

SEGURANÇA, RUPTURA E COLAPSO DE TÚNEIS URBANOS EM NATM

POR FRANCISCO RIBEIRO NETO*/ROBERTO KOCHEN**

RESUMO

Este artigo apresenta aspectos voltados para avaliação de segurança e estudos de casos de ruptura e colapso de túneis urbanos, executados pelo método “New Austrian Tunnelling Metho” (NATM). Enfoca-se a segurança da obra propriamente dita, das edificações e das redes de utilidades públicas lindeiras. Apresenta-se também um levantamento de casos recentes de ruptura ou colapso de túneis, e sugestões para a avaliação de segurança de túneis executados em NATM, tanto para a fase de projeto como para a fase de construção. Estas sugestões têm por objetivo aumentar o nível de desempenho e segurança destas obras, fornecendo diretrizes mínimas para um acompanhamento eficiente da construção, bem como para elaboração de um projeto adequado.



1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento de acidentes em obras subterrâneas, principalmente em meios urbanos, fez com que se aumentasse a preocupação mundial com a segurança destas obras. Os túneis executados em “New Austrian Tunnelling Method” (NATM), assim como os executados pelos demais métodos construtivos, requerem o desenvolvimento de considerável habilidade e cuidado em sua investigação, planejamento, projeto, construção e monitoração para serem implantados com segurança. Pelizza⁽¹⁾ comenta que os colapsos não são uma prerrogativa do método de escavação, isto é, independentemente do método de escavação pode haver colapso. No entanto, no NATM, a segurança da obra é função intrínseca do método constru-

tivo projetado e da sua correta execução, tornando a avaliação de riscos muito importante. Uma obra subterrânea, tanto em meio urbano como em meio não urbano, deve ser projetada e construída de forma que seja possível controlar e manter em níveis aceitáveis a construção e o impacto ambiental a curto, médio e longo prazo.

A principal motivação para a realização deste trabalho é que, salvo algumas exceções, a pouca literatura referente ao assunto encontra-se não formalizada e/ou dispersa, publicada em anais de simpósios e congressos, em revistas especializadas ou ainda em relatórios internos de circulação restrita.

Segundo Pelizza; Grasso⁽²⁾, para a indústria de construção de túneis, há três razões principais para realizar esforços no sentido de reduzir ou, se

possível, eliminar rupturas em túneis durante a construção: primeiro, para prevenir atrasos no prazo final; segundo, para evitar disputas relativas a impactos ambientais causados pela ruptura, que resultam em perda adicional de tempo; e terceiro, para ficar dentro do orçamento proposto para o projeto.

Deve-se observar que, mesmo em projetos de boa qualidade, por mais que se controle os níveis de risco, procurando mantê-los aceitáveis, a possibilidade de comportamento inadequado, e de ocorrência de rupturas ou acidentes irá sempre existir. Não existe obra civil com risco de ruptura nulo (Hachich⁽³⁾), embora a meta do engenheiro deva ser sempre reduzir a probabilidade de ruptura para o menor valor possível.

2. O MÉTODO CONSTRUTIVO NATM E A MONITORAÇÃO EM TÚNEIS

O primeiro uso do termo em inglês de “New Austrian Tunnelling Method” (NATM), apareceu em uma série de três artigos escritos pelo professor Rabcewicz publicado na revista “Water Power” em novembro e dezembro de 1964 e janeiro de 1965 (Rabcewicz, 1964 apud HSE⁽⁴⁾ e Gehring⁽⁵⁾) reproduziu os conceitos fundamentais que formam o método construtivo NATM.

Segundo o HSE⁽⁴⁾, o NATM apresenta grande vulnerabilidade para falhas humanas. Convém notar o grande número de operações e atividades sucessivas, que devem ser realizadas sequencialmente pela equipe de construção, de forma nem sempre padronizada, sendo que a monitoração é parte integrante do método. Esta característica do NATM (grande número de operações construtivas, em seqüência) é um dos aspectos que explicam a vulnerabilidade a falhas de execução. A grande



Colapso de túnel em São Paulo, Brasil - 1993 (Anderson, 1997a).

vantagem do NATM é liberdade de projetar-se seções transversais de grande diâmetro e em formas e seqüências construtivas variadas.

Pelizza⁽¹⁾ apresenta os objetivos primordiais da monitoração de construção de túneis rasos em solo como sendo:

- controlar o comportamento do maciço durante o avanço do túnel, para verificar a condição de segurança dos

trabalhos em profundidade e em superfície, e intervir com medidas apropriadas, tão logo sejam detectadas condições anômalas ou perigosas;

- permitir uma avaliação mais precisa das características do maciço, através de retro-análises úteis, para a definição de medidas de estabilização e otimização do projeto das estruturas ainda a serem executadas.

