento com arco invertido circular ou sub-circular o mais próximo da face possível Atirantamento Radial
	Primeira camada do revestimento com suportes transversais de aço elástico e elementos deformáveis
Interferência	Parede Primeira camada do revestimento com cambotas metálicas com base alargada ou fechando a seção com o arco invertido Reforço na base da primeira camada de revestimento com "jet-grouting" ou micro-estacas
	Cavidades Primeira camada do revestimento rígida com arco invertido Tirantes, grampos e cabos no pilar entre as duas cavidades Injeções
	Superfície Primeira camada do revestimento rígida com arco invertido Injeções Congelamento
	TBM pressurizada com revestimento de concreto pré-moldado a prova d'água
Talude	Primeira camada do revestimento rígida com arco invertido o mais próximo da face possível Enfilagens adiantadas Abóboda em "jet-grouting"
	Para ser aplicado no núcleo durante a fase de avanço: -Tirantes cimentados ou injetados (parafusos GRP, auto-atarrachantes) -Colunas de "jet-grouting" -Injeções
	Para ser aplicado na face: -Concreto projetado reforçado com fibra
	-Concreto projetado reforçado com fibra

Tabela 2. Mitigação dos perigos na execução. Adaptado de Gattinoni et al. (2014). (continuação)

Assimetria	Primeira camada de revestimento reforçada (cambotas metálicas, barras de aço de reforço, aumento de resistência da seção)
	Restrição da tensão-deformação por atirantamento radial
Seção com litologia variável	Primeira camada de revestimento reforçada (cambotas metálicas, barras de aço de reforço, aumento de resistência da seção)
	Limitar tensão-deformação por tirantes radiais
	Drenagem antecipadamente Derramamento
Água	Entrada súbita Drenagem antecipadamente Injeções a prova d'água Congelamento
	Erosão Primeira camada de revestimento imediatamente Drenagem antecipadamente Injeções a prova d'água Congelamento
	Convergência Primeira camada de revestimento incluindo o arco invertido executada o mais próximo possível da face com geometria circular ou sub-circular
	Geral Enfilagens Abóboda em "jet-grouting"
Colapso	Para ser aplicado no núcleo durante a fase de avanço: -Tirantes cimentados ou injetados (parafusos GRP, auto-atarrachantes) -Colunas de "jet-grouting" -Injeções
	Para ser aplicado na face: -Concreto projetado reforçado com fibra -Primeira camada do revestimento o mais próximo da face possível
	Parede Lateral "Rock burst", lascagem, deslocamento Primeira camada do revestimento com suportes transversais de aço o mais próximo da face possível Atirantamento Radial ou grampos Malhas de alta absorção de energia
	Primeira camada do revestimento tendo alta absorção de energia o mais próximo da face possível Drenagem na região da falha Enfilagens Derramamento Parafusos GRP antecipadamente Injeções

7 CONCLUSÃO

A gestão de riscos é a nova realidade da engenharia. Isso se deve à nova mentalidade em que engenheiros e sociedade não assumem as obras civis infalíveis. Sua aplicação legal já está presente em muitos locais no mundo, como Austrália, Europa, etc. Sendo assim, é de fundamental importância que engenheiros de todas as áreas, em especial aquelas nas quais há possibilidade de ocorrência de grandes desastres, como barragens, túneis, encostas, etc., comecem a se habituar a nova prática de projeto.

Os perigos em túneis são de fontes variadas e com causas das mais diversas possíveis, as árvores de falhas apresentadas neste trabalho cumprem com o objetivo de listar as principais ocorrências em túneis para serem analisados pelos projetistas ou pelos executores, sendo um ponto de partida para gestão de riscos. Em um projeto real, devem-se determinar as probabilidades para cada ponto da árvore.

Quando os perigos são percebidos na fase de execução, os impactos são normalmente mais onerosos e mais difíceis de mitigar. Assim a atenção dos envolvidos na execução deve estar voltada para cada detalhe e dividida em uma infinidade de condições adversas que pode levar a falha da frente de escavação, de uma seção ainda não completamente estabilizada, de elementos na superfície ou de estruturas vizinhas. Os riscos na execução devem ser reduzidos sempre que possível e de forma eficiente a fim de evitar mortes e um colapso geral.

REFERÊNCIAS

- Carvajal, Hernán Eduardo Martínez, Guerrero, Jorge Esteban Alarcón e Assis, André Pacheco (2012). *Análise e Gestão do Risco*. Tópicos sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicada a Solos Tropicais. Brasília : s.n., pp. 429-444.
- Fell, R., et al. (2005). *A framework for landslide risk assessment and management*. Hong Kong : s.n.
- Gattinoni, Paola, PIZZAROTTI, Enrico e SCESI, Laura (2014). *Engineering Geology for Underground Works*, Springer, pp. 143-166.
- International Tunnelling Association (2004). *Guidelines for Tunnelling Risk Management*. International

- Tunnelling Association, Tunnelling and Underground Space Technology, pp. 217-237.
- Perini, Daniel Sosti (2009). *Estudos dos processos envolvidos na análise de risco de barragens de terra*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 128 p.