

Aplicação das Análises FMEA/FMECA ao Gerenciamento de Riscos Geotécnicos em Obras Subterrâneas de Túneis

Coelho, Adoniran Martins

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, adoniran.coelho@vale.com

Gouveia, Antônio Maria Claret

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, claretgouveia@uol.com.br

Costa, Filipe Fernandes Souza

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, fernandesscosta@hotmail.com

RESUMO: A construção de túneis e obras subterrâneas sempre foi particularmente afetada por incidentes, nomeadamente colapsos com consequências trágicas, a que nos últimos anos se tem dado uma maior importância. O desenvolvimento de novas tecnologias construtivas e equipamentos específicos permitiram que túneis cada vez mais extensos fossem construídos em menores intervalos de tempo, no entanto, o elevado grau de incerteza que caracteriza este tipo de obras, devido à variável e complexa envolvente geológica, pode muitas vezes sujeitá-las a problemas que põem em causa a sua estabilidade e consequentemente a sua segurança e sustentabilidade econômica. As Análises de Riscos, partes integrantes da Gestão de Riscos, consistem na verificação de como diferentes fatores podem interagir com os vários cenários produzidos pelo processo construtivo. Neste sentido, as Análises dos Modos de Ruptura e seus Efeitos (Failure Modes and Effects Analysis - FMEA) e as Análises dos Modos de Rupturas, Efeitos e a Criticidade (Failure Modes, Effects and Criticality - FMECA) são nesta comunicação aplicadas a um caso-estudo "Túnel Laranjeiras" implantado na Mina de Brucutu de propriedade da Vale (São Gonçalo do Rio Abaixo - MG), pelo processo NATM (New Austrian Tunnelling Method). Para se avaliar os possíveis modos de ruptura mapeados neste túnel, assim como estabelecer uma ordenação do respectivo risco decorrente da probabilidade de ocorrência e da respectiva severidade desenvolveu-se o estudo com base nos métodos citados. Os resultados das análises de riscos possibilitaram um melhor entendimento do comportamento deste túnel em relação à sua segurança e consequências, revelando a pertinência destes métodos na Gestão de Riscos desta estrutura

PALAVRAS-CHAVE: FMEA, FMECA, Túneis, Obras Subterrâneas, Gestão de Riscos, Colapso.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de processos geológicos-geotécnicos (escorregamentos, erosão, colapsos e subsidências) afeta praticamente todas as regiões brasileiras, tanto em áreas urbanas como rurais e empreendimentos. Esses processos, além dos evidentes danos econômicos e ambientais, podem levar à perda de vidas humanas.

O grande número de obras subterrâneas, principalmente as urbanas, em execução no

mundo podem gerar acidentes, e para evitá-los ou minimizar seus impactos é necessário seguir uma série de critérios, como os que estão expostos no Código de Prática para o Gerenciamento de Riscos em Obras de Túneis, iniciativa do “*The International Tunnelling Insurance Group*”¹ (ITIG).

Nas obras subterrâneas esta sempre implícito o risco mais elevado quando comparado com obras a céu aberto. Esse risco pode ser

¹ (ITIG) - Grupo internacional de seguros de túneis, ligado a International Tunnelling Association (ITA).

explicado por envolver materiais geológicos que, por mais detalhada que seja a investigação prévia de campo e laboratório, sempre podem apresentar alguma característica não prevista inicialmente, e que só será detectada na construção. O risco geológico é sempre presente em obras subterrâneas, conforme citado por Pastore (2009).

Com essa característica peculiar, o gerenciamento de riscos tem como objetivo prever o imprevisível, antecipar possíveis anomalias e características geotécnicas e geológicas que poderão resultar em impactos e aumento dos riscos na construção destas obras de engenharia.

Inserido neste contexto ressalta-se a importância da aplicação de métodos de análises de riscos como um complemento às abordagens tradicionais de avaliação de riscos em obras subterrâneas. Neste sentido, justifica-se a aplicação de metodologias de análises de riscos especificamente em túneis, caso-estudo apresentado neste artigo, pois, por meio dessas análises, pode-se obter um melhor entendimento do comportamento das escavações em relação à sua segurança e às consequências relacionadas com os possíveis colapsos.