A monitoração tem como finalidade complementar e não substituir o acompanhamento da escavação, o mapeamento geológico, a verificação de conformidades e as demais informações de campo. Ela visa garantir que os recalques e distorções induzidos pela escavação situem-se dentro de limites aceitáveis. Em áreas urbanas, esta limitação de recalques é essencial para evitar danos a edificações e utilidades próximas ao túnel.

3. CASOS HISTÓRICOS RECENTES DE COLAPSO OU RUPTURA DE TÚNEIS

Em nossa literatura técnica nacional há poucos casos de relatos de ruptura ou colapso de túneis. Um dos primeiros relatos bem documentados é o da ruptura do túnel singelo Oeste, do Prolongamento Norte do Metrô-SP em 1981, apresentado em Cruz et al.⁽⁶⁾. Outra contribuição é de Negro et al.⁽⁷⁾, que apresentaram uma compilação sumária de dados de instabilidade de túneis na cidade de São Paulo.

A tabela 1, elaborada com base em relatos pessoais e pesquisa, apresenta um resumo de acidentes ocorridos tanto em túneis executados em NATM, como executados em “Shield”, na cidade de São Paulo (sendo a maioria em solo e alguns em rocha). Maiores detalhes podem ser obtidos em Ribeiro Neto⁽⁸⁾.

Anderson⁽¹⁷⁾ comenta que os artigos técnicos sobre acidentes com túneis contêm comentários genéricos e incompletos. São poucas as publicações onde foram organizados um grande número de colapsos ou rupturas, que tenham sido revistos em detalhes. A tabela 2 apresenta um resumo de casos de acidentes em túneis ocorridos no mundo inteiro, no período de 1973 a 1998.

ANO	TÚNEL	MÉTODO CONSTRUTIVO	TIPO DE ACIDENTE	VOLUME (m ³)	REFERÊNCIA
1981	Singelo Ext. Norte I (Oeste)	NATM	RUPTURA	18	CRUZ et al. (6)
1982	SANEGRAN	NATM	RUPTURA	?	TEIXEIRA (9)
1982	SANEGRAN	SHIELD	BLOW-OUT	?	TEIXEIRA (9)
1988	Pinheiros	NATM	RUPTURA	5	NEGRO et al. (7)
1989	Itaquera	NATM	COLAPSO	300	SOZIO et al. (10)
1989	Cardoso de Almeida/Sorocaba (E/F)	NATM	RUPTURA	33	ROCHA (11)
1989	Cardoso E/F	NATM	RUPTURA	5	NEGRO et al. (7)
1989	Paraíso	SHIELD	RUPTURA	3	NEGRO et al. (7)
1990	Pacaembu	SHIELD	RUPTURA	12	NEGRO et al. (7)
1991	Emboque do Poço Cristovão de Burgos	NATM	RUPTURA	300	TAKEUCHI et al. (12)
1993	Complexo Viário Maria Maluf	NATM	RUPTURA	2 x 5	TARGAS et al. (13)
1993	Tribunal de Justiça	NATM	COLAPSO	300 (?)	BITAR et al. (14)
1994	Túnel Carvalho Pinto	NATM	TRINCAS GENERALIZADAS	-	HSE (4)
1996	Túnel na Alça Senna Madureira	NATM	RUPTURA	5	MARGARIDO et al. (15)
1997	Túnel Jaciporã	NATM	COLAPSO	300	ROCHA et al. (16)
1997	Túnel Carvalho Pinto	NATM	COLAPSO	?	
1998	Túnel Eletropaulo	NATM	RUPTURA	?	Jornal Folha S.P. (1998)

Tabela 1 - Casos de acidentes (deslocamentos excessivos, ruptura ou colapso) de túneis em São Paulo.

ANO	LOCALIZAÇÃO	TIPO DE ACIDENTE
1973	Paris, França	Colapso de túnel ferroviário
1981	Metrô de São Paulo, Brasil	Instabilidade durante a construção
1984	Túnel Landrücken	Colapso
	Metrô de Bochum, Alemanha	Colapso
1985	Túneis Richthof & Kaiserau	Colapso
	Metrô de Bochum, Alemanha	Colapso
1986	Túnel Kriberg, Alemanha	Colapso
1987	Metrô de Munique, Alemanha	5 Colapsos
	Túnel Weltkugel, Alemanha	"Cave-in"
	Túnel Karawanken, Áustria/Eslovênia	Grande afluência e deformações severas
1988	Túnel Kehrenberg, Alemanha	Sérios recalques na superfície
	Túnel Michaels, Alemanha	Colapso (túnel piloto e alargamento)
1989	Túnel Karawanken, Alemanha	Colapso
	Metrô Itaquera - São Paulo, Brasil	Colapso
1991	Túnel Kwachon, Korea	Colapso
	Metrô de Seul, Korea	2 Colapsos
1992	Túnel Funagata, Japão	Colapso
	Metrô de Seul, Korea	Colapso
	Túnel Lambach, Áustria	Colapso
1993	Metrô de Seul, Korea	4 Colapsos
	Taipei, Taiwan	Colapso
	Túnel Tribunal de Justiça - São Paulo, Brasil	Colapso
	Toscana, Itália	Deformações severas (colapso)
1994	Túnel Carvalho Pinto, Brasil	Ruptura do emboque durante a construção
	Túnel Montemor, Portugal	2 Colapsos
	Túnel Galgenburg, Áustria	Colapso
	Metrô de Munique, Alemanha	Colapso
	Aeroporto de Heathrow, Londres, Reino Unido	Colapso
	Storebaelt, Dinamarca	Incêndio em TBM
1995	Túnel Motorway, Turquia	Colapso
1996	Túnel Motorway, Turquia	Colapso
	Los Angeles, U.S.A.	Colapso
	Metrô de Atenas, Grécia	Colapso
	Túnel Adler, Suíça	Colapso
	Toulon	Colapso
	Eidsvoll, Noruega	Colapso
1997	Metrô de Atenas, Grécia	Colapso
	Metrô de São Paulo, Brasil	Colapso
	Túnel Carvalho Pinto, Brasil	Colapso
1998	Rússia	Colapso

Tabela 2 - Acidentes em túneis - (adaptado e modificado de HSE⁽⁴⁾ e Anderson et al.⁽¹⁸⁾).

3.1. Estado atual do conhecimento

Pelizza⁽¹⁾ e Pelizza; Grasso⁽²⁾ resumiram muito bem o estado atual do conhecimento em relação a acidentes durante a construção de túneis e que, na realidade, é a somatória das várias conclusões obtidas através de informações de fontes do Reino Unido, alemãs, japonesas, russas, tchecas de casos históricos de rupturas de túneis

já publicados. A seguir, apresenta-se um resumo dos itens mais significativos sobre acidentes geológicos ou anomalias.

- Acidentes geológicos não são uma prerrogativa do método de construção usado; eles ocorrem com severidade variada, independente do método de construção, tanto em escavação mecanizada, como NATM convencional;

- Um número pequeno de acidentes geológicos ocorrem devido a um encontro inesperado com uma situação hidrogeológica e/ou geotécnica que é inesperada;

- A maioria dos acidentes geológicos são causados pelo não reconhecimento antecipado de situações hidrogeológicas e/ou geotécnicas desfavoráveis. Este ponto é apoiado pelas seguintes observações relativas à insuficiência dos estudos geológicos:

- o estudo é dificultado por complexidades geológicas e pela profundidade do túnel;
- o cliente impõe um limite no orçamento de investigação, sem avaliar o potencial de riscos geológicos residuais;

- o plano de investigação geológica é estabelecido, independentemente do método de escavação de túneis a ser aplicado;

- o plano de investigação geológica é geralmente executado em uma única etapa, e uma investigação com mais etapas seria mais informativa;

- o mapeamento geológico-geotécnico na face de escavação e paredes do túnel, durante o trabalho de construção; são freqüentemente escassos e os resultados nem sempre são interpretados corretamente e prontamente;

- o empreiteiro tende a limitar as pesquisas durante a execução da obra, especialmente quando o trabalho de escavação tem que ser interrompido para executá-las;

- a tarefa do empreiteiro é produzir escavando tão rapidamente quanto possível, para fazer isto, o empreiteiro está pronto para correr riscos, e isto geralmente conduz a uma subestimação dos aspectos de segurança da situação geotécnica e hidrogeológica real; e

- igualmente, o interesse do proprietário é terminar o trabalho tão rapidamente quanto possível, o que, implicitamente, permite ao empreiteiro correr riscos, reservando-lhe o direito de discutir sobre quem tem que pagar pelas conseqüências. É responsabilidade do proprietário assegurar, com a ajuda do projetista, que a construção não ocorra em condições de risco.

3.2. Lacunas no conhecimento atual

A maior lacuna no conhecimento atual é determinar qual é a probabilidade ou o grau de risco com que uma certa anomalia geológica possa surgir inesperadamente, causando um acidente na passagem da face de escavação do túnel. O que parece ser necessário é incluir no projeto de túneis avaliações de risco de acidentes geológicos ou construtivos, os quais não podem ser previstos dentro da estrutura usual de informações disponíveis.

O projeto não pode por esta razão ser determinista, mas deve ser desenvolvido considerando-se critérios probabilísticos, levando em conta as incertezas das variáveis relativas aos aspectos geológicos e geotécnicos, as técnicas de construção e as repercussões externas e ambientais. Esta avaliação nos permitirá adquirir um conhecimento que considera a média de ambos, ou as condições prevalentes em que o túnel será escavado e as condições extremas, assim como, a probabilidade da sua ocorrência. Somente deste modo será possível aperfeiçoar o projeto final, identificando e quantificando os riscos e definindo o gerenciamento técnico e administrativo dos riscos.