Embora não haja ainda uma cultura de aplicação destas técnicas às obras geotécnicas, entende-se a relevância destas ferramentas, principalmente na avaliação da segurança destas obras sendo um dos objetivos deste artigo contribuir para a propagação dessa prática no âmbito de aplicação da Engenharia Geotécnica.

2 IDENTIFICAÇÃO E GESTÃO DE RISCOS EM OBRAS SUBTERRÂNEAS

Segundo Kochen (2009) um bom plano de identificação de riscos começa com perguntas que vão direcionar o nosso olhar para estas questões:

- O que é risco para esta obra subterrânea específica?
- Como percebo que existem riscos?
- Quais riscos devo aceitar? Quais devo rejeitar?
- Como fazer para não ficar inconsciente dos riscos?

É necessário, para cada empreendimento de

obra subterrânea, estabelecer padrões mínimos de avaliação de riscos e procedimentos de gerenciamento de riscos. Para isto, é necessário definir claramente as responsabilidades das partes envolvidas, para reduzir as probabilidades de perdas, bem como o número e tamanho das demandas.

É importante que o gerenciamento de riscos utilize ferramentas de análise de riscos e de decisão, analisando os problemas geotécnicos de obras subterrâneas de uma forma mais estruturada e formal, com o objetivo de minimizar os riscos. Com este procedimento, as decisões deixam de ser intuitivas e empíricas e passam a ser mais estruturadas. Evita-se, desta forma, correr riscos sem a análise de suas consequências.

3 CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL LARANJEIRAS

As metodologias Análises dos Modos de Rupturas e seus Efeitos (FMEA) e Análises dos Modos de Rupturas, seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA) foram aplicadas ao túnel laranjeiras, descrito em Coelho (2015).

As razões que levaram à seleção do local, bem como do empreendimento a ser avaliado, prendem-se a critérios da aplicabilidade dos riscos gerados ao mesmo e, neste caso, por razões de caráter estrutural como a existência de apoio técnico e logístico.

Como área de estudo e de aplicação, foi selecionado o Túnel de Adução de Rejeitos do complexo da Barragem Norte, na Mina de Brucutu, no Município de São Gonçalo do Rio Abaixo, no Estado de Minas Gerais.

O traçado do túnel de adução de rejeito situa-se na sua parte montante, sobre formação ferrífera, atravessando as partes de itabiritos compactos e friáveis até atingir na sua porção de jusante a zona de contato entre estes e os gnaisses do embasamento. Neste trecho, o túnel atravessa uma mistura tectônica dúctil de litotipos que pode incluir xistos, quartzitos, gnaisses e itabiritos. A espessura desta mistura é irregular ao longo da serra, mas pode atingir dezenas de metros ou mais. É possível notar uma vertente de alta declividade, que apresenta

inclinação média da ordem de 70° na porção norte do vale e mais suave na porção sul, voltada para mina, com inclinação média em torno de 20°.

De acordo com os dados das investigações na área do túnel de adução de rejeito, a região apresenta uma cobertura de solo muito heterogênea, condicionada por um contraste de resistência ao intemperismo químico dos litotipos existentes. Este contraste de alterabilidade é o fator preponderante no desenvolvimento do perfil de alteração, sendo que possíveis condicionantes estruturais (zonas de fraturamento) não se mostraram influentes no modelo geológico-geotécnico elaborado.

O itabirito (rocha bandada, com níveis milimétricos a centimétricos de hematita alternados com níveis de quartzo) apresentou-se como uma rocha muito susceptível aos agentes ambientais e, com isso, desenvolve perfis profundos de intemperismo. Seu produto de alteração é uma areia fina, composta essencialmente por especularita (hematita lamelar) e, subordinadamente, quartzo.