Colapso de Túnel em Munique, Alemanha - 1994 (Anderson, 1997a).

3.3. Recuperação de rupturas ou colapsos

A recuperação de rupturas de túnel consiste em duas atividades relacionadas (estabilização e reconstrução), integradas com o plano de monitoração. Os procedimentos básicos envolvidos no trabalho de recuperação incluem:

- drenagem de água, evitando-se a instabilidade de cavidades e carregamento de solo;
- consolidação do desmoronamento de solo, a fim de garantir a estabilidade da nova face de escavação;
- melhoria das características geotécnicas do material do desmoronamento e da massa de solo ou rocha ao redor do túnel;
- uso de técnicas de intervenção de eficiência e eficácia comprovadas; e

• reforço do revestimento durante a escavação imediatamente atrás da face.

4. A SEGURANÇA DE TÚNEIS EM NATM

Túneis em NATM requerem o desenvolvimento de considerável habilidade e cuidado em sua investigação, planejamento, projeto, construção e monitoração, para serem construídos com segurança. Para novos projetos em NATM sugere-se que seja realizado um exame rigoroso das propostas de projeto e construção, antes que a construção seja iniciada, para se alcançar um nível apropriado de segurança. O panorama geral dos critérios de segurança e a geotecnia estão bem apresentados em Hachich⁽³⁾ e nota-se que a tendência atual é o aprofundamento nos métodos probabilísticos.

Para o HSE⁽⁴⁾, mesmo que haja bons sistemas de gerenciamento, treinamento de pessoal, trabalho de supervisão e procedimentos de controle de qualidade, falhas humanas, assim como a erraticidade do maciço, não podem ser eliminadas. Assumindo-se que todos os esforços tenham sido feitos para reduzir os riscos antes que a construção do túnel

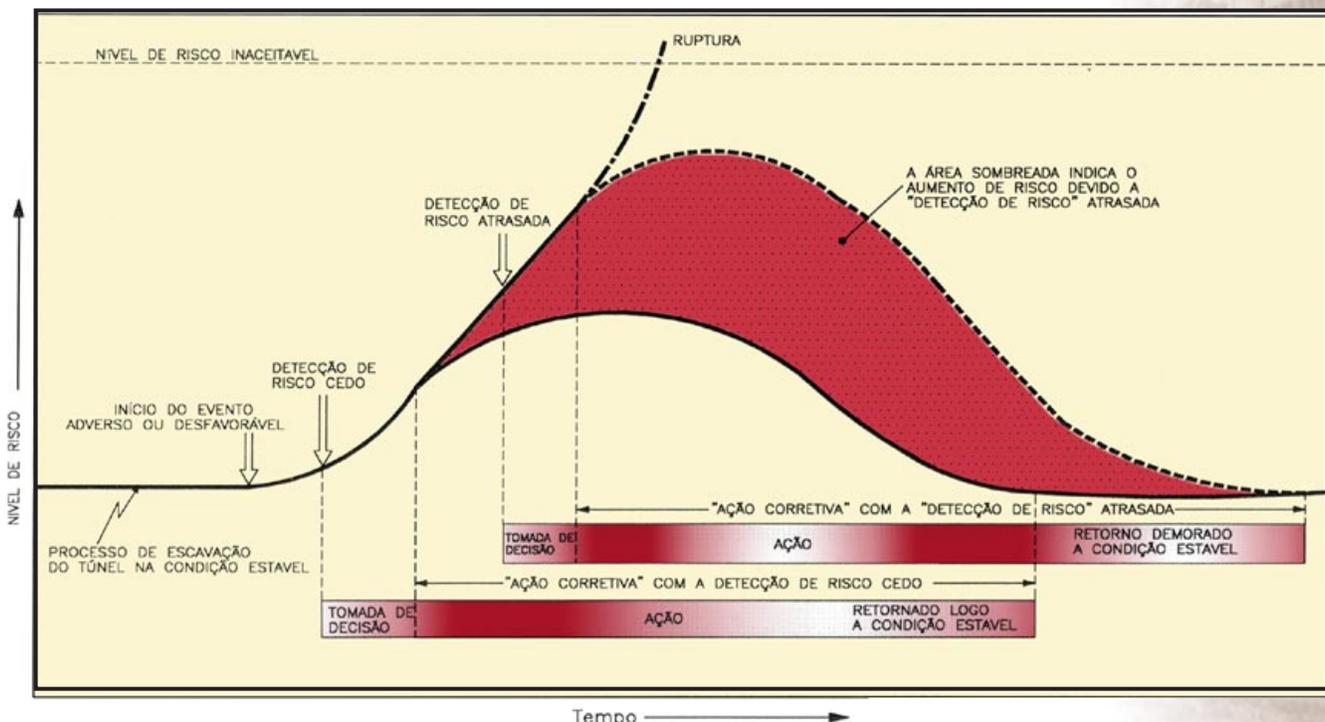


Figura 1 - Gráfico mostrando o modelo "Detecção de Risco-Ação Corretiva" (adaptado de HSE⁽⁴⁾).