Já o clorita-muscovita xisto ou seu equivalente de granulação mais grossa e mais fina (gnaisse e filito, respectivamente) apresenta maior resistência à alteração, sustentando o relevo e, conseqüentemente, o topo rochoso, de forma mais eficiente que o itabirito. Seu produto de alteração é um material areno-siltoso, cuja baixa coesão é indicada pela total desagregação à pressão manual.

O quartzito apresenta composição bastante pura, com quantidade de muscovita inferior a 5% e granulação fina. Apesar de ser tradicionalmente uma rocha resistente à alteração intempérica, não se observa uma expressão topográfica tampouco uma elevação do topo rochoso em subsuperfície em função da sua ocorrência. Seu produto de alteração é um material areno-siltoso, com coesão aparentemente maior que a do filito alterado, entretanto também bastante friável.

O contato entre os diversos litotipos é aparentemente transicional, não ocorrendo uma superfície única de contato, mas sim uma seqüência de intercalações entre um litotipo e outro, até que um litotipo passa a predominar sobre o outro.

Em relação aos depósitos superficiais, observa-se uma espessa camada de tálus na escarpa de jusante que grada para colúvio na porção mais distal. Este tálus foi identificado essencialmente com base em observações de superfície em etapa de campo. As principais evidências da presença deste horizonte é a morfologia do terreno em anfiteatro, a ocorrência de blocos de rocha com até 1 metro de diâmetro e de uma provável cicatriz de escorregamento, caracterizada por uma parede de rocha ou de saprolito com aproximadamente 6 metros de altura.

A escarpa de montante apresenta morfologia de relevo mais suave. Com isso, seu depósito superficial associado é uma camada de colúvio com até 6 metros de espessura, que se adelgaça da parte alta para a parte baixa do morro.

A composição tanto do colúvio quanto do tálus, caracterizada a partir das sondagens, consiste em fragmentos de rocha envoltos em matriz argilosa e com consistência plástica, sendo que no tálus os fragmentos são mais angulosos do que no colúvio.

A foliação apresenta orientação WNW-ESE e mergulho moderado (45°) para SW. Ao longo da foliação se desenvolve o principal sistema de fraturamento. Além disso, ocorrem fraturas sub-verticais e com 60° de inclinação subordinadas.

As fraturas paralelas à foliação são lisas e planas, apresentam sinais de percolação de água principalmente na porção mais superficial do maciço e não apresentam, em geral, preenchimento. Já as fraturas oblíquas à foliação e as verticais são, em geral, planas e pouco rugosas e apresentam, localmente, preenchimento de argila + óxidos/hidróxidos de ferro, e paredes pouco alteradas a sãs.

Para as litologias mais importantes e que ocupam maior extensão do túnel, respectivamente, o saprolito de filito e o xisto pouco alterado, foram verificadas a classificação geomecânica segundo as tabelas de Bieniawski, os resultados e o método de classificação podem ser verificados nas Tabelas de 1 a 5.

Tabela 1: Saprolito de Filito segundo o Critério de Bieniawski.

Parâmetros	Valor	Pontuação
Resistência à Compressão	1 a 5 MPa	1
RQD	0 %	3
Espaçamento das Descontinuidades	< 0,06mm	5
Orientação das Descontinuidades	-	-5
Água Subterrânea	-	4 a 7
Total		14 a 17 (Classe V)
Ângulo de Atrito Resultante		< 15°
Coesão Resultante		< 0,1MPa

Tabela 2: Xisto Pouco Alterado segundo o Critério de Bieniawski.

Parâmetros	Valor	Pontuação
Resistência à Compressão	10 a 50 MPa	7 a 12
RQD	80 %	17
Espaçamento das Descontinuidades	0,6 a 0,2 m	10
Orientação das Descontinuidades	-	-5
Condição das Descontinuidades		25
Água Subterrânea	-	7 a 10
Total		61 a 69 (Classe II)
Ângulo de Atrito Resultante		35 a 45
Coesão Resultante		0,3 a 0,4 MPa

Tabela 3: Itabirito segundo o Critério de Bieniawski.