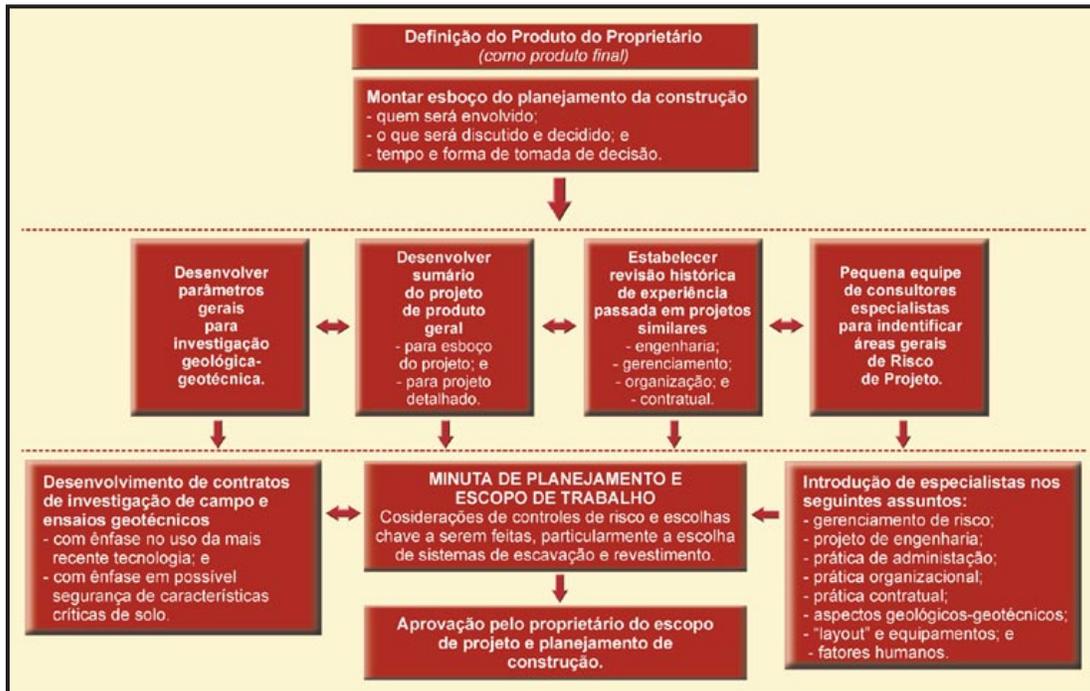


Figura 2 - Sugestão de Enfoque Estruturado, a ser realizado antes do Detalhamento de Projeto (apud Anderson⁽¹⁹⁾).

se inicie, o fator mais importante para manter o nível de risco o mais baixo possível, durante a construção, são os mecanismos "Discovery" e "Recovery", que foram traduzidos para este trabalho como mecanismos de "Detecção do Risco" e "Ação Corretiva", respectivamente. A figura 1 é auto-explicativa e apresenta o gráfico do modelo "Detecção do Risco – Ação Corretiva" (HSE⁽⁴⁾).

Os mecanismos citados acima consistem em detectar rapidamente o desenvolvimento do risco, e eliminá-lo através de uma ação corretiva rápida e pontual. Uma detecção rápida é crucial para providenciar tempo suficiente para que seja possível o início de uma ação corretiva, a fim de retornar os níveis de risco para valores aceitáveis.

4.1. Enfoque estruturado

Pensando no enfoque pró-ativo, Anderson⁽¹⁹⁾ apresentou o esboço de um Enfoque Estruturado a ser realizado antes do detalhamento de projetos (conforme figura 2), o qual começa pela declaração do proprietário ou empreendedor da natureza do produto final do projeto. Consiste basicamente numa análise prévia de riscos e avaliação estratégica, cujo objetivo é

a prevenção e redução de riscos e medidas de controle por todas as partes envolvidas, de forma a manter a níveis aceitáveis os riscos que não foram eliminados (riscos residuais) no projeto de construção de túnel.

4.2. Recomendações para incremento da segurança em obras subterrâneas

Pelizza; Grasso⁽²⁾ afirmam que o projeto não deveria ser desenvolvido com base nas mais drásticas condições extremas (mesmo se isto certamente protegesse todos de todos os riscos possíveis), pois os custos de tal projeto seriam muito elevados. Alguns riscos devem ser administrados pelo proprietário/projetista/construtor, segundo Anderson et al.⁽¹⁸⁾. Entretanto é evidente, e deveria se tornar prática aceita, que o projeto deva levar em conta as possíveis condições extremas, a fim de utilizar os seguintes instrumentos:

- simulações das conseqüências (em termos de técnicas, velocidade, custos) que a ocorrência de um acidente geológico teria em uma construção de túnel;
- a demonstração de uma relação custo/benefício razoavelmente grande, resultado de uma integração de

estudos geológico-geotécnicos preliminares e o projeto para diminuir o espectro de possíveis riscos;

- a predefinição de um plano de monitoração, com a intenção particular de verificar as condições extremas.