Parâmetros	Valor	Pontuação
Resistência à Compressão	50 a 100 MPa	7
RQD	25 a 50 %	8
Espaçamento das Descontinuidades	0,6 a 0,2 m	10
Orientação das Descontinuidades	-	-5
Condição das Descontinuidades		10
Água Subterrânea	-	7
Total		37 (Classe IV)
Ângulo de Atrito Resultante		20 a 25
Coesão Resultante		0,15 a 0,2 MPa

Tabela 4: Saprolito segundo o Critério de Bieniawski.

Parâmetros	Valor	Pontuação
Resistência à Compressão	1 a 5 MPa	1
RQD	< 25 %	3
Espaçamento das Descontinuidades	< 0,6 m	5
Orientação das Descontinuidades	-	-2
Condição das Descontinuidades		0
Água Subterrânea	-	7
Total		14 (Classe V)
Ângulo de Atrito Resultante		< 15°
Coesão Resultante		< 0,1 MPa

Tabela 5: Quartzito segundo o Critério de Bieniawski.

Parâmetros	Valor	Pontuação
Resistência à Compressão	50 a 100 MPa	7
RQD	80 %	17
Espaçamento das Descontinuidades	0,6 a 0,2 m	12
Orientação das Descontinuidades	-	-5
Condição das Descontinuidades		25
Água Subterrânea	-	7
Total		63 (Classe II)
Ângulo de Atrito Resultante		35° a 45°
Coesão Resultante		0,3 a 0,4 MPa

4 FMEA/FMECA APLICADO AO TÚNEL LARANJEIRAS

A metodologia FMEA consiste na identificação dos modos de falhas (rupturas) e dos seus efeitos. A aplicação da metodologia FMECA produz a ordenação dos modos de falhas (rupturas) de acordo com a combinação da probabilidade de ocorrência dos modos de ruptura e da sua severidade. Estas metodologias foram aplicadas ao túnel laranjeiras em Brucutu. São apresentados, nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, as características do sistema analisado e as funções de todas as componentes básicas consideradas para o sistema, incluindo uma vista geral do case em estudo.



Figura 1: Túnel Laranjeiras. Fonte: Arquivo Vale.

Tabela 6: Descritivo do Túnel Laranjeiras

Local	São Gonçalo do Rio Abaixo - MG
Met.Construtiva	NATM
Elevações	814,50 a 833,50
Extensão	602 m

5 DEFINIÇÃO DE ESCALAS DE FMECA PARA APLICAÇÃO AO CASO EM ESTUDO

Na aplicação da metodologia, observou-se que as escalas relativas à probabilidade de ocorrência (O) e detecção (D), se baseiam em valores probabilísticos. Com isso, para o caso em análise não foram encontrados estudos probabilísticos relativos à metodologia aplicada, dos quais se possam retirar os valores relativos às probabilidades de ocorrências, bem como à fiabilidade dos sistemas de detecção de falhas, necessários para aplicação das escalas que constam na bibliografia.

Segundo Teixeira (2009), pode-se recorrer a escalas modificadas de modo a se conseguir aplicar a respectiva ferramenta em estudos de reabilitação de túneis. Assim, efetuou-se a aplicação do FMECA recorrendo-se a utilização apenas de escalas de gravidade (G) e de probabilidade de ocorrência (O), passando o índice de risco a definir-se através da associação destes dois dígitos (GO).

Tabela 7: Critérios adotados para o Índice de Risco.

RPNI	Range	Observação
Médio / Baixo	Menor e igual a 20 unidades	As falhas consideram-se aceitáveis. Manter as ações preventivas e a eficácia das medidas de controle, recorrendo à verificações periódicas.
Elevado	Maior que 20 e menor que 75 unidade	As falhas devem ser reduzidas quer ao nível da probabilidade quer da gravidade. Devem-se implementar medidas para reduzir o risco em um período determinado.
Muito Elevado	Maior e igual a 75 unidade	As falhas devem ser totalmente eliminadas. Não se deve iniciar ou continuar o trabalho até que se tenha reduzido o nível de risco.