As pesquisas não podem ser limitadas à localização de vários pontos de medições e ao uso de instrumentação (que é necessária, mas não suficiente). É necessária a especificação de critérios para a análise e avaliação dos resultados de medições e a formulação de procedimentos para a interpretação de dados; e

- a definição de critérios técnicos para intervenção, a fim de superar as condições extremas (dado que os recursos técnicos são respon-

sabilidade do empreiteiro), junto com a definição das responsabilidades administrativas e procedimentos.

Segundo o HSE⁽⁴⁾, a segurança de túneis executados em NATM é particularmente dependente da intervenção humana, por meio de sistemas de gerenciamento e práticas corretas de trabalho. Não existem mecanismos físicos na obra para garantir a segurança de escavações pelo NATM. A segurança pode ser aumentada apenas com a somatória de várias pequenas atitudes que convergem para uma Cultura de Segurança (Anderson⁽²⁰⁾). No conceito deste trabalho a segurança pode ser melhorada com a análise e redução de riscos.

Segundo Sturk et al.⁽²¹⁾, os projetos subterrâneos extensos freqüentemente incluem séries de eventos técnicos complexos. Por exemplo, o maciço de rocha e solo é muito complexo e sujeito a grandes incertezas. Conseqüentemente, os problemas de decisão dentro da construção subterrânea podem ser difíceis de resolver, e decisões erradas podem conduzir a riscos não desejados. Para facilitar a tomada de decisão podem ser usadas a decisão probabilística e a análise de risco. Hoje, muitas decisões são tomadas

empírica e intuitivamente, sem análise das possíveis conseqüências.

A ação excessivamente cautelosa pode levar ao desperdício de recursos, talvez na forma de projetos conservadores demais, ou de propostas que perdem um contrato, devido às altas estimativas de risco. Assim, é importante equilibrar o risco. Aplicando-se as análises de decisão e de risco, é possível melhorar a determinação de incertezas, que podem conduzir a melhores decisões. Para Sturk et al.⁽²¹⁾, os elementos principais em uma análise de decisão precisa, adaptados à construção subterrânea, são os apresentados no fluxograma da figura 3.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo inicial reunir a literatura referente aos acidentes com túneis (ruptura, colapso ou deslocamento de solo) e conseqüentemente suas causas, e com isso fornecer diretrizes mínimas sobre a segurança na construção de túneis, tanto para a fase de projeto como para a fase de construção. Pode-se apresentar algumas conclusões gerais sobre os acidentes com túneis:

a) Na maioria dos casos de acidentes com túneis em NATM não foram obedecidos um ou mais conceitos fundamentais que formam o método construtivo NATM, e os acidentes ocorreram tanto em países com ampla experiência neste método construtivo, como em países com pouca experiência.

b) Excluindo-se os acidentes de emboque de túnel, quase todos os acidentes de colapso de túnel em NATM relatados originam-se próximos à frente de escavação do túnel. Portanto, o problema inerente à construção de túneis em NATM parece estar nas proximidades da face de escavação (com raras exceções). Mais raros ainda são os acidentes em túneis com revestimento secundário já instalado. A construção segura de uma frente de escavação necessita que a face escavada e a distância do arco invertido em relação à mesma seja limitada, esteja estável e sob controle todo o tempo. Esta distância é também em função do

concreto projetado já ter adquirido a resistência necessária.

c) A causa de colapso de frente de escavação mais freqüentemente citada é a condição instável de solo. Obviamente, quando um método de construção apropriado é selecionado, a frente de escavação do túnel dificilmente entra em colapso. Portanto, normalmente a causa do colapso citada não é devida ao solo, mas ao uso do método construtivo inadequado às condições de solo existentes (profundidade, cobertura, permeabilidade do solo, nível d'água etc.). Este tipo de falha ocorre quando os responsáveis pelo projeto, construção e supervisão:

- não previram deficiências no método construtivo em uso, para as condições de solo efetivamente encontradas;
- não previram mudanças nas condições de solo e, portanto, não alteraram o método construtivo em tempo hábil;
- falharam ao identificar a natureza do solo encontrado e, portanto, falharam em prever o comportamento do mesmo.

Naturalmente, há acidentes em que as causas são totalmente imprevisíveis "a priori".

d) Tipicamente, rupturas na frente de escavação em túneis rasos ocorrem quando há solo saturado próximo ao túnel. Percebe-se que a presença de água parece ser crítica, devendo-se fazer drenagem adequada (interna



Túnel em NATM em construção - JB Guaianazes - São Paulo/SP.