Desta forma, a escala de índice de risco varia num espectro de valores de 5 (correspondente ao risco mínimo) a 100 (correspondente ao risco máximo). A escala de gravidade estabelece cinco níveis de classificação, numerados de 1 a 5, por ordem crescente de gravidade do risco.

A escala de frequência de ocorrência estabelece cinco níveis de classificação, numeradas de 1 a 5, em ordem crescente de probabilidade de ocorrência.

Apesar de não se encontrarem estudos probabilísticos relativos à metodologia aplicada, bem como à fiabilidade das escalas que constam na bibliografia especializada em túneis, baseou-se o estudo de caso em questão, nas experiências construtivas atuais.

Assim, apresenta-se na Tabela 8 a escala de probabilidade e controle, onde são estabelecidos cinco níveis de probabilidade, numerados de 1 a 5, em ordem crescente de probabilidade e controle.

Tabela 8: Níveis de Frequência e de Controle.

N.F	Indicativo
1	O período de recorrência previsto para um evento de tal força magnitude é 1 a cada 100 anos ou mais.
2	Uma ocorrência durante a vida útil da instalação (entre 1 em 100 anos e 1 em 10 anos).
3	Uma ocorrência no máximo em um período de dez anos de funcionamento (entre 1 em 10 anos e 1 em um ano).
4	Uma ocorrência em um ano de funcionamento (1 em um ano).
5	Pode ocorrer uma vez por mês ou mais.
N.C	Controle (Oi)
1	Muito Alto
2	Alto
3	Médio
4	Baixo
5	Muito baixo

6 RESULTADO DA FERRAMENTA FMA/FMECA APLICADOS AO TÚNEL LARANJEIRAS: CLASSES DE PROBABILIDADES E SEVERIDADES.

Os modos de falhas e suas respectivas causas mapeadas no FMEA/FMECA e aplicados ao túnel laranjeiras são mostrados no quadro 4. Os modos de rupturas e seus respectivos efeitos são apresentados no quadro 5. No quadro 6, apresenta-se a escala de gravidade referente ao dano (Si), a frequência (Oi) e o controle (Di) são considerados na análise.

O método prevê uma análise em que se considera além da matriz de criticalidade, a sequência dos modos de ruptura, com suas causas iniciadoras, assim como efeitos imediatos, próximos e finais.

São previsto, ainda neste método, a apresentação de medidas de detecção e controle.

7 ÍNDICES DE PROBABILIDADE E RESPECTIVAS CONSEQUÊNCIAS.

Após a análise de todos os modos de ruptura, em termos da probabilidade das severidades, associadas aos seus efeitos no sistema, definiu-

se uma ordenação relativa dos riscos, sendo avaliadas, para isso, as suas causas. Para aplicação do método foi atribuída uma classe de probabilidade para cada conjunto de efeitos finais originados por certo modo de ruptura numa componente e uma classe de severidade associada às consequências daí resultantes. Este processo foi, então, repetido para todos os modos potenciais de ruptura.

Os riscos mapeados, associados aos efeitos/consequências e as respectivas probabilidades são utilizados para determinação dos índices de riscos (RPNi). Assim, esta associação com as classes de consequência e do índice de controle, geram o respectivo índice de risco (RPNi), sendo a consideração dos valores atribuídos decorrentes de experiência adquiridas na implantação dos túneis laranjeiras e forquilha IV. A probabilidade de ocorrência dos efeitos finais de cada modo de risco geraram as respectivas ações preventivas recomendadas.

A criticidade do par (Probabilidade e Severidade) foi calculada pelo índice de risco, produto dos índices atribuídos à possibilidade de ocorrência de um dado modo de ruptura (Si) pelo índice atribuído à severidade das consequências dos seus efeitos finais (Oi).

Após essa análise foi construída uma matriz de criticalidade dos modos potenciais de ruptura.

8 ANÁLISE OS DADOS

Os modos de ruptura mais críticos correspondem àqueles que apresentaram o efeito conjunto mais desfavorável de severidade e de probabilidade, ou seja, os modos de ruptura mais críticos encontram-se na matriz no canto superior direito e os menos relevantes no canto inferior esquerdo.

Após análise detalhada das tabelas de FMECA referente ao método de estabilização de maciços em túneis, foi possível elaborar a Figura 2 e a Tabela 9 de forma a auxiliar a interpretação dos dados obtidos, que sintetizam os resultados do índice de risco, referente ao método em estudo.

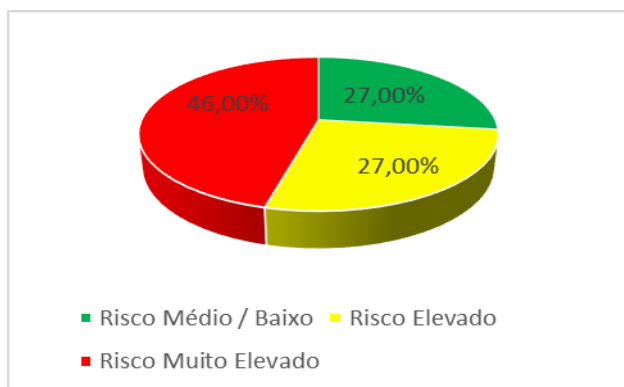


Figura 2: Percentagem de valores referentes a cada área de risco.

Tabela 9: Análise de dados de valores máximos e mínimos de índice de risco

	Risco médio / baixo	Risco Elevado	Risco Muito Elevado
Valor mínimo de índice de risco	12	24	75
Valor máximo de índice de risco	16	48	80

Analisando os resultados de acordo com a área de risco em que se situam, pode-se concluir que os riscos associados à zona de risco elevado representam 46% da totalidade dos riscos associados ao método em análise. No entanto, verifica-se que a zona de risco médio-baixo e muito elevado representam cada uma 27% dos riscos, associados ao método em análise.

Conclui-se assim que pelo fato da maior percentagem de riscos se encontrarem na zona de risco elevado significa que os riscos são preocupantes.

O método apresenta índices de risco num range de valores entre 12 (valor mínimo) e 80 (valor máximo). Referente à zona de risco médio/baixo, os valores variam entre 12 (valor mínimo) e 16 (valor máximo). Estes valores indicam que as falhas subjacentes a estes riscos são consideradas aceitáveis, no entanto devem manter-se as ações preventivas e a eficácia das medidas de controle, recorrendo a verificações permanentes.

Quanto à zona de risco elevado, os valores variam entre 24 (valor mínimo) e 48 (valor máximo). Estes valores encontram-se num patamar intermediário entre a probabilidade de

ocorrência e a gravidade. Desta forma verifica-se que dentro desta área de risco elevado, predominam riscos que são prováveis de acontecer e com falhas com ocorrência possível. As falhas que proporcionam estes riscos devem ser reduzidas quer ao nível da probabilidade quer da gravidade, sendo implementadas medidas para reduzir o risco num período determinado.

Na área de risco muito elevado, os valores variam entre 75 (valor mínimo) e 80 (valor máximo). Estes valores encontram-se num patamar de gravidade muito elevada e probabilidade de ocorrência média-baixa. Desta forma, verifica-se que dentro desta área de risco muito elevado, predominam riscos prováveis de acontecer e que implicam uma ou várias mortes.

As falhas que causam estes riscos devem ser totalmente eliminadas. Não se deve iniciar ou continuar o trabalho até que se tenha reduzido o nível de risco. Verifica-se que na execução desta operação, as tarefas que apresentam índices de risco mais elevados são: alteração do passo de avano da cambota e/ou bancada; alteração do espaçamento entre cambotas; falta de definição do processo executivo de tratamento do maciço e falta de instrução / treinamento nos procedimentos de riscos do projeto.