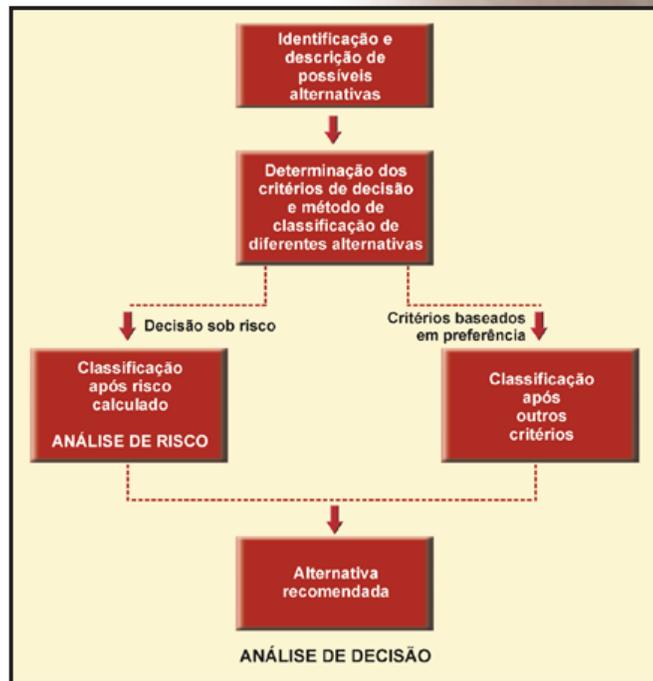


Figura 3 - Processo de decisão recomendado para construção subterrânea (Sturk et al.⁽²¹⁾).

ou externamente ao túnel). A água é um fator de risco adicional.

e) Os solos mais rijos rompem sem um aviso prévio e com deslocamentos de pequena magnitude.

f) A maioria das rupturas ocorrem à noite ou de madrugada, próximo aos finais de semana e véspera de feriados, o que demonstra que a ruptura está associada ao desgaste da equipe de construção e a supervisão menos intensa. O método construtivo NATM apresenta grande vulnerabilidade para as falhas humanas.

g) Técnicas de escavação com a face aberta não são exclusivas de túneis em NATM e são um risco em todas as formas de construção de túnel. Um risco particular do método NATM é a ausência de qualquer recurso rápido de suporte para a frente de escavação numa situação de emergência, como no início de uma ruptura com o solo avançando para dentro do túnel. Nota-se a importância dos planos e procedimentos de contingência (emergência).

h) A monitoração é um meio eficaz de avaliação de segurança, desde que a instrumentação de campo seja projetada, acompanhada e interpretada corretamente, e as intervenções necessárias sejam feitas em tempo hábil para ações corretivas. Entretanto,

to, observou-se que para solos rijos e para a região da face de escavação de um túnel, a instrumentação nem sempre é eficaz.

i) Os mecanismos de “Detecção do Risco” e “Ação Corretiva”, que consistem na observação ativa e na intervenção eficaz em tempo hábil, são fundamentais para assegurar o sucesso dos trabalhos de túneis executados em NATM. Quanto mais cedo descobre-se um problema, mais rápido tem-se chance de solucioná-lo.

j) Para se obter um controle efetivo dos riscos em construção de túneis têm-se que, no início do projeto, identificar os riscos e melhorar as estratégias de controle de riscos efetivos, nas circunstâncias específicas de cada caso.

k) Para se minimizar a probabilidade de encontrar-se condições inesperadas de natureza crítica sugere-se:

- a elaboração de um planejamento de investigação geológica-geotécnica em mais de uma etapa e em função do método construtivo selecionado;
- avaliação das estabilidades globais e locais da frente de escavação, antes e durante a execução do túnel, utilizando parâmetros do maciço mais refinados, obtidos nas investigações de campo e ensaios de laboratório adicionais;
- seleção do método construtivo que seja adequado e compatível com as condições geológicas, utilizando-se análises de risco e de decisão;
- minimização dos riscos através de: traçado alternativo de túneis em planta e em perfil; investigação geológica-geotécnica adicional; ajuste da geometria interna do túnel; variação do número e locação de poços de acesso e emboques; revisão do controle de recalque a ser medido; alteração da seqüência construtiva inicialmente proposta, com justificativa técnica; evitar a paralisação prolongada das obras etc;
- apoio da Assessoria Técnica da Obra (ATO) durante todo o período de construção de um túnel, possibilitando decisões rápidas quanto a adaptações do método construtivo, controle de desempenho e conformidades com o projeto.

l) A implantação da “Cultura de Segurança” entre projetistas, construtores e proprietários, provavelmente proporcionarão uma redução dos acidentes com túneis em NATM.

Os autores agradecem antecipadamente aos profissionais que contribuirão com novas informações que complementem o banco de dados de acidentes com túneis. 