9 COMENTÁRIOS FINAIS

A ferramenta elaborada foi testada, permitindo mapear a frequência de ocorrência de um determinado evento, definindo a probabilidade do risco para a obra. Foram geradas, ainda, as categorias de riscos mais comuns em obras subterrâneas, particularmente em túneis tipo NATM.

Com isso, foi possível expor as características principais de cada evento, contemplando os potenciais causadores de não conformidades e geradores de riscos. Foi mostrado, ainda, que estes eventos podem resultar em danos relevantes e graves, e até mesmo em colapsos parciais do empreendimento. Ressalta-se, também, que a respectiva caracterização é hipotética, devendo ser adequada à especificidade de cada obra

subterrânea, para aplicação em situações reais.

Contudo, a execução de uma avaliação de riscos, implica uma análise muito detalhada do tema a tratar, sendo necessário um estudo aprofundado das ferramentas de gestão de riscos e seu impacto no empreendimento.

Nesta avaliação, cada um dos métodos analisados apresenta grande incidência de valores de índice de risco em zona de risco elevado. No entanto, pode-se verificar que a zona de riscos muito elevados representa em todos os métodos uma percentagem muito significativa dos valores de índice de risco, o que os torna inaceitáveis.

A hierarquização dos métodos foi dificultada pela semelhança dos modos de falha existentes entre os métodos de reforço e estabilização estudados, e consequente semelhança dos níveis de risco atribuídos. Não obstante, analisando de forma global os índices de riscos, verifica-se que é possível efetuar uma hierarquização das várias metodologias de redução dos riscos, trazendo ambientes cada vez mais seguros.

Numa análise das dificuldades encontradas, ressalta-se a aplicação das escalas do método, pela falta de metodologia na aplicação das escalas existentes. Isto, pela falta de estudos e informação probabilística sobre a temática em estudo. De forma a fazer face a este problema houve a necessidade de se adaptarem as escalas referentes ao método.

Com este trabalho conclui-se que a execução de um túnel é um dos desafios mais complexos no campo da engenharia, mostrando operações que aplicam diversas tecnologias com níveis de risco elevados. Associada à complexidade e diversidade das operações que este tipo de obra engloba, a garantia de níveis de segurança elevados é prioritária.

A partir desses resultados pode-se concluir que as análises realizadas confirmam os modos de ruptura mais preocupantes nessas estruturas, demonstrando, assim, a eficácia do método aplicado.

REFERÊNCIAS

- Gomes, D. (2012). Gestão de Riscos nas Construções de Túneis e Obras Subterrâneas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa. 99p.
- PASTORE, E. (2009). Risco Geológico em Obras Cívicas. Disponível em: pt.scribd.com/doc/.../Art-Risco-Geologico-Em-Obras-Civis. Acesso em: 18/06/2014.
- KOCHEN, R. (2009). Gerenciamento de riscos em obras subterrâneas de engenharia. Disponível em: www.brasilex.com/portal/.../Art_construcao_civil.pdf. Acesso em: 18/06/2014.
- COELHO, A. (2015). Gerenciamento de Riscos em Obras Subterrâneas de Túneis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica.
- TEIXEIRA, P. (2009). Aplicação do FMECA a sistemas de estabilização e reforço de maciços em Túneis. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro. Aveiro. Portugal.
- US DEPARTMENT OF THE ARMY CORPS OF ENGINEERS (1978). “Tunnels and shafts in rock”. Engineer Manual. EM 1110-2-2901. 15 September 1978.
- LÓPEZ, C. e DÍAZ, B. (1997). “Clasificación de los terrenos según su excavabilidad”. Manual de túneles y obras subterráneas. Ed. C. López Jimeno. Entorno Grafico, S. L. Madrid. pp. 183-210.
- HOEK, E. (1999). Support for Very Weak Rock Associated with Faults and Shear Zones Distinguished. Proceedings of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, E. Villaescusa, C. R. Windsor & A. G. Thompson (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands: 19–32.