BIBLIOGRAFIA

1. Pelizza, S. (1996). Trends and development in tunnelling. In: International Seminar on Urban Problems and Underground Solutions, São Paulo, 1996. Proceedings. p.1-24.
2. Pelizza, S.; Grasso P. (1998). Tunnel collapses: are they unavoidable? World Tunnelling, Mar., 1998. p.71-75.
3. Hachich, W.C. (1978). Sobre a segurança nos projetos de geotecnia. São Paulo, 1978. 94p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
4. HSE - Health and Safety Executive (1996). Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels. UK: HSE Books.
5. Gehring, J. (1989). Alguns conceitos na utilização do NATM. Caderno Especial de Túneis, Editora Pini, Sistemas Construtivos, São Paulo. p.41-47.
6. Cruz, H. J. V.; Couto, J. V. S.; Hori, K.; Salvoni, J. L.; Ferrari, O.A. (1982). Os túneis do prolongamento norte - uma primeira avaliação do NATM em área urbana. In: Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, 1., ABGE, Rio de Janeiro, 1982. Anais. v.1, p.297-316.
7. Negro, A.; Sozio, L. E.; Ferreira, A. A. (1992). Túneis. Capítulo 13 de Solos da Cidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
8. Ribeiro Neto, F. (1999). Segurança, ruptura e colapso de túneis urbanos em NATM. São Paulo, 1999. 171p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
9. Teixeira, A.H. (1995). Tratamento de maciços de solos. In: SIMPÓSIO DE TÚNEIS URBANOS, 1., TURB, ABGE, São Paulo, 1995. Anais. p.163-182.
10. Sozio, L. E.; Ferreira, A. A.; NEGRO, A. (1998). Lições da ruptura de um túnel sob pequenos deslocamentos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11., Brasília. Anais. v.3. p.1623-1630.
11. Rocha, H. C. (1990). Trabalho da disciplina Projeto e Construção de Obras Subterrâneas do curso de pós-graduação da USP - São Carlos, intitulado “Dois casos de ruptura em túneis urbanos escavados pelo NATM”. (Biblioteca USP).
12. Takeuchi, M.; Ferreira, O. F.; Meguro, G. K. (1994). Relato da experiência de um tratamento por injeção de cimento em maciço sedimentar terciário. In: Simpósio Brasileiro de Escavações Subterrâneas, Brasília, 1994. Anais. p.383-397.
13. Targas, D. N.; Takashi, C. M. (1997). Complexo Viário Maria Maluf: Aspectos relevantes do projeto e da execução de túneis. In: Simpósio de Túneis Urbanos, 2., TURB 97, ABGE, São Paulo, 1997. Anais. p.147-154.
14. Bitar, O. M.; Azevedo, A. A.; Cella, P. R. C. (1997). Avaliação de impactos ambientais de túneis urbanos. In: Simpósio de Túneis Urbanos, TURB 97, 2., ABGE, São Paulo, 1997. Anais. p.33-42.
15. Margarido, A. B.; Gama e Silva, R. L.; Neme, P. A.; GARCIA, F. A.; Oliveira, R. A.; Matar, D. Jr. (1997). Aspectos relevantes do projeto e construção do complexo Ayrton Senna”. In: Simpósio de Túneis Urbanos, 2., TURB 97, ABGE, São Paulo, 1997. Anais. p.163-179.
16. Rocha, H. C.; Hori, K.; Ribeiro Neto, F. (1999). Aspectos construtivos nos túneis do metrô paulistano nos sedimentos da Bacia de São Paulo. Congresso de Geologia de Engenharia, 9., ABGE, São Pedro, 1999. Anais.
17. Anderson, J. M. (1997). World wide research points to the need for new approaches to control tunnelling risks. In: Tunnelling Under Difficult Conditions, Basel. Proceedings. p.87-95.
18. Anderson, J. M.; Rawlings, C. G.; Lance, G.A. (1998). Preconstruction assessment strategy of significant engineering risks in tunnelling. In: International Congress on Underground Construction, Estocolmo, 1998. Proceedings.
19. Anderson, J. M. (1998a). Minimising underground construction risks needs maximum engineering effort. In: Underground City - Geotechnology and Architecture. St Petersburg, Rússia, 1998. Proceedings. p.63-68.
20. Anderson, J. M. (1998b). Can we have a “Safety Culture” in the tunnelling business? Tunnelling and Underground Space Technology. v.13, n.3, p.213-215.
21. Sturk, R.; Olsson, L.; Johansson, J. (1996). Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm Ring Road Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, v.11, n.2, p.157-164, 1996.

*ENGENHEIRO CIVIL GEOTÉCNICO, METRÔ/SP. MESTRE EM ENGENHARIA PELA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP.

**DOUTOR EM ENGENHARIA, PROFESSOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS E FUNDAÇÕES, EPUSP. DIRETOR DA GEOCOMPANY TECNOLOGIA, ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE.