

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INOVAÇÃO EM ANÁLISE DE RISCO E TOMADA DE DECISÃO  
EM ESCAVAÇÕES DE TÚNEIS**

**BIANCA ORSINI DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD**

**DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G.DM-279/17**

**BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO /2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INOVAÇÃO EM ANÁLISE DE RISCO E TOMADA DE DECISÃO EM  
ESCAVAÇÕES DE TÚNEIS**

**BIANCA ORSINI DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

**APROVADA POR:**

\_\_\_\_\_ André Pacheco de Assis, PhD (UnB)  
**(ORIENTADOR)**

\_\_\_\_\_ Luis Fernando Martins Ribeiro, DSc (UnB)  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

\_\_\_\_\_ Gabriel Zapata, DSc (UnB)  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 11 de Fevereiro de 2017.**

# FICHA CATALOGRÁFICA

ORSINI, BIANCA

Inovação em Análise de Risco e Tomada de Decisão em Escavações de Túneis, Distrito Federal, 2017

xviii, 96 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2017)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| 1. Túneis            | 2. Gerenciamento de Risco |
| 3. Análise de Risco  | 4. Inovação               |
| 5. Tomada de decisão | 6. Escavações             |
| I. ENC/FT/UnB        | II. Título (série)        |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORSINI, B. (2017). Inovação em Análise de Risco e Tomada de Decisão em Escavações de Túneis. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-279/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bianca Orsini

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado: Inovação em Análise de Risco e Tomada de Decisão em Escavações de Túneis

GRAU / ANO: Mestre / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Bianca Orsini  
SQN 408, BLOCO O, APTO 208  
70856150 - Brasília/DF – Brasil  
biaorsini@gmail.com

**Apesar destas dificuldades, parece haver uma tendência lenta, mas constante, na sociedade a se aceitar os conceitos de análise de risco. A comunidade geotécnica tem a obrigação de tomar nota desses desenvolvimentos e incentivar o ensino e a utilização prática da técnica probabilística, bem como determinística, com o objetivo de eliminar o manto de mistério que envolve o uso desses métodos (Hoek, 1991).**

À minha família, a quem devo tudo que conquisto, do fundo do meu coração.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor André Assis, por acreditar no tema desde o começo, me permitindo trabalhar com o que gosto; por me guiar tão bem ao longo do processo; e por ter proporcionado minha participação no WTC 2016, que foi decisivo, tanto para o desenvolvimento desta dissertação, quanto para meu desenvolvimento profissional.

À minha mãe, por tudo na minha vida.

Ao meu pai, pela inspiração e suporte sempre.

Aos meus irmãos, por me aguentarem nos momentos mais difíceis.

Aos amigos que apoiaram, Max, Bernardo, Parreira, Bárbara e Marília, mas, especialmente, Vinícius, por não hesitarem em ajudar.

# **INOVAÇÃO EM ANÁLISE DE RISCO E TOMADA DE DECISÃO EM ESCAVAÇÕES DE TÚNEIS**

## **RESUMO**

Apesar de obras subterrâneas serem intrinsicamente dotadas de incertezas, os avanços tecnológicos - tanto nos instrumentos de medição, quanto no processamento e transferência de dados - e científicos - desenvolvimento de pesquisas na área da Engenharia Geotécnica - têm possibilitado a prática eficaz do gerenciamento de riscos nesses projetos. No entanto, há muito a ser desenvolvido sobre o assunto e o que já existe, até o momento, ainda é pouco divulgado. Visando contribuir para a divulgação das possibilidades práticas do gerenciamento de risco em escavações de túneis, fez-se, nesta dissertação, uma revisão e compilação dos processos e tecnologias existentes atualmente. Utilizando o fluxo genérico de análise de risco descrito na NBR ISO 31000:2009, descreveu-se as melhores práticas abordadas na literatura para cada etapa do gerenciamento do risco durante a construção de túneis, bem como quais tecnologias, ainda não incorporadas no contexto geotécnico, poderiam contribuir para melhorar esse gerenciamento. Após a abordagem teórica de como seria o modelo ideal de operação em cada etapa do fluxo, bem como exemplificação de como ocorreria o processo como um todo na prática, foi possível perceber que o gerenciamento eficaz do risco é viável e já poderia ser melhor desenvolvido atualmente, não sendo a tecnologia o atual fator limitante. Em última instância, dando-se importância e visibilidade ao assunto, pode-se contribuir para incentivar a adoção de túneis como solução de infraestrutura no Brasil, já que a diminuição dos riscos torna a alternativa mais interessante do ponto de vista econômico e social.

# **INNOVATION IN RISK ANALYSIS AND DECISION-MAKING ON TUNNEL EXCAVATIONS**

## **ABSTRACT**

Although underground works are intrinsically endowed with uncertainties, technological advances - both in measuring instruments and in data processing and transferring - and scientific advances - research development in the area of Geotechnical Engineering - have made it possible to effectively manage the risk in this kind of project. However, there is much to be developed on the subject and what already exists, so far, is still little publicized. Aiming to contribute to the dissemination of the practical possibilities of risk management in tunnel excavations, this dissertation reviews and compiles the existing processes and technologies. Using the generic flow of risk analysis described in NBR ISO 31000:2009, the best practices discussed in the literature for each stage of risk management during the construction of tunnels were described, as well as which technologies, not yet incorporated in the geotechnical context, could contribute to improve the management of risk. After the theoretical approach of what would be the ideal model of operation at each stage of the flow and an exemplification of how the process as a whole would occur in practice, it was possible to realize that effective risk management is feasible and could already be better applied, with technology not being a current limiting factor. Ultimately, giving importance and visibility to the subject, one can contribute to encourage the adoption of tunnels as an infrastructure solution in Brazil, since the reduction of risks makes the alternative more interesting from an economic and social point of view.

# SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 – EVOLUÇÃO DOS PROJETOS DE TÚNEIS .....	1
1.1.1 - PRÁTICAS ATUAIS DE INSTRUMENTAÇÃO .....	4
1.1.2 - PRÁTICAS ATUAIS DE MONITORAMENTO .....	5
1.1.3 - PRÁTICAS ATUAIS DE ANÁLISE DE RISCO .....	7
1.1.4 - PRÁTICAS ATUAIS DE TOMADA DE DECISÃO E CONTROLE DE DANOS....	8
1.2 – MOTIVAÇÃO.....	10
1.3 – OBJETIVOS.....	11
1.4 – ESCOPO.....	11
<b>2 – REVISÃO TEÓRICA DO PROCESSO DE ANÁLISE DE RISCO</b> .....	<b>12</b>
2.1 – ESTABELECIMENTO DO CONTEXTO.....	13
2.2 – MONITORAMENTO E REVISÃO.....	16
2.3 – IDENTIFICAÇÃO DOS RISCOS .....	23
2.3.1 - CONVERGÊNCIA.....	23
2.3.2 – DESLOCAMENTOS ABSOLUTOS (3D) .....	28
2.3.2.1 – HISTÓRICO DOS DESLOCAMENTOS.....	29
2.3.2.2 – CURVA DE DEFLEXÃO .....	33
2.3.2.3 – LINHA DE TENDÊNCIA .....	34
2.3.2.4 – DIFERENÇA ENTRE DESLOCAMENTOS.....	35
2.3.2.5 – RAZÃO ENTRE DESLOCAMENTOS .....	36
2.3.2.6 – VETOR DESLOCAMENTO.....	37
2.3.3 – EXTRUSÃO DA FACE .....	40
2.4 – ANÁLISE DE RISCO .....	42
2.5 – AVALIAÇÃO DO RISCO.....	49



2.6 – MITIGAÇÃO DO RISCO .....	51
2.6.1 – SISTEMAS ESPECIALISTAS .....	52
2.6.2 – APLICAÇÃO EM TÚNEIS .....	53
2.7 – COMUNICAÇÃO E CONSULTA .....	58
2.7.1 – COMUNICAÇÃO TÉCNICA.....	58
2.7.2 – COMUNICAÇÃO PÚBLICA .....	59
2.7.2.1 – VISÃO GERAL .....	60
2.7.2.2 – APLICAÇÃO EM TÚNEIS.....	63
<b>3 – APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ANÁLISE DE RISCO.....</b>	<b>65</b>
3.1 – METODOLOGIA.....	65
3.1.1 – PROGRAMA COMPUTACIONAL .....	65
3.1.2 – GEOLOGIA.....	67
3.1.3 – TÚNEL .....	70
3.1.4 – ANÁLISE DE RISCO .....	72
3.2 – RESULTADOS .....	74
3.2.1 – SIMULAÇÃO COM GEOLOGIA DIFERENTE 1 .....	75
3.2.2 – SIMULAÇÃO COM GEOLOGIA DIFERENTE 2 .....	81
3.2.3 – ANÁLISE DE RISCO .....	87
<b>4 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>92</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Principais parâmetros observáveis de acordo com o tipo de escavação (ITA, 2011).	17
<b>Tabela 2.2.</b> Eventos típicos de risco e as correspondentes variáveis de observação (OGG, 2014) .....	18
<b>Tabela 2.3.</b> Parâmetros observáveis e métodos aplicáveis de observação (OGG, 2014).....	19
<b>Tabela 2.4.</b> Exemplo de cruzamento da classe de dificuldade do projeto e sensibilidade da região, fatores que influenciam na definição dos possíveis riscos (Yan, 2016). ....	20
<b>Tabela 2.5.</b> Classificação dos projetos de acordo com sua dificuldade (Yan, 2016).....	20
<b>Tabela 2.6.</b> Classificação dos projetos de acordo com a sensibilidade da região (Yan, 2016).....	21
<b>Tabela 2.7.</b> Relação entre o grau de monitoramento os itens frequentemente monitorados (Yan, 2016).....	22
<b>Tabela 2.8.</b> Matriz 4x4 de interação entre estrutura da rocha, tensão na rocha, presença de água e construção (Cai et. al, 2000 citando Hudson, 1992) .....	55
<b>Tabela 3.1.</b> Propriedades da Geologia Esperada (GE).....	68
<b>Tabela 3.2.</b> Propriedades da Geologia Diferente 1 (GD1).....	69
<b>Tabela 3.3.</b> Propriedades da Geologia Diferente 2 (GD2).....	69
<b>Tabela 3.4.</b> Matriz de avaliação do risco.....	73
<b>Tabela 3.5</b> Tabela de probabilidades para relação entre condição geológica, estratégia de construção e modo de ruptura .....	73
<b>Tabela 3.6.</b> Tabela de probabilidades para a relação entre o modo de ruptura, o nível de ocupação da superfície e o nível dos danos.....	73
<b>Tabela 3.7.</b> Nomenclatura dos custos.....	91
<b>Tabela 3.8.</b> Conjunto de cálculo a ser realizado quando há mudança nas variáveis da árvore Bayesiana. ....	91

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Principais causas de acidentes em projetos de túneis (Assis, A., 2016).....	6
<b>Figura 1.2.</b> Função do monitoramento na análise de risco (Assis, 2016). .....	7
<b>Figura 1.3.</b> Diagrama de etapas de monitoramento do processo construtivo (ITA, 2011 citando Tunnel Lining Design Guide, 2004) .....	10
<b>Figura 2.1.</b> Fluxo genérico de análise de risco (ABNT NBR ISO 31000:2009) .....	12
<b>Figura 2.2.</b> Distribuição hipotética de curvas representando o grau de incerteza associados ao valor do carregamento e resistência ao cisalhamento para os diferentes estágios de projeto de estruturas, como túneis (Hoek, 1991).....	15
<b>Figura 2.3.</b> Ilustração da medição ótica da convergência 3D (ITA, 2011 citando ITA-CET 2009) .....	25
<b>Figura 2.4.</b> Gráficos para a análise da: (a) Distância versus tempo. (b) Convergência versus tempo. (c) Convergência versus distância (ITA, 2011 citando Hudson, 1995). .....	27
<b>Figura 2.5.</b> Funções calculadas por meio da retro análise dos parâmetros X e C para uma zona de falha com espessura de um diâmetro de túnel e razão entre as rigidezes dos maciços igual a 2,0 (Schubert et. al, 2004). .....	28
<b>Figura 2.6.</b> Componentes do deslocamento em um ponto no teto do túnel (Grossauer & Schubert, 2008).....	29
<b>Figura 2.7.</b> Gráfico típico do histórico dos deslocamentos (ITA, 2011 citando OEGG, 2005).....	30
<b>Figura 2.8.</b> Gráfico do histórico dos deslocamentos mostrando sinais de creep no maciço (ITA, 2011 citando OEGG, 2005).....	31
<b>Figura 2.9.</b> Distribuição da tensão e deslocamentos finais durante a escavação em uma zona de falha (Schubert et. al, 2004) .....	31
<b>Figura 2.10.</b> Deslocamentos medidos desviando dos deslocamentos previstos devido à falha no invert temporário (Sellner et. al, 2002) .....	32
<b>Figura 2.11.</b> Curva de deflexão típica para uma escavação em maciço homogêneo (OEGG, 2014) .....	33
<b>Figura 2.12.</b> Gráfico típico da linha de tendência no caso de uma escavação com uma zona de falha à frente (OEGG, 2014).....	34
<b>Figura 2.13.</b> Gráfico da diferença de deslocamentos verticais no teto e na lateral da seção transversal para uma escavação em maciço fraturado (ITA, 2011 citando OEGG, 2005) .....	36

<b>Figura 2.14.</b> Possíveis razões entre deslocamentos (Grossauer & Schubert, 2008). .....	<b>36</b>
<b>Figura 2.15.</b> Linha de tendência da razão entre os deslocamentos no teto e na lateral da seção transversal do túnel (OEGG, 2014).....	<b>37</b>
<b>Figura 2.16.</b> Possíveis vetores deslocamento (Grossauer & Schubert, 2008).....	<b>37</b>
<b>Figura 2.17.</b> Influência da zona de falha no desvio da orientação do vetor deslocamento para diferentes contrastes de rigidez (Grossauer et. al, 2005).....	<b>38</b>
<b>Figura 2.18.</b> Vetores deslocamento na seção transversal; influência da presença de falhas fora e dentro da seção escavada: (a) Concentração de tensão entre a lateral esquerda da seção e a falha causa aumento dos deslocamentos na lateral esquerda. (b) Falha adicional perto da lateral direita ocasiona o aumento dos deslocamentos na lateral direita; (c) Zona de falha passando pela seção escavada causa aumento dos deslocamentos somente no teto (OEGG, 2014).....	<b>39</b>
<b>Figura 2.19.</b> Gráficos: (a) Extrusão da face versus tempo. (b) Extrusão da face versus avanço da escavação (Lunardi, 2008) .....	<b>41</b>
<b>Figura 2.20.</b> Densidades de probabilidade para resistência (R) e carregamento (Q) típicos (Baecher & Christian, 2003) .....	<b>44</b>
<b>Figura 2.21.</b> Função de Densidade de Probabilidade de M (Baecher & Christian, 2003).....	<b>45</b>
<b>Figura 2.22.</b> Previsão da geologia e tomada de decisão durante a escavação, baseadas na árvore Bayesiana (Sousa & Einstein, 2012).....	<b>47</b>
<b>Figura 2.23.</b> Estrutura simples de modelo de decisão baseado na árvore Bayesiana (Sousa & Einstein, 2012) .....	<b>48</b>
<b>Figura 2.24.</b> Matriz de determinação qualitativa do risco (Brown e Booth, 2009).....	<b>49</b>
<b>Figura 2.25.</b> Curva de Farmer para avaliação do risco (Assis, 2016) .....	<b>50</b>
<b>Figura 2.26.</b> Modelo de rede neural baseada com múltiplos parâmetros do solo como inputs (Lai et. al, 2016).....	<b>55</b>
<b>Figura 2.27.</b> Exemplo de cadeia de comparações para produção de um resultado em um sistema especialista .....	<b>56</b>
<b>Figura 2.28.</b> Estratigrafia do Grupo Paranoá no DF (modificado de Faria, 1988) .....	<b>57</b>
<b>Figura 2.29.</b> BIM 5D para escavação de túneis. Elementos do software e resumo de suas funções (Žibert et. al, 2016).....	<b>59</b>
<b>Figura 2.30.</b> Exemplo de aplicativo MicroMapper (MicroMappers, 2016).....	<b>63</b>

<b>Figura 3.1.</b> Esquema representativo: a) Vista superior do modelo. b) Pontos de coleta de deslocamentos na seção transversal do túnel. ....	<b>70</b>
<b>Figura 3.2.</b> Modelagem no programa PLAXIS 3D Tunnel: (a) Seção transversal. (b) Representação dos sistemas de eixos no modelo 3D .....	<b>71</b>
<b>Figura 3.3.</b> Ponto A para obtenção dos valores de deslocamentos no teto das seções transversais escavadas: (a) Seção transversal em localização no modelo 3D. (b) Seção transversal .....	<b>71</b>
<b>Figura 3.4.</b> Modelo de aplicativo: (a) Telas inicial. (b) Tela de escolha do parâmetro a ser visualizado.....	<b>74</b>
<b>Figura 3.5.</b> Histórico dos deslocamentos verticais no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD1 .....	<b>76</b>
<b>Figura 3.6.</b> Histórico do deslocamento horizontal no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD1 .....	<b>76</b>
<b>Figura 3.7.</b> Razão entre os deslocamentos verticais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD1 .....	<b>77</b>
<b>Figura 3.8.</b> Razão entre os deslocamentos horizontais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD1 .....	<b>78</b>
<b>Figura 3.9.</b> Curva de Deflexão para GD1 .....	<b>79</b>
<b>Figura 3.10.</b> Curva de Deflexão desprezando-se os deslocamentos anteriores à escavação do ponto para GD1 .....	<b>79</b>
<b>Figura 3.11.</b> Linha de Tendência para GD1 .....	<b>80</b>
<b>Figura 3.12.</b> Vetor deslocamento formado pelos deslocamentos vertical e horizontal no teto das seções transversais, a 3 m da face para GD1.....	<b>81</b>
<b>Figura 3.13.</b> Histórico dos deslocamentos verticais no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD2 .....	<b>82</b>
<b>Figura 3.14.</b> Histórico dos deslocamentos horizontais no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD2.....	<b>83</b>
<b>Figura 3.15.</b> Razão entre os deslocamentos verticais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD2 .....	<b>83</b>
<b>Figura 3.16.</b> Razão entre os deslocamentos horizontais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD2 .....	<b>84</b>
<b>Figura 3.17.</b> Curva de Deflexão para GD2 .....	<b>84</b>

<b>Figura 3.18.</b> Curva de Deflexão desprezando-se os deslocamentos anteriores à escavação do ponto para GD2 .....	<b>85</b>
<b>Figura 3.19.</b> Linha de Tendência para GD2 .....	<b>86</b>
<b>Figura 3.20.</b> Vetor deslocamento formado pelos deslocamentos vertical e horizontal no teto das seções transversais, a 3 m da face para GD2.....	<b>86</b>
<b>Figura 3.21.</b> Esquema de decisão com base em árvore Bayesiana .....	<b>87</b>
<b>Figura 3.22.</b> Árvore Bayesiana após detectada mudança de geologia (GD1).....	<b>88</b>
<b>Figura 3.23.</b> Modelo de aplicativo, aviso de risco médio .....	<b>88</b>
<b>Figura 3.24.</b> Árvore Bayesiana após medidas de mitigação do risco.....	<b>89</b>
<b>Figura 3.25.</b> Árvore Bayesiana após detectada mudança de geologia (GD2).....	<b>89</b>
<b>Figura 3.26.</b> Modelo de aplicativo, aviso de risco extremo .....	<b>90</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

3D	Três dimensões
5D	Cinco dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIDR	Inteligência artificial para Resposta Digital
ALARP	As Low As Rational Possible
API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Modelling
<i>c</i>	Coesão
C	Convergência
$C_R$	Consequências do risco
$C_R'$	Consequências atualizadas do risco
$C_\infty$	Fechamento correspondente a uma taxa de avanço de escavação infinita
CA	Medidas adotadas
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CC	Custos de construção
D	Deslocamento
<i>e</i>	Evidências
E	Módulo de rigidez
$E_{50}$	Módulo de rigidez obtido pelo carregamento triaxial
$E_{oed}$	Módulo de rigidez obtido pelo carregamento oedométrico
$E_{ur}$	Módulo de rigidez obtido pelo descarregamento triaxial
<i>f</i>	Probabilidade discreta
F	Fator de segurança
$F_n$	Probabilidade acumulada
GE	Geologia esperada

GD1	Geologia Diferente 1
GD2	Geologia Diferente 2
GPa	Gigapascal
H	Hipótese
H <sub>L</sub>	Deslocamento horizontal na lateral esquerda da seção transversal do túnel
H <sub>R</sub>	Deslocamento horizontal na lateral direita da seção transversal do túnel
ICCM	International Conference on Crisis Mapping
ICOLD	International Commission on Large Dams
ICT	Information and Communication Technologies
ISO	International Organization for Standardization
ITA	International Tunnelling and Underground Space Association
ITA-CET	International Tunneling and Underground Space Association – Committee on Education and Training
kN	Quilonewton
L	Deslocamento longitudinal (na direção da escavação)
m'	Parâmetro que descreve o efeito do tempo na equação de convergência
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
mm	Milímetro
M	Margem de segurança
MPa	Megapascal
n	Parâmetro que descreve o efeito do tempo na equação de convergência
NBR	Norma Brasileira
OGG	Austrian Society for Geomechanics
p	Experiências passadas
P	Probabilidade



P'	Probabilidade após as medidas remediadoras
PAE	Plano de Ação Emergencial
Q	Função densidade de probabilidade do carregamento
QCRI	Instituto de Pesquisa Computacional do Qatar
R	Função densidade de probabilidade da resistência
R'	Risco atualizado
S	Deslocamento vertical
S <sub>L</sub>	Deslocamento vertical na lateral esquerda da seção transversal do túnel
S <sub>R</sub>	Deslocamento vertical na lateral direita da seção transversal do túnel
SIG	Geographic Information Systems
SMS	Short Message Service
T	Parâmetro que descreve o efeito do tempo na equação de convergência
TBM	Tunnel Boring Machine
U	Custos das consequências do risco
UN	United Nations
V	Evento
WRD	World Record of Dams
X	Parâmetro que corresponde ao efeito da face (está relacionado ao raio plástico) na equação de convergência
$\beta$	Índice de confiabilidade
$\Delta C$	Incremento de convergência
$\phi$	Ângulo de atrito
$\Phi$	Integral
$\gamma_{sat}$	Peso específico saturado
$\gamma_{unsat}$	Peso específico não saturado
$\mu$	Média

$\mu_Q$	Média da distribuição de probabilidade de Q
$\mu_R$	Média da distribuição de probabilidade de R
$\mu_F$	Média do fator de segurança
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho_{RQ}$	Coefficiente de correlação entre R e Q
$\sigma^2$	Variância
$\sigma_Q^2$	Variância da distribuição de probabilidade de Q
$\sigma_R^2$	Variância da distribuição de probabilidade de R
$\sigma$	Desvio padrão
$\sigma_F$	Desvio padrão do fator de segurança
$\sigma_Q$	Desvio padrão da distribuição de probabilidade de Q
$\sigma_R$	Desvio padrão da distribuição de probabilidade de R
$\Psi$	Coefficiente de dilatação

# **1 – INTRODUÇÃO**

Neste capítulo, faz-se uma sucinta revisão da evolução dos projetos de túneis até os dias atuais, abordando, em seguida, as práticas atuais de instrumentação, monitoramento, análise de risco e tomada de decisão e controle de danos. Por fim, apresenta-se a motivação, os objetivos (principal e secundário) e o escopo da presente dissertação, respectivamente.

## **1.1 – EVOLUÇÃO DOS PROJETOS DE TÚNEIS**

Estruturas subterrâneas estiveram presentes desde o começo da civilização, sendo utilizadas para proteção e abrigo, transporte de produtos ou pessoas, armazenamento ou mineração. A construção de túneis, por sua vez, começou em regiões onde as condições geológicas eram favoráveis, ou seja, em locais que não demandavam grandes soluções de engenharia, já que pouco se conhecia sobre o comportamento do maciço.

Com o processo de urbanização, túneis passaram a ser estruturas cada vez mais necessárias e os métodos de escavação tiveram que evoluir para se adaptar às condições encontradas nos locais. As cidades, como Londres, geralmente se desenvolviam em regiões com condições geográficas estratégicas, mas com condições geotécnicas desafiadoras, com a presença de rios, por exemplo. Nesse período, chamado Era Antiga da engenharia de túneis, muito se desenvolveu a partir da experiência dos profissionais da área e os métodos de túneis eram elaborados por tentativa e erro.

Com o avanço da tecnologia e dos conhecimentos da chamada Engenharia Geotécnica, compreendeu-se melhor as propriedades do maciço, dando condições de previsão de comportamento e maior precisão na elaboração dos projetos. A partir daí, a engenharia de túneis se desenvolveu rapidamente. Durante a Era Moderna, principalmente entre as décadas de 1970 e 1990, ocorreram avanços significativos em duas frentes principais (Bierley, 2016):

- desenvolvimento Tecnológico
  - novos métodos de escavação e suporte – TBMs de face aberta ou fechada.

- métodos de escavação à fogo – equipamentos mais precisos e rápidos de perfuração; desenvolvimento de novos materiais explosivos, como gel a base de água, mais seguros e baratos; sistemas mais precisos de detonação.
- métodos de melhoria do maciço - drenagem, injeção de calda de cimento, congelamento etc.
- desenvolvimento Técnico e Contratual
  - entendimento do comportamento do solo ou rocha – com o desenvolvimento de novos modelos de análise, inclusive métodos computacionais, que permitiram melhor precisão durante a fase de projeto.
  - novas práticas de contrato – adoção de práticas contratuais que delegavam responsabilidades às partes envolvidas e diminuem disputas judiciais.
  - investigações de subsuperfície – avanço nos meios de investigação das propriedades do maciço ou solo e na preparação do relatório geotécnico para documentação contratual. O relatório passou a dar ênfase no valor e relevância dos dados, para projeto e construção, de forma que esses permitissem previsões acuradas de comportamento. Com isso, estimulou-se também a implementação de programas observacionais durante a construção, para comparação com as previsões.

Após a virada do século, houve um crescimento expressivo da população urbana. Em 2001, 47% da população mundial vivia em cidades, percentual que cresceu para 54% em 2015 (UN, 2016). Com essa intensa conurbação, onde o espaço na superfície é cada vez mais escasso, a tendência futura, ao que tudo indica, é o uso do espaço subterrâneo.

Outro fator que corrobora para a construção de túneis é a chegada da Era Ambiental, que vive-se atualmente. Nessa Era, é cada vez mais importante levar em consideração fatores ambientais e sociais, além de fatores econômicos, na avaliação da melhor solução de infraestrutura. Nenhuma alternativa provê valor a longo prazo com menor impacto na comunidade e no meio ambiente, principalmente para áreas de grande densidade populacional, do que um projeto subterrâneo.

Segundo Roxo (2003), por exemplo, dentre as vantagens da adoção de túneis para rodovias, quando comparado com outras opções de infraestrutura, estão:

- preservação da paisagem natural;
- menor perturbação do tráfego, quando em áreas urbanas;
- menor custo de expropriação;
- redução do impacto social e econômico na região;
- possibilidade de manter o uso da superfície para outros fins;
- preservação de patrimônios culturais e científicos;
- menor poluição sonora e do ar na superfície;
- menores distâncias e tempos de deslocamento;
- menor interferência na saúde dos habitantes da região e consequente diminuição de gastos com saúde pública.

No entanto, túneis continuam sendo, na maioria dos casos, a solução mais cara financeiramente, demandando maior investimento inicial e altos custos de operação. Além disso, o ambiente subterrâneo é pouco compreendido, a par dos profissionais e técnicos da área, sendo associado a medos e mitos. Muito do receio do subterrâneo é agravado pelos acidentes, que, quando ocorrem, podem gerar grandes perdas econômicas e de vida humana, sendo amplamente divulgados pelos meios de comunicação.

Dessa forma, a redução dos custos de construção e operação, bem como a diminuição dos acidentes, potencializaria o uso desse tipo de alternativa no mundo, mudando a percepção da sociedade sobre seus riscos e dos investidores sobre a sua viabilidade econômica. Segundo Roxo (2003), dentre as possíveis áreas que podem ser abordadas para redução dos custos e riscos em túneis, pode-se citar:

- melhores estudos geológicos e geotécnicos, com adequada e suficiente exploração do terreno;
- melhor projeto, desenvolvido por engenheiros e geólogos experientes;
- avaliação do melhor traçado, visando redução do volume escavado e necessidade de suporte;
- uso adequado de sistemas de monitoramento e sinalização durante as fases de construção e operação;
- inspeção regular do túnel e seus equipamentos.

Dentre essas áreas, uma das mais impactantes para a redução, tanto dos custos quanto dos riscos, é a melhoria do monitoramento do comportamento do maciço durante a construção. Um

monitoramento adequado, que interprete os dados recebidos da instrumentação de maneira rápida e eficiente, permitiria a previsibilidade dos problemas à frente, antes da ocorrência de qualquer acidente ou perda econômica. A qualidade do monitoramento, por sua vez, dependerá, dentre outros fatores, da qualidade dos dados coletados pelos instrumentos e da transformação desses dados em informação útil.

### **1.1.1 – PRÁTICAS ATUAIS DE INSTRUMENTAÇÃO**

A medição dos deslocamentos absolutos durante a escavação está substituindo a dos deslocamentos relativos, pois permite um monitoramento mais eficaz, como será explicitado no próximo capítulo.

Os dados geralmente monitorados atualmente são (Rabensteiner, 2016):

- deformação longitudinal e convergência do túnel;
- deformação de estruturas subterrâneas e vias públicas;
- deformação de prédios, pontes e demais estruturas na superfície;
- movimentos do terreno (horizontal e vertical);
- movimento relativo em juntas e falhas;
- nível do lençol freático e poro pressão;
- tensão em membros estruturais temporários ou permanentes do túnel;
- temperatura;
- vibração de elementos sensíveis.

Para a obtenção desses dados, vale-se da instrumentação geodésica, além da geotécnica, e os instrumentos são instalados tanto na superfície como na face escavada. Pode-se citar os seguintes instrumentos (Rabensteiner, 2016):

- instrumentação de superfície:
  - controle do recalque com medidores de níveis, taquímetros, teodolitos (com ou sem refletores);
  - controle da inclinação por meio de inclinômetros;
  - controle da poropressão por piezômetros;
  - monitoramento das fissuras por fissurômetros;

- monitoramento do deslocamento vertical por meio de medidores de nível e estações totais (automáticas e sem uso de refletores);
- monitoramento de deslocamento 3D por estações totais (manuais e automáticas), GPS ou escaneamento a laser.
- instrumentação da estrutura do túnel e do maciço escavado:
  - taquímetros, teodolitos com refletores;
  - extensômetros, inclinômetros;
  - strain gauges, células de carga, células de pressão;
  - piezômetros.

A maior parte desses instrumentos não foi desenvolvida recentemente. As inovações na instrumentação ocorreram, principalmente, no modo de transmissão dos dados, com sensores wireless e cabos de fibra ótica, além do uso de equipamentos para medições aéreas, como satélites e drones.

### **1.1.2 – PRÁTICAS ATUAIS DE MONITORAMENTO**

O monitoramento eficaz depende da correta e rápida interpretação dos dados coletados pelos instrumentos. Dentre as funções do monitoramento, pode-se citar: checar se as premissas de projeto estão corretas; controlar a estabilidade da escavação; controlar a carga nos elementos de suporte; fazer análise retroativa dos dados e melhorar a solução técnica; controlar a efetividade de métodos construtivos como injeções e tirantes; garantir segurança aos trabalhadores e equipamentos; garantir segurança e confiança a terceiros. Todas essas funções ajudam no processo de retro análise do projeto e gerenciamento dos riscos durante processo construtivo, como mostra o diagrama da Fig. 1.1.

Pode-se identificar dois cenários principais quando há falha no monitoramento: ou os dados mostraram comportamento diferente do esperado, mas foram negligenciados; ou os dados não mostraram mudança de comportamento a tempo de serem executadas as medidas remediadoras necessárias.

O primeiro cenário é agravado devido à tendência de adoção de contratos do tipo *design-build* (preço global) e pela pouca informação sobre as condições geológicas da obra na fase de licitação. As empresas participantes da licitação, ao tentarem competir com o menor preço, apresentam um projeto que não condiz com a realidade do local. Durante a construção, a empresa tenta ao máximo não alterar o projeto para não acarretar em extensão do cronograma ou aumento dos custos, negligenciando o monitoramento dos dados. Em casos extremos, se medidas não forem tomadas, haverá perda de estabilidade e as consequências são muito piores, tanto financeiras, quanto sociais.

A maior causa dos acidentes reportados é ocasionada por inadequação do projeto e/ou do método construtivo, como apresentado na Fig. 1.1 (ITIG, 2007).



Figura 1.1 - Principais causas de acidentes em projetos de túneis (ITIG, 2007).

Negligência ou ignorância dos dados reportados pela instrumentação foram causas de alguns dos maiores acidentes em obras subterrâneas, como o do Heathrow Express Tunnel, em 1994, no Reino Unido, e o da estação de metrô de São Paulo, em 2007 (Wong & Chan, 2015).

A respeito do segundo cenário de falha no monitoramento citado anteriormente, segundo relatório da Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo (ITA, 2011), ao longo das últimas décadas, as técnicas de monitoramento melhoraram consideravelmente e esse cenário ocorre cada vez menos. Atualmente, com a era da internet das coisas, comunicação *wireless* e sistemas de



mapeamento e GPS cada vez mais avançados, possivelmente vive-se um novo período de revolução em projetos de túneis (Bierley, 2016).

### 1.1.3 – PRÁTICAS ATUAIS DE ANÁLISE DE RISCO

Recentemente, o monitoramento dos dados da instrumentação passou a ser parte essencial da análise de risco em obras subterrâneas (Fig. 1.2). Isso porque esses dados já provêm um meio de controle da construção, por meio da verificação do comportamento de parâmetros, como os deslocamentos verticais. Esses parâmetros passam a ser indicadores de risco, com valores limite estabelecidos, que, quando excedidos, indicam alteração do nível de segurança da construção. A definição dos valores limite leva em consideração o parâmetro monitorado, os valores aceitáveis, a probabilidade de excedência do valor e as consequências em caso de excedência.

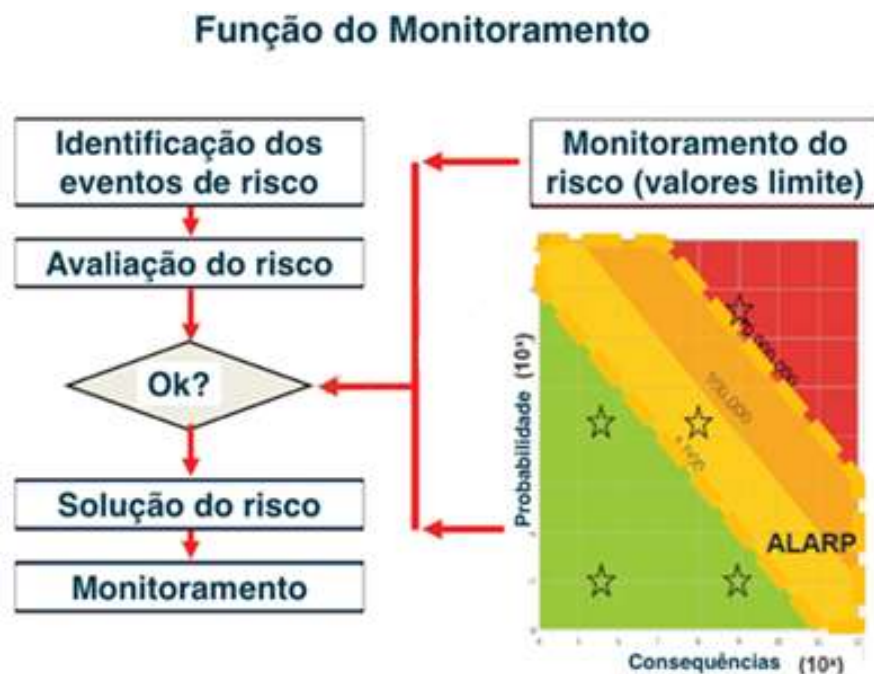


Figura 1.2 - Função do monitoramento na análise de risco (Assis, 2016).

Segundo Amberg (2016), os riscos geotécnicos podem ser distinguidos em:

- riscos na superfície devidos à escavação do túnel e/ou devidos ao método de escavação e/ou devido a presença de água
  - recalque de prédios e infraestruturas existentes;

- recalque das instalações (eletricidade, gás, água etc.);
- vibrações excessivas.
- Riscos no subterrâneo devidos aos métodos de escavação e/ou às condições existentes no solo ou maciço
  - deformações excessivas;
  - instabilidade da seção transversal e/ou da face;
  - desmoronamento;
  - queda de blocos de rocha.

Os sistemas de transmissão e coleta dos dados de instrumentação evoluíram, permitindo, inclusive, o monitoramento online do comportamento do túnel. Além disso, atualmente pode-se contar com *softwares* de acompanhamento e processamento dos dados, que emitem alertas em caso de risco inaceitável. Tais *softwares* possuem uma interface amigável, que fornece as informações ao usuário de forma simples e direta.

Segundo Rabensteiner (2016), apresentar um estado da arte em monitoramento de dados como elemento chave em um projeto garante que:

- todas as medições sejam armazenadas na estrutura correta;
- todos os participantes do projeto tenham os resultados e exportem informações importantes;
- alertas sejam atingidos quando os limites forem atingidos;
- valor seja agregado ao projeto;
- apenas uma fonte de verdade exista, melhorando a comunicação entre os agentes.

#### **1.1.4 – PRÁTICAS ATUAIS DE TOMADA DE DECISÃO E CONTROLE DE DANOS**

Além da definição dos indicadores de falha e seus valores limite, deve-se definir os planos de ação em caso de estrapolação desses limites. Planos de ação bem definidos e divulgados para todos os envolvidos são essenciais dentro do gerenciamento do risco, já que, geralmente, não se dispõe de muito tempo entre o acionamento do alerta e a ocorrência do evento. Assim, as informações devem ser passadas rapidamente, de forma a permitir a rápida tomada de decisão e aplicação dos procedimentos de contingência de danos.

Além de uma clara atribuição de responsabilidades entre os trabalhadores, os contratos devem dar margem para ação. Segundo Grøv (2016), os contratos em obras subterrâneas devem dar liberdade para uma resposta rápida em casos de mudanças das condições geológicas. Em uma situação típica, as responsabilidades são atribuídas da seguinte forma:

- o proprietário da obra executa as pré-investigações geológicas e apresenta o projeto base;
- o proprietário escolhe o tipo de contrato, de forma a atender a todas as diferentes circunstâncias do projeto;
- o proprietário pode optar por contratar o projeto e as investigações do projeto executivo, bem como o monitoramento durante a escavação;
- especificações técnicas, e até mesmo regras de pagamento, são decisivas para a quantidade e tipo de monitoramento a ser feito;
- a contratante pode incluir o monitoramento com pagamento à parte ou com valor incluso no montante fixo;
- as especificações do monitoramento a ser executado durante a escavação é item incluso nas especificações técnicas.

Assim, percebe-se que o monitoramento é responsabilidade da contratante. No entanto, se as condições geológicas encontradas forem diferentes do especificado em projeto, e o contrato não for flexível, a tomada de decisão será dificultada, já que o contrato não admite mudanças.

Resumindo o exposto nesta seção, o gerenciamento de risco, essencial nos projetos de túneis, muitas vezes executados em condições adversas, depende do correto monitoramento da escavação. Um programa de gerenciamento adequado inclui a seleção dos melhores indicadores de falha, determinação dos valores limite para diferentes riscos e especificação dos planos de ação para contenção dos danos. Além disso, esse programa de gerenciamento só alcançará seu potencial máximo se tiver o suporte de contratos flexíveis, softwares para análise e interpretação rápida e eficiente dos dados e boa prática de todos os agentes envolvidos. A Fig. 1.3 apresenta, de maneira simplificada, o fluxo de informações que deve ser mantido ao longo da escavação.

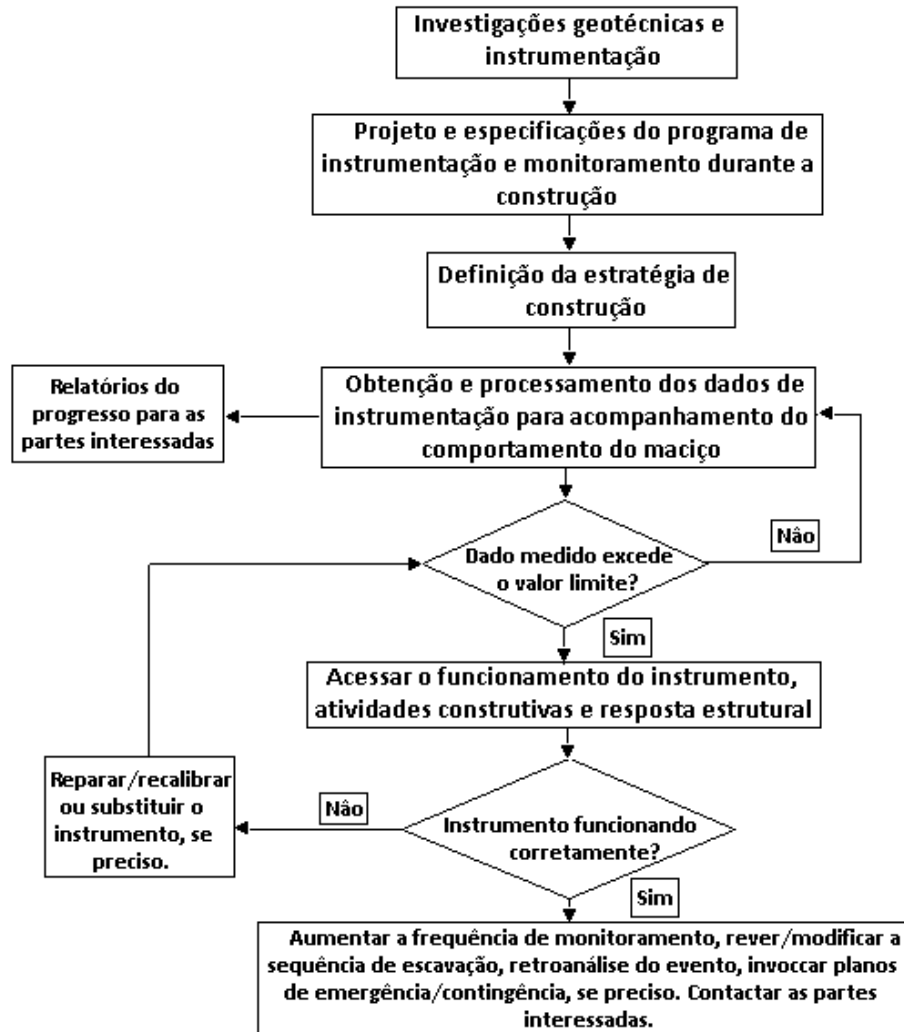


Figura 1.3 - Diagrama de etapas de monitoramento do processo construtivo (ITA, 2011 citando Tunnel Lining Design Guide, 2004).

## 1.2 – MOTIVAÇÃO

A análise e o gerenciamento do risco durante a escavação de túneis são temas que têm se desenvolvido devido aos avanços tecnológicos. Muitos dos conceitos e métodos são assuntos novos, com potencial para serem explorados e com grande poder de impacto no uso do espaço subterrâneo. Com as ferramentas certas, o acompanhamento do risco proporciona o controle de acidentes em obras intrinsecamente dotadas de alto nível de incerteza.

No Brasil, especificamente, há um atraso ainda mais significativo, pois, geralmente, a tecnologia utilizada nas construções é importada, com pouco desenvolvimento da técnica nacional. Espera-se que este trabalho contribua para o desenvolvimento desse conhecimento para obras brasileiras. Ainda que o enfoque seja em túneis, as técnicas e os princípios gerais, apresentados neste trabalho, podem ser aplicados às demais estruturas subterrâneas.

### **1.3 – OBJETIVOS**

O objetivo principal desta dissertação é revisar e compilar os desenvolvimentos mais recentes na área de análise de risco durante a construção de túneis.

Como objetivos secundários, sempre que possível, serão incluídas informações sobre novas tecnologias e como aplicá-las em cada etapa do processo de análise de risco.

### **1.4 – ESCOPO**

A presente dissertação está organizada em quatro capítulos. O Capítulo 1, como visto, é composto por uma introdução sobre a evolução dos projetos de túneis até as práticas atuais, além da motivação, objetivos e escopo da dissertação. Já no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões.

O Capítulo 2, por sua vez, é estruturado com base nas etapas do processo de análise de risco. As etapas são: estabelecimento do contexto, monitoramento e revisão, identificação, análise, avaliação, mitigação e comunicação e consulta do risco. Para cada etapa, apresenta-se uma revisão teórica sobre o conhecimento existente e, quando possível, são abordadas novas tecnologias.

No Capítulo 3, demonstra-se a aplicação dos conceitos teóricos vistos no Capítulo 2 em um exemplo simples de escavação, com a utilização do *software* PLAXIS 3D Tunnel.

## 2 – REVISÃO TEÓRICA DO PROCESSO DE ANÁLISE DE RISCO

Segundo a NBR ISO 31000 (ABNT, 2009), o processo para controle de riscos segue as etapas mostradas na Fig. 2.1, com constante entrada de dados e retro análise. A seguir, cada uma dessas etapas será abordada no contexto de obras subterrâneas.

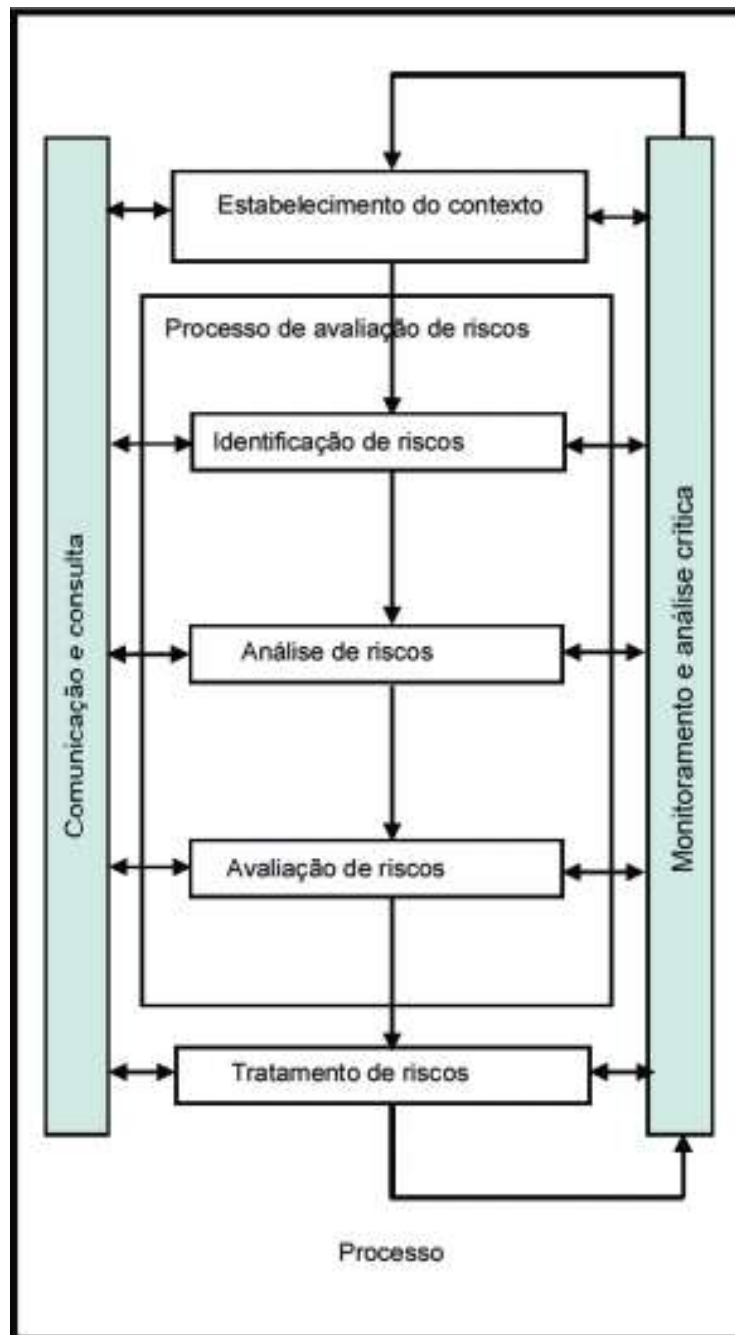


Figura 2.1 – Fluxo genérico de análise de risco (ABNT, 2009).

Para fins desse trabalho, define-se a terminologia a ser utilizada para análise de risco como apresentada em Brown (2012):

- risco: efeito causado pelas incertezas em um objetivo específico;
- fonte de risco: elemento que sozinho, ou combinado com outros, tem o potencial de criar um risco;
- nível de risco: magnitude de um risco, ou conjunto de riscos, expresso em termos da combinação das consequências e suas probabilidades de ocorrerem;
- evento ou incidente: ocorrência ou mudança de um conjunto particular de circunstâncias;
- consequência de um evento: o resultado quando um evento afeta o objetivo específico;
- probabilidade: a chance de algo ocorrer.

Em se tratando de obras subterrâneas, o risco pode estar relacionado ao colapso do material, por exemplo: a fonte de risco poderia ser o aumento da poropressão; o nível de risco estaria condicionado à probabilidade do evento colapso devido aos altos valores de poropressão e as consequências, materiais ou não, desse evento.

## **2.1 – ESTABELECIMENTO DO CONTEXTO**

Segundo a NBR ISO 31000 (ABNT, 2009), nesta etapa define-se os parâmetros externos e internos a serem levados em consideração ao gerenciar riscos, bem como o estabelecimento do escopo e dos critérios de risco para a política de gestão de riscos. Ou seja, é nessa etapa que se levanta quais os possíveis eventos de risco, com base no contexto do projeto. Os critérios envolvem os requisitos de desempenho da escavação (máximo recalque da superfície permitido, por exemplo), e podem ser derivados tanto de normas, leis e políticas, como de projetos estruturais das construções na área de escavação. Essa fase requer a experiência dos especialistas para definição dos riscos relevantes.

Nesta dissertação, essa etapa será utilizada para definição do escopo do gerenciamento de risco em obras de túneis. Em engenharia, risco é comumente definido como o produto da probabilidade de ocorrência de um evento pelas consequências desse evento, caso ele ocorra:

$$\text{Risco} = \text{probabilidade} \times \text{consequência} = P \times C \quad (2.1)$$

Quando mais de um evento contribuir para o risco de um incidente principal, a equação é estendida para a soma dos produtos do risco de cada um dos componentes do conjunto de eventos:

$$\text{Risco} = \sum_i P_i C_i \quad (2.2)$$

A probabilidade de ocorrência de um evento, como o colapso do túnel, por exemplo, está condicionada às incertezas presentes em todas as fases do projeto. Alguns autores, como Baecher & Christian (2003) dividiram as fontes de incerteza em aleatórias ou epistêmicas.

Incerteza aleatória ocorre devido à aleatoriedade irreduzível no caso de fenômenos que são, naturalmente, variáveis no tempo ou espaço, ainda que o sistema seja bem conhecido. As geometrias das descontinuidades e as propriedades hidráulicas e mecânicas dos maciços rochosos são exemplos dessa variabilidade natural. A incerteza epistêmica, por outro lado, surge a partir de limitações no nosso conhecimento fundamental, ou na nossa compreensão de alguns aspectos de um problema. Essa última pode ser refletida, por exemplo, na utilização de modelos inadequados em análises (Brown, 2012).

Assim, para o gerenciamento do risco, é importante saber quais incertezas podem ser desconsideradas no projeto, construção e operação dos túneis e quais continuarão intrínsecas a esse tipo de obra. Durante a fase de projeto, quanto maior for a confiabilidade nos parâmetros, tais como carregamento aplicado e propriedades de resistência do maciço, menores são as incertezas e mais assertivo é o projeto.

Como ilustrado na Fig. 2.2, durante a fase do projeto preliminar, o montante de informação é geralmente limitado. Nessa fase, a estimativa das propriedades de resistência do maciço depende da experiência do engenheiro de projetos, que pode ser suplementada, em alguns casos, por sistemas de classificação, como o proposto por Hoek e Brown (1988), e ensaios. Além disso, a magnitude dos carregamentos pode ainda não estar bem definida. Nesse caso, a extensão dos possíveis valores de resistência e carregamento é maior, aumentando a área em que há



probabilidade de colapso, representada pela sobreposição das curvas, e, assim, o risco (Brown, 2012).

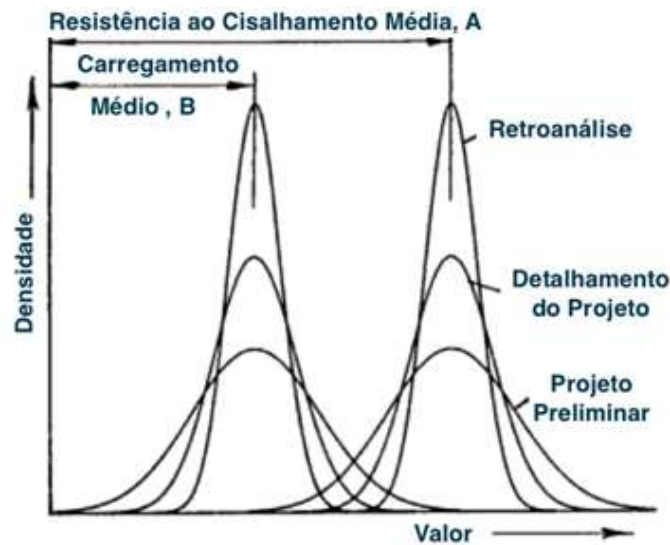


Figura 2.2 - Distribuição hipotética de curvas representando o grau de incerteza associados ao valor do carregamento e resistência ao cisalhamento para os diferentes estágios de projeto de estruturas, como túneis (Hoek, 1991).

Já durante o detalhamento do projeto, a quantidade de informação disponível é significativamente maior do que na fase preliminar. Um programa de ensaios e investigações do material é normalmente realizado, e o carregamento externo terá sido mais bem definido. Além disso, os estudos de percolação e de distribuição de poropressões no maciço, juntamente com modificações dessas distribuições devido às práticas de injeção ou drenagem, geralmente já foram realizados. Por conseguinte, a extensão dos valores possíveis de resistência, bem como das tensões aplicadas, é menor, e as curvas de distribuição são significativamente restringidas (Brown, 2012).

No entanto, ainda que os métodos computacionais tenham reduzido as incertezas com relação à análise de instabilidade, as incertezas com relação ao material e ao carregamento continuarão existindo durante a fase de construção. O processo de acompanhamento das mudanças dos parâmetros e análise retroativa (última etapa no gráfico) é, então, essencial para diminuição das incertezas e, conseqüentemente dos riscos.

## **2.2 – MONITORAMENTO E REVISÃO**

O nível de esforço e despesa exigidos no emprego da instrumentação e do monitoramento dependem do método de escavação, da natureza do projeto, dos perigos percebidos e do nível de risco. A necessidade de instrumentação e monitoramento durante a execução de um túnel, com projeto bem definido e em condições geológicas bem conhecidas, por exemplo, é menor do que em ambientes de alto risco, como túneis rasos, com condições de terreno variáveis, ou onde espera-se que haja movimentos de terra significativos.

Para uma correta avaliação do comportamento do túnel, no contexto da análise de risco, durante sua construção, deve-se identificar, primeiramente, que tipo de medição forneceria informações relevantes para essa análise. Ainda que essa relevância varie de acordo com as especificidades dos projetos, diversos autores buscaram categorizar esses parâmetros, o que serve como base para a definição do programa de monitoramento. Uma dessas categorizações é dada na Tab. 2.1, fornecida pela ITA (2011) para dois tipos de escavação. Já a Tab. 2.2 procura agrupar os parâmetros observáveis de acordo com os tipos mais comuns de acidentes em túneis e suas causas prováveis.

A definição dos parâmetros a serem monitorados acarreta na seleção dos tipos de instrumentos utilizados. A Tab. 2.3 apresenta os tipos mais comuns de equipamentos utilizados para instrumentação, bem como quais dados são coletados.

Tabela 2.1 - Principais parâmetros observáveis de acordo com o tipo de escavação (ITA, 2011).

	Método Convencional (túnel raso em áreas urbanas)	Tuneladora de Face Fechada (áreas urbanas)
<b>0. Inspeção Visual</b>	√	O
<b>1. Parâmetros Geométricos</b>		
Deslocamento horizontal	√	
Recalque na superfície	√	√
Rotação da superfície	O	O
Extrusão do solo a frente da face do túnel	•	
Deslocamentos radiais	√	
Monitoramento de fissuras	O	
Deformação do revestimento permanente	X	X
<b>2. Parâmetros Mecânicos</b>		
Força (base do arco, tirante, etc.)	√	
Tensão no solo		
Tensão no suporte/revestimento	O	X
<b>3. Parâmetros hidráulicos</b>		
Percolação	O	
Chuva na superfície	X	
Níveis do lençol freático no solo	√	√
<b>4. Outros Parâmetros</b>		
Temperatura do ar no túnel		O
Pressão do ar no túnel		X
Data e hora	√	√
Vibrações devido à explosão	√	

X: parâmetro secundário, geralmente; O: parâmetro importante, frequentemente; √: parâmetro essencial, sempre monitorado; •: parâmetro essencial, sempre monitorado quando a escavação é à face plena com pré-confinamento

Tabela 2.2 - Eventos típicos de risco e as correspondentes variáveis de observação (OGG, 2014).

Evento	Devido a	Variáveis de observação						
		Recalques na superfície	Ângulo de inclinação	Deslocamentos e tensões no suporte	Nível d'água e poropressão	Deslocamentos da face	Estrutura do maciço	Deslocamentos no maciço
Recalques inaceitáveis na superfície, deslocamentos nas estruturas	Consolidação	x	-	x	x	-	-	x
	Ruptura por cisalhamento do maciço	x	o	x	-	-	-	x
	Deformação excessiva da face	x	o	-	-	x	-	-
	Ruptura do invert	-	-	x	-	-	-	-
	Danos ou ruptura do suporte	-	-	x	-	-	-	-
Queda de blocos devido à presença de descontinuidades	Descontinuidade com orientação desfavorável	-	-	o	-	-	x	-
Violação da abertura do túnel e/ou ruptura do suporte	Deformações excessivas	-	-	x	-	-	-	x
	Ruptura por cisalhamento em estruturas geológicas dominantes*	-	-	x	-	-	-	x
	Expansão do solo	-	-	x	x	-	-	x

\*também devido às deformações excessivas, mas assimetria das deformações, juntamente com planos sistemáticos de fraqueza predominantemente influenciam o comportamento do sistema.  
x: muito relevante; o: relevância limitada; -: irrelevante.

Tabela 2.3 - Parâmetros observáveis e métodos aplicáveis de observação (OGG, 2014).

	Monitoramento dos deslocamentos 3D	Monitoramento dos deslocamentos da face	Medidores de nível	Extensômetros	Células de carga	Tiltímetros	Sistemas medidores hidrostáticos de nível	Inclinômetros	Piezômetros	Medidores do nível d'água	Strain gauges	Sondas no invert	Bússolas e clinômetros	Mapeamento digital da superfície	Inspeção visual
<b>Recalques na superfície</b>	X	-	X	X	-	-	O	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>Deformações das estruturas</b>	X	-	X	X	X	-	O	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>Deslocamentos no suporte</b>	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Tensões no suporte</b>	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-
<b>Carga nos tirantes</b>	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Integridade do invert</b>	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X
<b>Nível d'água</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-
<b>Poropressão</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
<b>Deslocamentos na face</b>	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Estrutura do maciço</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X
<b>Deslocamentos no maciço</b>	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>Inspeção qualitativa da integridade do suporte</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X

x: muito relevante; o: relevância limitada; -: irrelevante.

Após a definição dos parâmetros relevantes e instrumentos, prepara-se um plano adequado para instalação desses instrumentos e captação dos dados de comportamento dos parâmetros, que alimente a sequência de análise de riscos da Fig. 2.1. De acordo com o grau de relevância da instrumentação para a segurança da obra, determina-se o melhor *layout* e espaçamento entre as matrizes de instrumentação. Quanto maiores os riscos, maior o nível de detalhe (volume de dados)

e grau de redundância necessária. Alguma redundância em instrumentos e pontos instrumentados é sempre desejável como forma de segurança contra falta de confiabilidade das leituras ou falha do instrumento (ITA, 2011).

Como apresentado por Yan (2016), o grau de monitoramento pode ser avaliado com base na tabela condicional apresentada na Tab. 2.4.

Tabela 2.4: Exemplo de cruzamento da classe de dificuldade do projeto e sensibilidade da região, fatores que influenciam na definição dos possíveis riscos (Yan, 2016).

**Grau de Monitoramento**

Sensibilidade da região Grau de monitoramento Classe de dificuldade do projeto	1	2	3	4
A	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>I</b>
B	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
C	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>III</b>

Nesse caso, as dificuldades do tipo de projeto e a sensibilidade do local podem ser definidos de acordo com as Tab. 2.5 e Tab.2.6, respectivamente. Os parâmetros relevantes, de acordo com o grau de monitoramento e objeto monitorado, estão combinados na Tab. 2.7.

Tabela 2.5 - Classificação dos projetos de acordo com sua dificuldade (Yan, 2016).

<b>Classe</b>	<b>Dificuldade do projeto</b>
A	Túnel muito raso; diâmetro muito grande etc.
B	Túnel raso; túneis próximos, paralelos ou entre cruzantes; grandes diâmetros etc.
C	Túnel profundo; seção transversal comum.

Tabela 2.6 – Classificação dos projetos de acordo com a sensibilidade da região (Yan, 2016).

<b>Classificação</b>	<b>Sensibilidade da região</b>
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência, na área mais afetada pelo projeto, de ferrovias e metrô, edifícios importantes, túneis ou pontes importantes, rios ou lagos;</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência, na área mais afetada pelo projeto, de edifícios comuns, túneis ou pontes comuns, rodovias ou dutos subterrâneos importantes;</li> <li>• Na área menos afetada, existência de ferrovias e metrô, edifícios importantes, túneis ou pontes importantes, rios ou lagos;</li> <li>• Escavação sob estruturas metroviárias existentes;</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência, na área mais afetada pelo projeto, de rodovias importantes, dutos subterrâneos comuns e infraestrutura municipal;</li> <li>• Na área menos afetada, existência de edifícios comuns, túneis ou pontes comuns, rodovias ou dutos subterrâneos;</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Na área menos afetada, existência de ruas importantes, dutos subterrâneos ou infraestrutura municipal comuns.</li> </ul>

Resumindo as informações das tabelas, os principais parâmetros monitorados durante a escavação são os deslocamentos na superfície do terreno sob influência da escavação, influência da escavação nas estruturas adjacentes (deslocamentos, vibração, fissuras, deformação), poropressões e comportamento do túnel (deslocamentos e tensões).

Tabela 2.7 - Relação entre grau de monitoramento e itens frequentemente monitorados (Yan, 2016).

Objeto monitorado	Item monitorado	Grau de monitoramento		
		I	II	III
Estrutura do Túnel	Deslocamento Vertical	√	√	√
	Deslocamento Horizontal	√	O	O
	Convergência	√	√	√
	Tensão no Suporte	O	O	O
Maciço	Recalque	√	√	√
	Deslocamento horizontal	O	O	O
	Deslocamento vertical de cada substrato	O	O	O
	Tensão no Maciço em contato com o suporte	O	O	O
	Poropressão	O	O	O
Prédios e outras Estruturas	Deslocamento Vertical	√	√	
	Deslocamento Horizontal	O	O	
	Distorção	O	O	
	Fissuras	√	O	
Dutos Subterrâneos	Deslocamento Vertical	√	O	
	Deslocamento Horizontal	O	O	
	Recalque diferencial	√	O	
Rodovias	Deslocamento Vertical do Pavimento e da Base	√	O	
	Deslocamento Vertical da Estrutura de Contenção	√	O	
	Inclinação da Estrutura de Contenção	√	O	
Pontes	Deslocamento Vertical do Pier	√	√	
	Recalque Diferencial do Pier	√	√	
	Inclinação do Pier ou do Pilar	√	√	
	Tensão na Viga ou na Laje	O	O	
	Fissuras	√	O	
Linhas de Metrô Existentes	Deslocamento Vertical da Estrutura do Túnel	√	√	
	Deslocamento Horizontal da Estrutura do Túnel	√	O	
	Convergência da Estrutura do Túnel	O	O	
	Recalque Diferencial da Junta de Deformação da Estrutura do Túnel	√	√	
	Deslocamento Vertical dos Trilhos	√	√	
	Geometria Estática dos Trilhos (traçado, altura, nível, etc.)	√	√	
	Fissuras no Túnel e nos Trilhos	√	O	
Ferrovias Existentes	Deslocamento Vertical da Base	√	√	
	Geometria Estática dos Trilhos (traçado, altura, nível, etc.)	√	√	

√ : item compulsório; O: item optativo



## **2.3 – IDENTIFICAÇÃO DOS RISCOS**

Segundo a NBR ISO 31000 (ABNT, 2009), identificação de riscos é o processo de busca, reconhecimento e descrição dos riscos. Ela envolve a identificação das fontes de risco, eventos, suas causas e suas consequências. No caso da construção de túneis, a identificação de risco é feita por meio do monitoramento dos parâmetros. O aumento dos deslocamentos na face, por exemplo, é uma fonte de risco, pois tem o potencial intrínseco de dar origem ao risco.

Além do acompanhamento do comportamento dos dados diretamente medidos pelos instrumentos, como o deslocamento de um ponto, o acompanhamento do comportamento de parâmetros secundários, provenientes da análise e manipulação desses dados, tem se mostrado efetivo na identificação de riscos. Tais parâmetros secundários podem acusar efeitos globais mais rapidamente, representando melhor a redistribuição de tensões, e os deslocamentos associados, do túnel, incluindo o trecho ainda não escavado. Os parâmetros primários, por sua vez, são mais pontuais, medindo comportamentos locais.

A seguir são apresentados alguns parâmetros utilizados para acompanhamento do comportamento do maciço. A ênfase, no caso de análise de risco, deve ser dada nos parâmetros que mais se distinguem de acordo com as condições geológicas. Dessa forma, a mudança do comportamento esperado, para o qual o projeto foi desenhado, é identificada o mais cedo possível e a tomada de decisão é agilizada, permitindo rápida ação de contenção de danos e alteração no projeto.

### **2.3.1 – CONVERGÊNCIA**

A convergência é um dos primeiros parâmetros secundários que surgiram com o desenvolvimento dos sistemas de monitoramento em túneis. Convergência é a redução da seção escavada devido à redistribuição de tensões no maciço e aos deslocamentos associados. Durante a escavação, quando não ocorre mecanismo de ruptura, a convergência da seção decresce gradualmente, até que o equilíbrio seja atingido. A taxa de decrescimento depende de fatores como as condições do maciço, do sistema de suporte, do procedimento de escavação e do estado de tensões inicial.

A convergência é um parâmetro proveniente da medição da posição relativa de pinos, placas ou refletores, posicionados na parede escavada, imediatamente após a escavação da seção. Tal medição é tradicionalmente feita por meio de fios invar ou extensômetros de fita. No entanto, avanços mais recentes estão tornando os métodos ópticos à prática padrão.

Esse método consiste na instalação de refletores ópticos ao longo do túnel - normalmente 5 a 7 refletores são instalados em cada seção: na coroa, meia-coroa e ao longo da parede - e na medição do deslocamento absoluto dos mesmos, por meio do posicionamento de estações totais, que são movidas conforme o avanço da escavação. As estações totais medem o movimento no túnel nas três dimensões. Um dos benefícios do método óptico é a não obstrução da passagem, que prejudica o processo de construção (Riaz, 2015).

Atualmente, o monitoramento por meio de estações totais pode ser feito de forma automatizada e motorizada. Nesse caso, em intervalos específicos, o instrumento lê a posição dos alvos instalados no seu raio de influência. Os dados são, então, processados e transferidos para um banco de dados remoto (Riaz, 2015).

O método óptico tridimensional de medição da convergência já tem sido usado em um número significativo de projetos de escavações de túneis (ITA, 2011). As vantagens desse método estão sumarizadas na Fig. 2.3.

A fotogrametria digital, que trabalha com imagens de uma cena, tiradas de diferentes locais usando câmeras digitais padrão, até mesmo smartphones, que, após processadas por meio de programas, fornecem a localização exata de onde foram tiradas as fotos (Leonova, 2014), é inaplicável em algumas condições extremas de escavação de túneis. No entanto, a varredura a laser pode ser utilizada mesmo nessas situações complexas para a medição da abertura da seção do túnel, captando a deformação no intervalo entre duas medições.



Figura 2.3 - Ilustração da medição óptica da convergência 3D (ITA, 2011 citando ITA-CET 2009)

A vantagem da varredura a laser, em relação à medição com uma estação total, é proporcionar o monitoramento da seção completa, por meio de milhões de pontos 3D, em vez de focar apenas em um limitado número de pontos (Wang *et al.*, 2014). O deslocamento da superfície de escavação é determinado por comparação entre as nuvens de pontos obtidas em diferentes ciclos de medição.

A interpretação dos dados de convergência é baseada em modelos de regressão propostos, como em Sulem *et al.* (1987), que propõe que o fechamento do túnel,  $D$ , é influenciado tanto pela distância da face, quanto pelo comportamento, dependente do tempo, do maciço:

$$C(x, t) = C_{\infty} \left\{ 1 - \left[ \frac{x}{x-X} \right]^2 \right\} \left\{ 1 + m' \left[ 1 - \left( \frac{T}{t-T} \right)^n \right] \right\} \quad (2.3)$$

onde  $x$  é a distância que a seção de monitoramento está da face; e  $t$  é o tempo decorrido desde que a face cruzou a seção monitorada; o parâmetro  $C_{\infty}$  representa o fechamento correspondente a uma taxa de avanço de escavação infinita; o parâmetro  $X$  corresponde ao efeito da face e está relacionado ao raio plástico; os parâmetros  $m'$ ,  $T$  e  $n$  descrevem o efeito do tempo; a quantidade  $C(1+m')$  representa a convergência no tempo e distância infinitos.

Já a convergência medida pode ser definida como:

$$C(t) = D_0 - D(t) \quad (2.4)$$

onde  $C(t)$  é a convergência no tempo  $t$  entre quaisquer dois pontos opostos na seção do túnel;  $D_0$  é a medição inicial da distância entre dois pontos; e  $D(t)$  é a medição, no tempo  $t$ , da distância entre esses pontos. A convergência é considerada positiva se a distância entre os pontos decresce e negativa se aumenta (ITA, 2011).

A convergência medida é uma fração do fechamento total e, geralmente, depende da distância da face,  $x_0$ , na leitura inicial e no tempo  $t_0$  decorrido desde que a face cruzou a seção monitorada até a leitura inicial (Perazzelli *et al.*, 2011):

$$\Delta C(x_i, t_i) = C(x_i, t_i) - C(x_0, t_0) \quad i=1,k \quad (2.5)$$

Trabalhos realizados, como o de Barlow (1986), comprovaram a adequação da equação de convergência com os dados reais medidos.

Para realizar a completa análise da convergência em um caso simples de escavação de face plena, três gráficos típicos devem ser plotados, como mostra a Figura 2.4: (a) distância  $x$  entre a seção monitorada e a face de escavação versus o tempo; (b) a convergência  $C$  versus o tempo; (c)  $C$  versus  $x$  (ITA 2011, citando Hudson, 1995). Ainda que o efeito do avanço da face decresça rapidamente com  $x$ , a inclinação da curva de convergência é muito mais expressiva perto da face. Assim, é importante que a primeira medição seja tomada o mais perto possível da face de escavação. Quando a face de escavação avança para distâncias duas a três vezes o diâmetro do túnel, para além da seção monitorada, a convergência é controlada pelo comportamento reológico do maciço e pela rigidez do suporte (ITA, 2011).

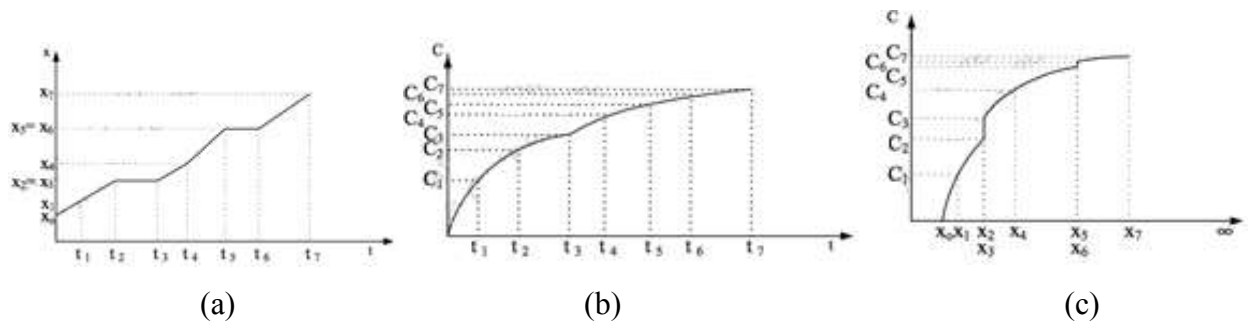


Figura 2.4: Gráficos para a análise da: (a) Distância versus tempo. (b) Convergência versus tempo. (c) Convergência versus distância (ITA, 2011 citando Hudson, 1995).

Até meados da última década, no entanto, o monitoramento da convergência era realizado para fins de acompanhamento da estabilidade da seção escavada, pouco se relacionando com a predição dos deslocamentos do maciço à frente da escavação. Os trabalhos realizados no Instituto de Mecânica das Rochas e Túneis (Institute of Rock Mechanics and Tunneling) da Graz University of Technology, principalmente com a contribuição de Schubert, contribuíram para a mudança desse paradigma. Por meio da comparação dos valores esperados de convergência com os valores medidos, Schubert *et al.* (2003) mostraram que pode-se prever os deslocamentos antes da escavação.

A previsão da convergência pode ser feita de duas formas: pela retroanálise da equação analítica de convergência após a obtenção dos dados das primeiras medições (método chamado de Método de Previsão por Extrapolação) (Grossauer *et al.*, 20 citando Steindorfer, 1998); ou pela obtenção dos parâmetros da função por meio de um banco de dados que armazena o conhecimento de retroanálises de casos anteriores, com características similares (Método da Previsão Pura). Esse último método pode ser utilizado para previsão inicial, quando nenhuma leitura de monitoramento foi realizada ainda (Grossauer *et al.*, 2005)..

Segundo Schubert *et al.* (2004), seguindo a ideia de que a mudança no campo de tensões em um maciço rochoso heterogêneo causa efeito nos deslocamentos de convergência esperados, os parâmetros  $X$ ,  $T$ ,  $C_{\infty}$  e  $m'$  da função analítica de convergência (Eq. 2.3) também devem refletir a situação geotécnica.

A Fig. 2.5 mostra os valores do cálculo iterativo dos parâmetros  $X$  e  $C_{\infty}$  da função, para uma largura

de zona de falha equivalente a um diâmetro do túnel e um contraste de rigidez de 2,0 entre os dois maciços. Pode-se ver que o parâmetro X aumenta significativamente a uma distância de 15 m à frente da transição entre o maciço mais rígido e o menos rígido. O parâmetro  $C_{\infty}$  também começa a aumentar, mas a uma distância de aproximadamente 10 m da transição (Schubert *et al.*, 2003).

Assim, o acompanhamento desses parâmetros pode ser útil para a análise de risco, já que pode-se detectar, a metros de distância, a mudança das condições geológicas. Essa antecipação da mudança de comportamento do maciço permite a adaptação do projeto e redução dos riscos.

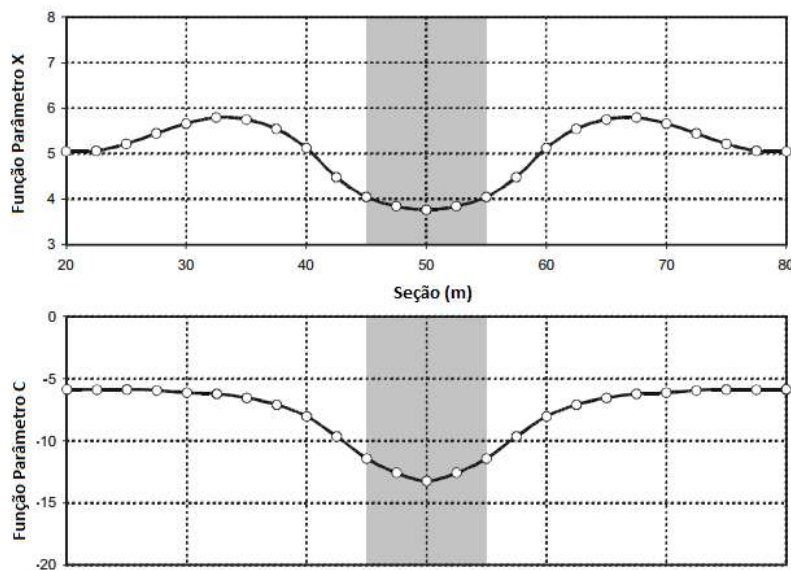


Figura 2.5 - Funções calculadas por meio da retro análise dos parâmetros X e  $C_{\infty}$  para um maciço com uma zona de falha (correspondente à região cinza do gráfico) com espessura de um diâmetro de túnel e rigidez duas vezes menor do que a do maciço (Schubert *et al.*, 2004).

### 2.3.2 – DESLOCAMENTOS ABSOLUTOS (3D)

Ao longo da última década, a análise dos deslocamentos absolutos tem sido desenvolvida como meio de previsão do comportamento do maciço e monitoramento da estabilidade, substituindo a análise da convergência.

Os deslocamentos absolutos passaram a ser monitorados devido ao avanço das técnicas de instrumentação, que permitiram a medição desses deslocamentos, ao invés da medição dos deslocamentos relativos. A análise dos deslocamentos absolutos contribui para o melhor

entendimento dos processos geomecânicos durante a escavação do túnel, o que, eventualmente, permite a previsão das condições do solo à frente da escavação.

O deslocamento absoluto pode ser considerado como um parâmetro primário, ou seja, diretamente medido pela instrumentação. A manipulação dos valores desses deslocamentos, por sua vez, pode ser utilizada para a geração dos parâmetros secundários, muito úteis na análise e previsão do comportamento geológico.

A seguir, são apresentados os diferentes tipos de parâmetros, primário e secundários, que podem ser gerados a partir das medições dos deslocamentos absolutos.

### 2.3.2.1 – HISTÓRICO DOS DESLOCAMENTOS

O gráfico das componentes dos deslocamentos - vertical, S; horizontal, H; e longitudinal, L, como na Fig.2.6 - em função do tempo é a forma mais comum de exibir os dados de medição dos deslocamentos absolutos. A interpretação da curva é fácil no caso de maciços homogêneos e com avanço contínuo da escavação (Schubert & Grossauer, 2004).

Quando se avalia a estabilidade por meio dos gráficos de deslocamento, a ideia central é a de que os deslocamentos decrescerão até que se estabilizem, ou seja, não ocorre mecanismo de ruptura (Fig. 2.7).

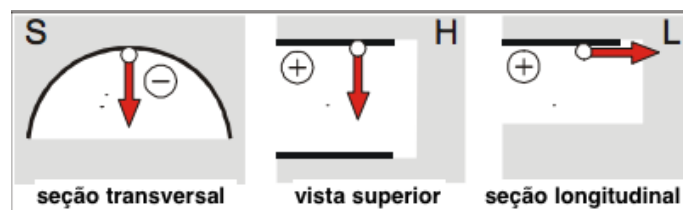


Figura 2.6 - Componentes do deslocamento em um ponto no teto do túnel (Grossauer *et. al.*, 2008).

Em condições de maciço homogêneo, com avanço contínuo e a uma taxa uniforme, a redistribuição das tensões ocasiona um decréscimo contínuo da taxa de deslocamento. Quando há interrupção

da sequência de escavação, aparecem degraus nos gráficos, caso não haja *creep* (Fig. 2.8). Já mudanças na curvatura do gráfico podem aparecer quando se tem diferentes fases de construção.

Qualquer aceleração da taxa de deslocamento pode ser sinal de instabilidade, a menos que essa possa ser correlacionada com atividades construtivas na vizinhança da seção monitorada. No entanto, os gráficos do histórico dos deslocamentos manifestam comportamento anômalo somente quando a escavação alcança a região com propriedades adversas, como pode ser observado na Fig. 2.9, não havendo muito tempo para a tomada de decisão e medidas remediadoras. Isso se deve ao fato de que, nesse caso, o parâmetro acompanhado é primário e reflete comportamento mais local.

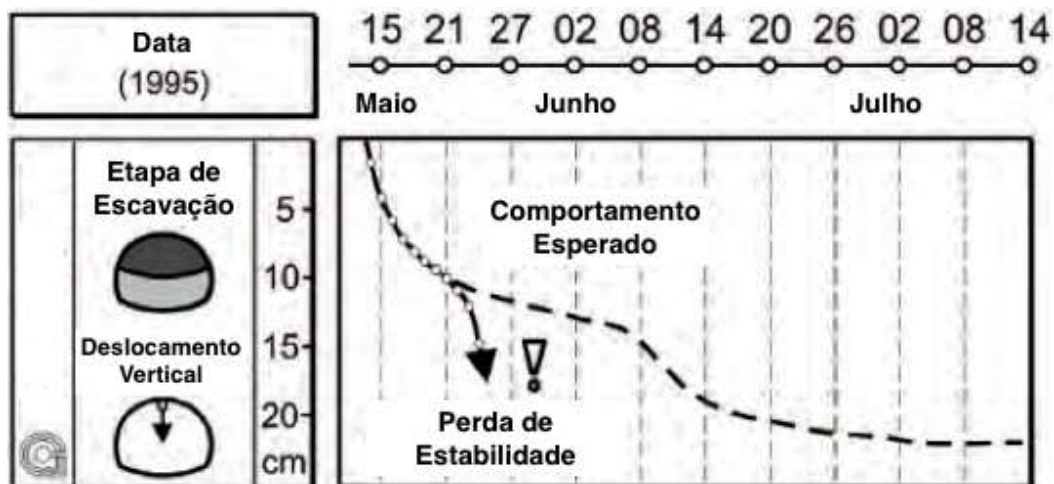


Figura 2.7 - Gráfico típico do histórico dos deslocamentos (ITA, 2011 citando OGG, 2005)

No entanto, a componente do deslocamento que aponta na direção da região com condições geológicas diferentes, apresentará comportamento anômalo mais expressivo. Ou seja, as maiores discrepâncias no comportamento ocorrerão no gráfico da componente cuja direção aponta para a zona de falha, por exemplo.



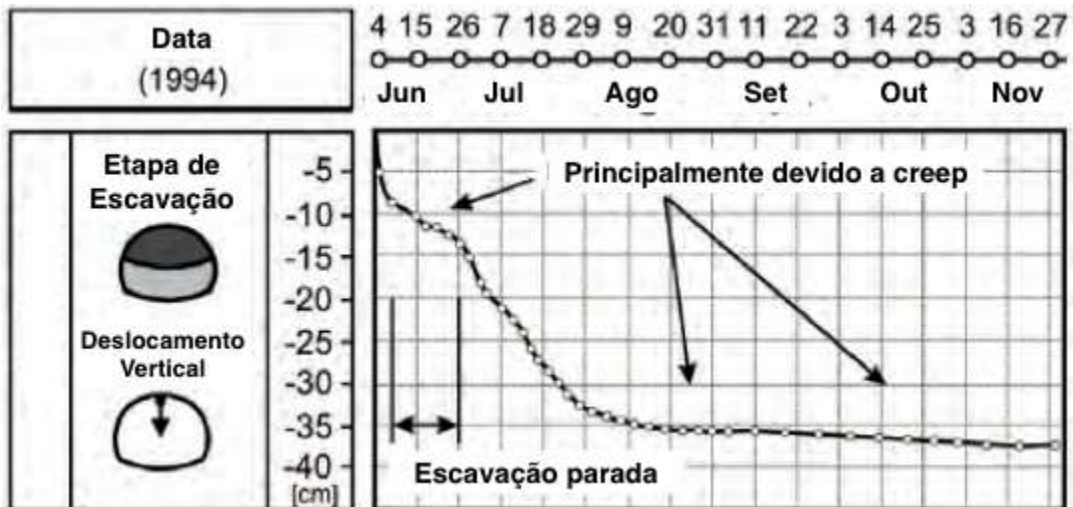


Figura 2.8 - Gráfico do histórico dos deslocamentos mostrando sinais de fluência no maciço (ITA, 2011 citando OGG, 2005)

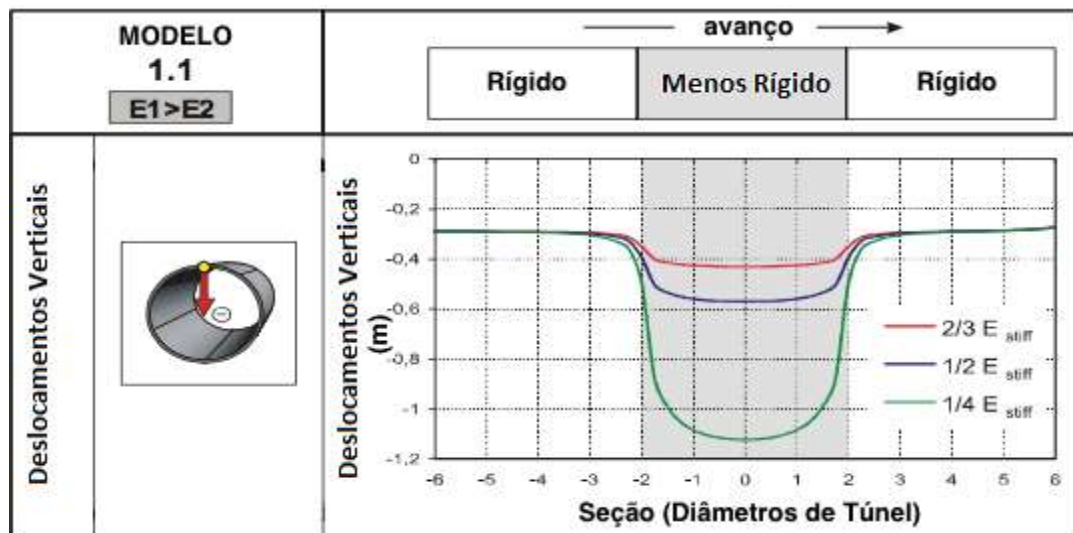


Figura 2.9 - Deslocamentos verticais durante a escavação em uma zona de falha (Schubert *et al.*, 2004).

Assim como no caso do acompanhamento da convergência, funções analíticas podem ser utilizadas para detecção antecipada de comportamento anormal nos deslocamentos, por meio da comparação entre os valores medidos e os valores previstos com base na retroanálise dessas funções. A Fig. 2.10 apresenta um exemplo de detecção antecipada de uma anormalidade em um túnel raso, em solo fofo, com *invert* temporário. A mudança no comportamento dos deslocamentos verticais do topo da seção transversal reflete a falha do *invert*. Sem a curva de previsão do comportamento

como referência, entretanto, seria mais difícil a detecção de comportamento anômalo a tempo de se tomar medidas remediadoras.

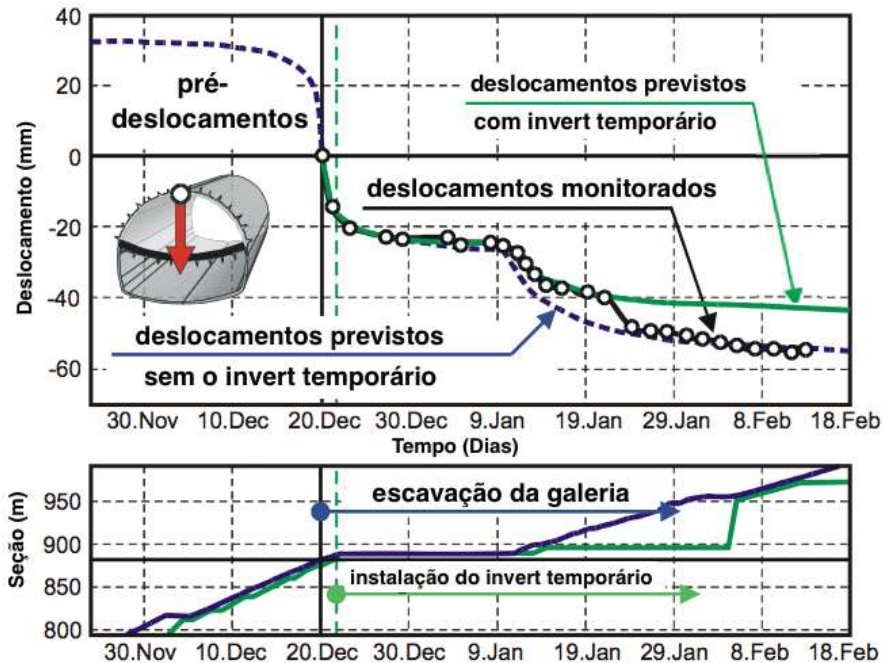


Figura 2.10 - Deslocamentos medidos desviando dos deslocamentos previstos devido à falha no *invert* temporário (Sellner *et al.*, 2002)

Além da detecção precoce de desvios de comportamento, essa análise comparativa, entre o valor medido e o valor esperado, ajuda na identificação de imprecisões de medição e permite a avaliação das tensões esperadas no sistema de suporte, com base no carregamento consequente dos deslocamentos.

A grande desvantagem dos gráficos de histórico dos deslocamentos é que a obtenção de uma visão geral dos mecanismos é mais difícil, uma vez que cada seção é inspecionada separadamente (Schubert & Grossauer, 2004).

### 2.3.2.2 – CURVA DE DEFLEXÃO

As curvas de deflexão, diferentemente dos gráficos do histórico do deslocamento, apresentam os valores da componente do deslocamento em diversos pontos ao longo do túnel, localizados em um

mesmo eixo. As curvas são formadas pela ligação dos deslocamentos nesses pontos e podem ser úteis para obter uma visão geral do desenvolvimento de um deslocamento ao longo do túnel.

Um conjunto de curvas de deflexão pode ser traçado para um intervalo de tempo específico (Fig. 2.11) ou para diferentes fases de construção (galeria, bancada, *invert* etc.).

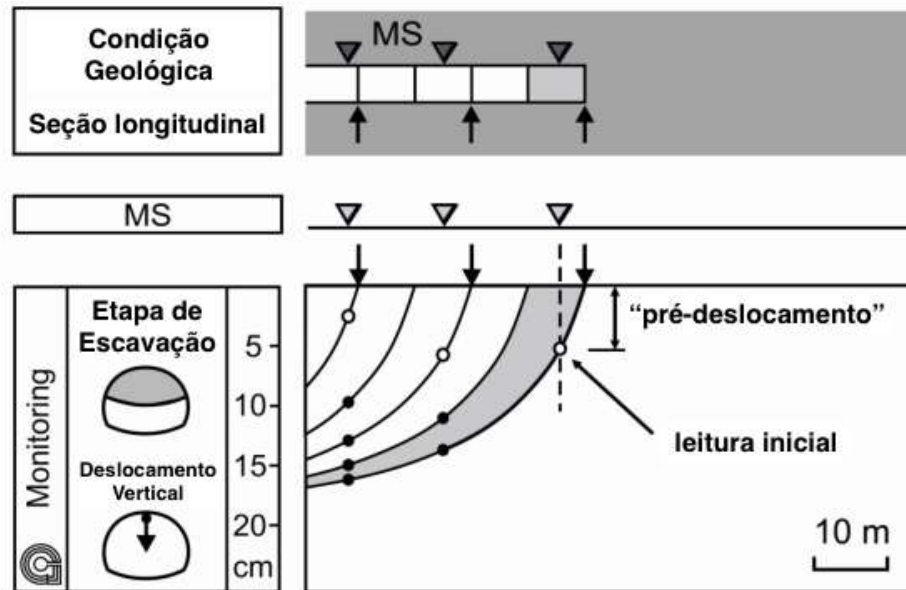


Figura 2.11 - Curva de deflexão típica para uma escavação em maciço homogêneo (OGG, 2014)

Segundo ITA (2011), as curvas de deflexão podem ser utilizadas para obter as seguintes informações: i) a extensão longitudinal do comportamento das deformações no túnel; ii) a alteração na rigidez do maciço rochoso; e iii) pré-deslocamento, anterior à medição inicial. Um aumento na área entre duas curvas de deflexão sucessivas indica a presença de uma zona mais fraca ou uma grande descontinuidade à frente da face do túnel.

A desvantagem desse método de análise é que, para que os valores de deslocamento nos diferentes pontos sejam comparáveis, os deslocamentos antes da leitura inicial devem ser determinados. No entanto, a leitura inicial nem sempre é feita a uma mesma distância da face e no mesmo tempo decorrido após a escavação. Além disso, antes mesmo da escavação, o maciço sofre deformações que não são registradas.

Esse problema pode ser contornado desprezando os deslocamentos anteriores à escavação e utilizando equações analíticas para determinar a porção de deslocamentos ocorridos no período entre a escavação e a leitura inicial.

### 2.3.2.3 – LINHA DE TENDÊNCIA

As linhas de tendência são construídas ligando os valores de deslocamento ocorridos a uma determinada distância fixa da face para cada avanço na escavação. A conexão desses pontos pode ser feita por meio das linhas de deflexão (Fig. 2.12) e permite uma visão geral do desenvolvimento dos deslocamentos ao longo do eixo do túnel. A presença de uma zona menos rígida, ou uma grande descontinuidade, à frente da escavação, tende a aumentar a distância entre valores sucessivos (ITA, 2011).

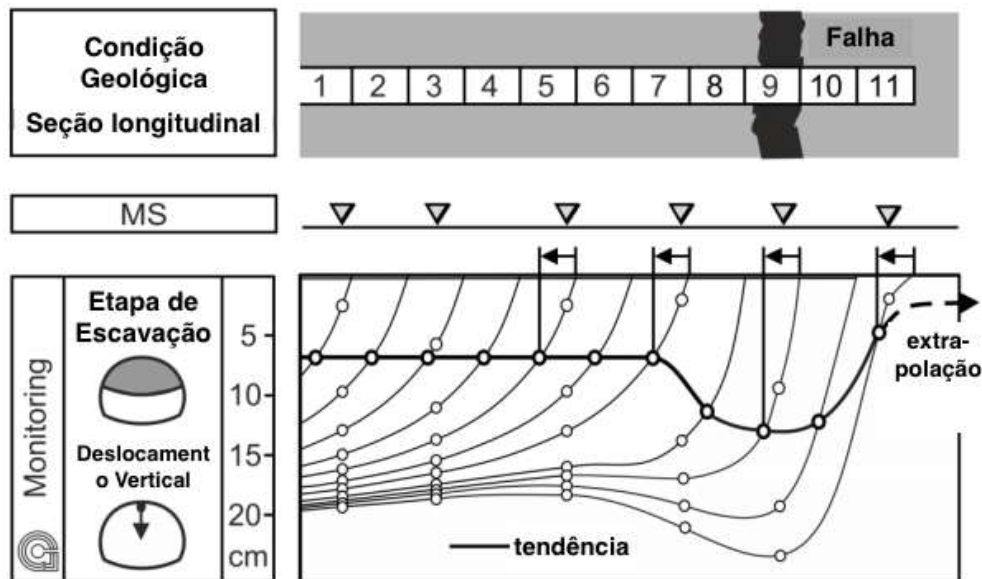


Figura 2.12 - Gráfico típico da linha de tendência no caso de uma escavação com uma zona de falha à frente (OGG, 2014)

### 2.3.2.4 – DIFERENÇA ENTRE DESLOCAMENTOS

Segundo ITA (2011), as diferenças entre os deslocamentos são medidos geralmente da seguinte forma:

- Deslocamento Vertical do Topo – Deslocamento Vertical da Lateral
- Deslocamento Vertical do Topo – Deslocamento Vertical da Superfície
- Deslocamento Vertical da Lateral Esquerda – Deslocamento Vertical da Lateral Direita
- Deslocamento Horizontal da Lateral Esquerda – Deslocamento Horizontal da Lateral Direita

Para túneis rasos, o parâmetro [Deslocamento Vertical do Topo – Deslocamento Vertical da Lateral], em conjunto com o [Deslocamento Horizontal da Lateral Esquerda – Deslocamento Horizontal da Lateral Direita], fornece informação sobre a distorção do revestimento do túnel. Já o parâmetro [Deslocamento Vertical do Topo – Deslocamento Vertical da Superfície] pode ser usado para identificar o afrouxamento do solo acima do túnel (ITA, 2011).

A diferença entre os deslocamentos de pontos diferentes da seção transversal, quando em condições homogêneas do maciço, permanece praticamente constante. No entanto, essa diferença aumenta quando a geologia em regiões vizinhas à escavação é alterada. Nesses casos, o ponto da seção transversal mais afetado, ou seja, mais próximo das fraturas ou falhas, apresentará deslocamentos cada vez maiores, quanto mais a escavação se aproximar das mesmas. O gráfico da diferença dos deslocamentos pode chegar a mudar de comportamento metros antes da escavação alcançar a região com propriedades distintas (Fig. 2.12).

Na Fig. 2.13, nota-se que as primeiras curvas já apontam a presença da falha. As últimas curvas voltam a se aproximar, indicando a volta ao meio homogêneo.

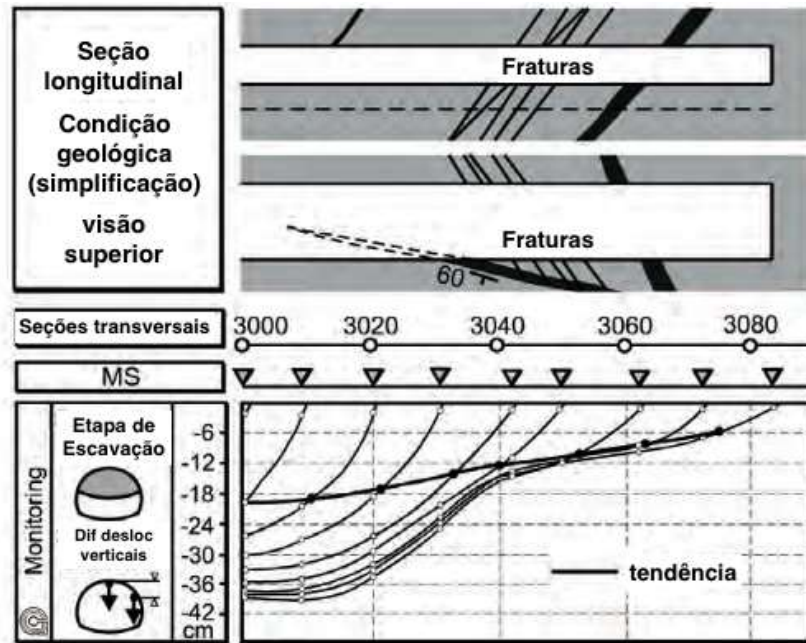


Figura 2.13 - Gráfico da diferença de deslocamentos verticais no teto e na lateral da seção transversal para uma escavação em maciço fraturado (ITA, 2011 citando OGG, 2005).

### 2.3.2.5 – RAZÃO ENTRE DESLOCAMENTOS

Além da diferença entre deslocamentos, a razão entre uma determinada componente do deslocamento - vertical, S; horizontal, H; e longitudinal - em diferentes pontos da seção transversal (Fig. 2.14), quando plotada como linha de tendência, ou seja, conectando os valores reportados a uma mesma distância da face, também é capaz de apontar antecipadamente uma mudança nas condições geológicas, como mostra a Fig. 2.15 (Schubert *et al.*, 2002).

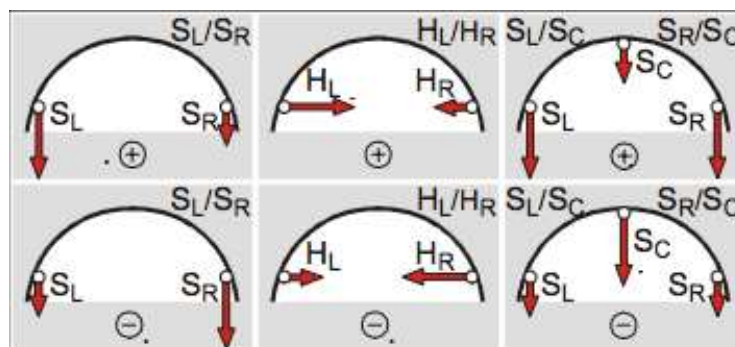


Figura 2.14 – Possíveis razões entre deslocamentos (Grossauer *et. al*, 2008).

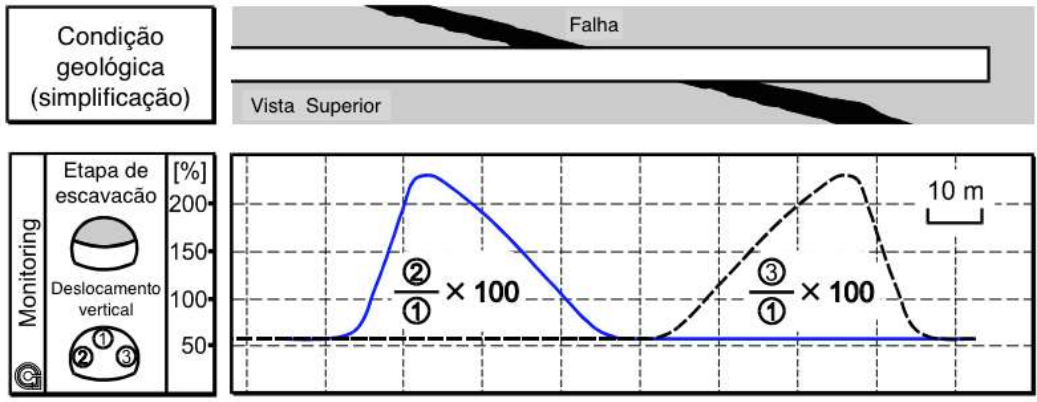


Figura 2.15 - Linha de tendência da razão entre os deslocamentos no teto e na lateral da seção transversal do túnel (OGG, 2014).

**2.3.2.6 – VETOR DESLOCAMENTO**

Quando combinadas, as componentes de deslocamento fornecem vetores de deslocamento que rotacionam nos três planos (das três dimensões). O vetor deslocamento é um vetor formado pela soma vetorial de dois vetores de deslocamento de um ponto, em diferentes direções (Fig. 2.16). Tais vetores mudam de direção quando, a uma certa distância à frente da escavação, há uma mudança de rigidez no material. Avaliando graficamente essa alteração angular do vetor com relação a determinado eixo, pode-se, então, identificar mudanças na geologia.

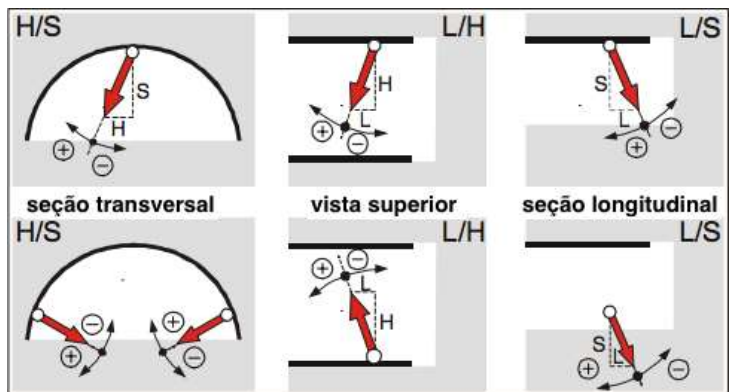


Figura 2.16 - Possíveis vetores deslocamento (Grossauer *et.al*, 2008).

Como exemplificado na Fig. 2.17, quando o vetor, formado pela soma dos vetores de deslocamento vertical e longitudinal, aponta mais para fora da face do que o esperado, rotacionando-se em torno do eixo vertical, é sinal de que o deslocamento horizontal foi maior do que o esperado. Nesse caso,

espera-se encontrar à frente uma zona com menor rigidez. Caso contrário, o vetor indica que à frente espera-se encontrar uma zona com maior rigidez.

Além disso, a magnitude da variação angular depende da diferença das rigidezes. Quanto maior essa diferença, maior o desvio angular do vetor. Já a extensão da zona com rigidez diferente, influencia a extensão da mudança de comportamento no gráfico (Figura 2.17).

Schubert & Grossauer (2004) desenvolveram extensivamente o estudo sobre o vetor deslocamento, trabalhando com estudos de caso na Áustria. Tal vetor tem se mostrado eficiente para a detecção de zonas de falha a metros de distância da escavação da zona com diferente rigidez.

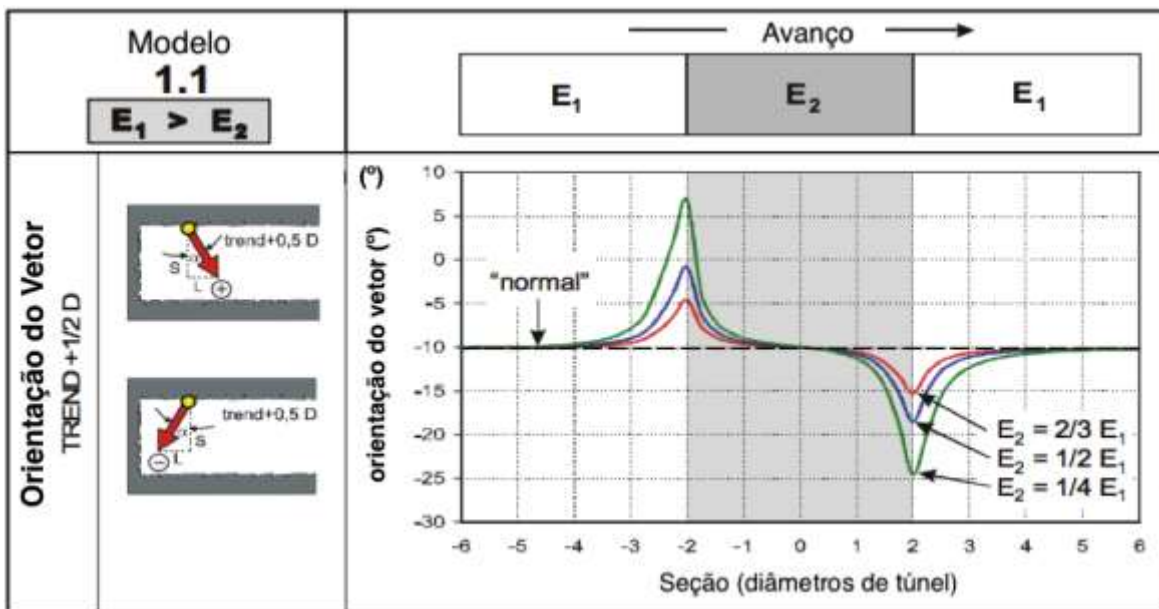


Figura 2.17 - influência da zona de falha no desvio da orientação do vetor deslocamento para diferentes contrastes de rigidez (Grossauer *et al.*, 2005).

A mesma análise pode ser feita para os deslocamentos dos vetores no plano transversal. A escavação em um meio homogêneo, por exemplo, resulta em uma trama simétrica dos vetores deslocamento em relação ao eixo central do túnel (ITA, 2011). Nas vizinhanças de uma zona de falha, no entanto, os deslocamentos nos pontos mais próximos à falha tendem a mudar, como mostra a Fig. 2.18, devido ao aumento de tensão no maciço entre a parede do túnel e a falha (ITA, 2011).



Segundo ITA (2011), essa análise de comportamento pode ser utilizada para obter uma compreensão dos fenômenos de deformação. Essa compreensão, por sua vez, permite que o engenheiro seja capaz de ajustar as características de suporte, em particular a disposição, o espaçamento e a orientação dos tirantes, quando utilizados.

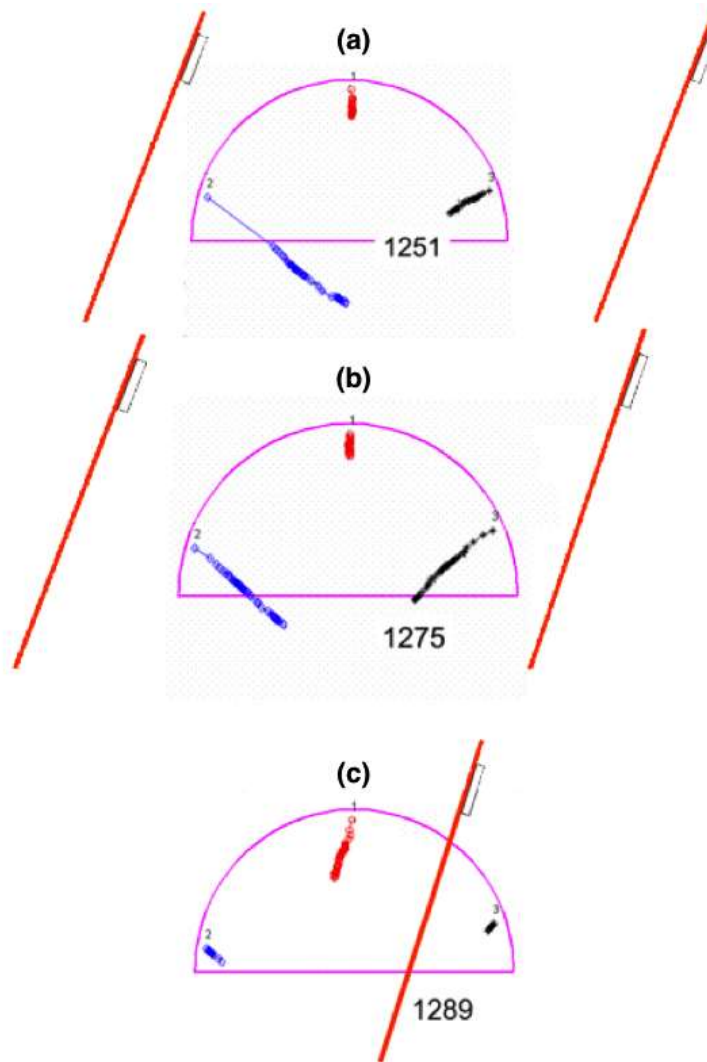


Figura 2.18 - Vetores deslocamento na seção transversal; influência da presença de falhas fora e dentro da seção escavada: (a) concentração de tensão entre a lateral esquerda da seção e a falha causa aumento dos deslocamentos na lateral esquerda. (b) Falha adicional perto da lateral direita ocasiona o aumento dos deslocamentos na lateral direita. (c) Zona de falha passando pela seção escavada causa aumento dos deslocamentos somente no teto (OGG, 2014).

### 2.3.3 – EXTRUSÃO DA FACE

Os extensômetros, além de monitorarem os deslocamentos de convergência na seção transversal (quando instalados radialmente), podem ser utilizados na face para o acompanhamento da extrusão da face, ou seja, seu deslocamento axial (quando instalados, a partir do interior do túnel) (Riaz, 2015). A extrusão da face é um parâmetro importante para a compreensão das condições geológicas à frente da escavação. Essas medições podem, ainda, avaliar o raio da zona de influência à frente do túnel.

Quando os valores medidos de extrusão são representados graficamente em função do tempo, sejam eles acumulativos ou diferenciais, pode-se avaliar a velocidade e a aceleração dos deslocamentos. Assim como na convergência, espera-se que a aceleração seja negativa e os deslocamentos decrescentes. Caso contrário, a face atingirá condição de instabilidade.

Medições de extrusão da face são, normalmente, representadas por gráficos da magnitude da deformação em função do tempo, ou em função do avanço da escavação (Fig. 2.19). A análise desses gráficos, geralmente, fornece todas as informações necessárias para uma correta avaliação da estabilidade da face do túnel. Deformação crescente é um sinal de alerta mais significativo do que quando ocorre a mesma tendência na análise da convergência, porque, normalmente, provê tempo suficiente para se intervir e remediar a situação (Lunardi, 2008).

Considerando um ponto no gráfico de extrusão incremental ao longo do tempo, a ordenada indica a magnitude da extrusão (abscissa); o ângulo da tangente à curva indica a velocidade de deformação; e a própria curva descreve a aceleração (Lunardi, 2008).

Segundo Lunardi (2008), a magnitude e a velocidade de extrusão são dependentes das características do maciço e não são particularmente indicadores de início de colapso. A aceleração, que é independente das propriedades de maciço, é, no entanto, um indicador de início de ruptura, caso ela permaneça positiva. É essencial, portanto, que se monitore as acelerações constantemente, a fim de se assegurar de que haja tempo para intervenção.

No caso da representação gráfica de seções diferentes de monitoramento, pode-se comparar o comportamento do maciço em pontos diferentes; seu comportamento no mesmo ponto, mas em momentos diferentes; ou, ainda, correlacionar as medições de extrusão com eventos específicos, como a atividade de escavação ou outras influências externas (Lunardi, 2008).

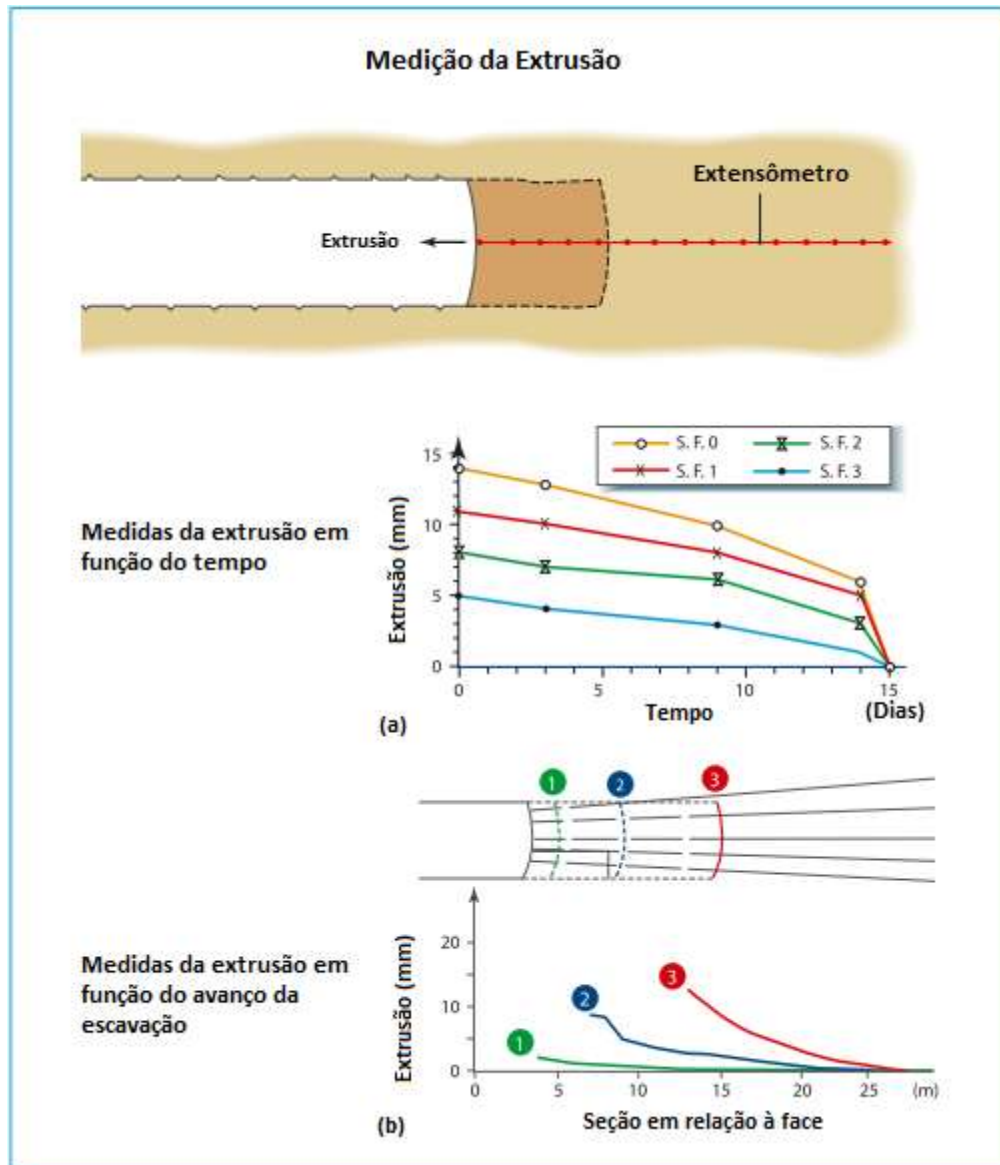


Figura 2.19 – Gráficos: (a) Extrusão da face versus tempo. (b) Extrusão da face versus avanço da escavação (Lunardi, 2008)

## 2.4 – ANÁLISE DO RISCO

Segundo a NBR ISO 31000 (ABNT, 2009), a análise de risco inclui a estimativa dos riscos e fornece base para a avaliação de riscos e para as decisões sobre o tratamento de riscos.

Neste trabalho, focar-se-á na análise dos riscos somente na fase de construção. Durante a escavação, ainda que na fase de projeto um bom programa de ensaios tenha sido realizado, sempre haverá um nível de incerteza, e, conseqüentemente, riscos, tanto nas propriedades do material, quanto na capacidade de suporte, entre outros. No entanto, o acompanhamento do comportamento da escavação por meio de um adequado programa de instrumentação diminui as incertezas e o risco de acidentes.

Após a identificação do risco pelo acompanhamento dos dados da instrumentação, analisa-se a probabilidade de ocorrência do mesmo. A análise dos riscos pode ser realizada qualitativamente ou quantitativamente. Brown (2012) lista algumas ferramentas já existentes para análise de risco:

- **Árvore de Falhas** - Identifica, quantifica e representa, em forma de diagrama, as falhas, e as combinações de falhas, que podem levar a um evento. Pode ser utilizada com ou sem a quantificação das probabilidades de ocorrência dos eventos.
- **Árvore de Eventos** - Fornece um mapeamento sistemático de cenários de eventos com o potencial de resultar em um incidente maior, e as relações, dependências e crescimento de potencial desses eventos com o tempo. Também fornece estimativas numéricas das probabilidades de ocorrência das componentes de eventos e do evento maior resultante.
- **Análise da consequência ou causa-consequência** – É uma combinação da árvore de falhas com a árvore de eventos. O resultado é um diagrama mostrando os as relações entre as causas e as consequências de um incidente. Esta técnica é usada mais comumente quando a lógica de falha é simples porque um diagrama combinando árvores de falhas e eventos pode se tornar bem complexo.
- **Diagrama de Bowtie** - Mostra como uma série de medidas de controle podem ou eliminar, ou minimizar, a probabilidade de ocorrência de eventos específicos que possam gerar risco, ou, ainda, reduzir as consequências de um evento uma vez que esse ocorreu.

- Análise de Decisão, incluindo a análise de árvores de decisão - é um formato estruturado usado para analisar ou avaliar os resultados de decisões ou escolhas feitas, com base na informação disponível.
- Análise probabilística de risco, incluindo Monte Carlo e outras simulações (Probabilistic Risk Analysis, PRA) – e, possivelmente, o método mais disseminado para análise quantitativa de riscos em geotecnia.
- Árvore Bayesiana – são ferramentas matemáticas e gráficas, baseadas em probabilidade, que mostram as relações de causa e efeito entre os componentes de um sistema. Eles permitem a dependência condicional entre variáveis, fornecem um meio de raciocínio sob incerteza, e permitem que tabelas de probabilidade possam ser atualizadas quando houver mais informações disponíveis. Na prática, elas são geralmente utilizadas em combinação com alguma forma de análise de decisão.
- Análise multirrisco - é um método computacional aproximado de cálculo para os casos envolvendo múltiplos riscos estatisticamente independentes, que são tratados como variáveis estocásticas.
- Processo de Hierarquia Analítica (Analytical Hierarchy Process, AHP) - é usado para lidar com problemas mal definidos e mal-estruturados na tomada de decisão e avaliação de riscos. É uma técnica matemática para tomada de decisão com base em multicritérios que permite alternativas de decisão serem classificadas, em ordem de preferência, por meio de pares de comparações.
- Lógica Fuzzy e outros métodos de inteligência artificial - também podem ser utilizadas em análise de risco e é, por vezes, em combinada com outras abordagens, como com a árvore Bayesiana.

A seguir, aborda-se, de maneira mais aprofundada, a Análise Probabilística de Risco e a árvore Bayesiana, com base nos trabalhos de Beacher & Christian (2003) e Brown (2012).

A análise probabilística de risco envolve o entendimento de que tanto a resistência,  $R$ , do maciço, como do carregamento (descarregamento e redistribuição de tensões no caso de túneis),  $Q$ , não são valores absolutos, e sim distribuições de probabilidade, como mostra a Fig. 2.20.

A margem de segurança,  $M$ , é a diferença entre a resistência e o carregamento:

$$M = R - Q \quad (2.6)$$

Da definição fundamental de média e variância, tem-se que, independentemente da distribuição de probabilidade de R e Q, que a média,  $\mu$ , de M é dada por:

$$\mu_M = \mu_R - \mu_Q \quad (2.7)$$

Sua variância,  $\sigma^2$ , é dada por:

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_Q^2 - 2\rho_{RQ}\sigma_R\sigma_Q \quad (2.8)$$

em que  $\rho_{RQ}$  é o coeficiente de correlação entre R e Q.

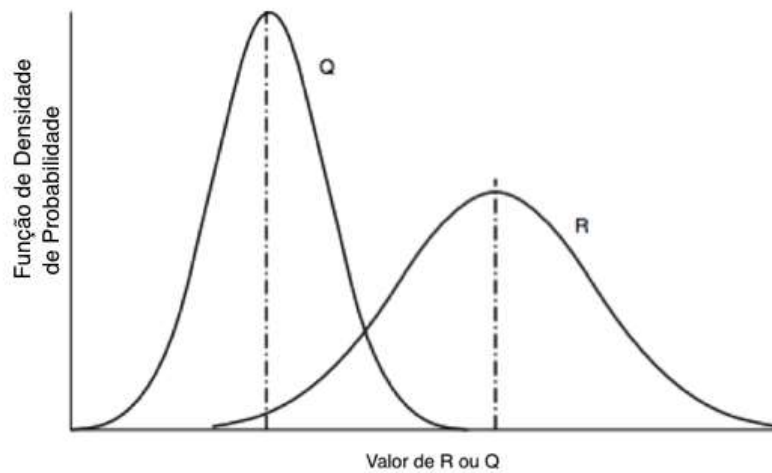


Figura 2.20 - Densidades de probabilidade para resistência (R) e carregamento (Q) típicos (Baecher & Christian, 2003).

O Índice de Confiabilidade,  $\beta$ , que normaliza M com respeito ao seu desvio padrão,  $\sigma$ , é definido como:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (2.9)$$

A probabilidade de falha é igual à probabilidade de M ser menor ou igual a zero, o que equivale à área cinza no gráfico de distribuição de probabilidade de M apresentado na Fig. 2.21.

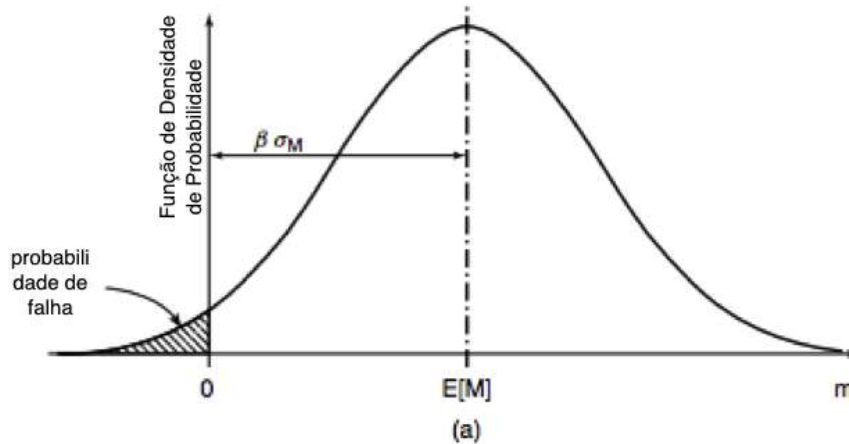


Figura 2.21 – Função de Densidade de Probabilidade de M (Baecher & Christian, 2003).

No caso específico em que assume-se que R e Q seguem uma distribuição Normal padrão (valor esperado igual a zero e variância igual a um), M também seguirá essa distribuição. Nesse caso, o índice de confiabilidade equivale à variável Normal Z, amplamente tabulada na literatura. A probabilidade de falha, p, pode ser obtida pela integral,  $\Phi$ , de  $-\infty$  até a média, zero. Devido à simetria da distribuição Normal, p é simplesmente igual a  $1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta)$ .

O índice de Confiabilidade em termos de fator de segurança, F, é dado por:

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (2.10)$$

No entanto, assumir que R e Q são normalmente distribuídas pode não ser uma hipótese correta para parâmetros geotécnicos. Assim, R e Q são, geralmente, estimadas com base no cálculo repetitivo de R e Q a partir da seleção aleatória de uma gama de parâmetros do material, como no método de Monte Carlo (Brown, 2012).

No entanto, a análise probabilística descrita acima, por si só, não permite a consideração da variabilidade espacial e temporal dos parâmetros, das incertezas, dos efeitos das medidas de

controle, pré e pós ocorrência do evento, e nem da relação de dependência entre parâmetros e variáveis de projeto (Brown, 2012).

No caso de projetos geotécnicos, que apresentam as complexidades descritas acima, pode-se utilizar a árvore Bayesiana. Esse método de análise de risco é baseado no seguinte teorema desenvolvido por Thomas Bayes (Bayes, 1763):

$$P(A|B) = [P(B|A) \times P(A)] / P(B) \quad (2.11)$$

em que  $P(A)$  é a probabilidade de A,  $P(B)$  é a probabilidade de B,  $P(A|B)$  é a probabilidade de A dado a ocorrência de B e  $P(B|A)$  é a probabilidade de B dado a ocorrência de A.

Essa relação pode ser expressa em termos de uma hipótese, H, experiências passadas, p, e evidência, tal como:

$$P(H|e,p) = [P(H|p) \times P(e|H,p)] / P(e|p) \quad (2.12)$$

em que  $P(H|e,p)$  é probabilidade posterior de ocorrência da hipótese H após considerar os efeitos das evidências e das experiências passadas; o termo  $P(H|p)$  é a probabilidade inicial da hipótese após consideração das experiências passadas; e o termo  $P(e|H,p)$  é a probabilidade da evidência assumindo que a hipótese e as experiências passadas sejam verdadeiras.

A árvore Bayesiana é uma representação gráfica da relação de dependência entre as variáveis de um sistema. Nela, essa relação é expressa por meio de setas, que saem da variável que afeta e apontam para as variáveis afetadas. A mensuração dessa dependência é feita por meio de uma tabela de probabilidades condicionais. No caso da construção de túneis essa tabela de probabilidades é constantemente atualizada conforme novas informações sobre os parâmetros geológicos são obtidas. A Fig. 2.22 apresenta a aplicação desse método para a previsão do comportamento do maciço ao longo da escavação.



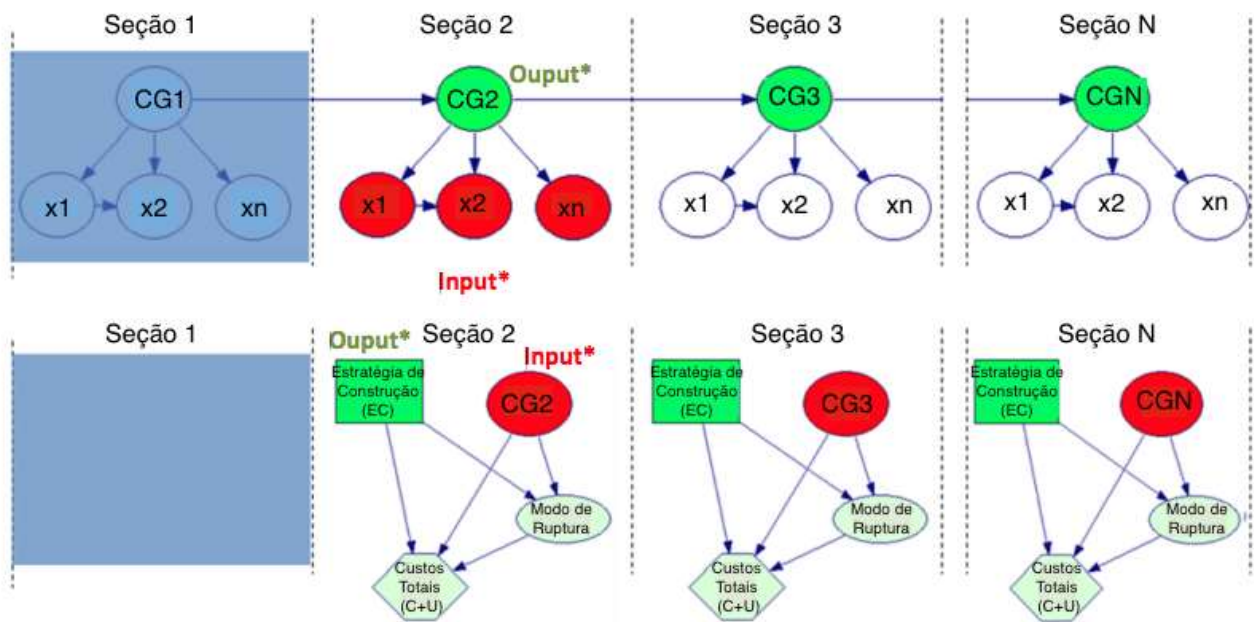


Figura 2.22 - Previsão da geologia e tomada de decisão durante a escavação, baseadas na árvore Bayesiana (Sousa & Einstein, 2012).

Em obras subterrâneas, a probabilidade inicial da hipótese pode ser utilizada na fase de projeto para verificação da probabilidade de colapso,  $H$ , devido a determinada escolha de projeto, que é, por sua vez, baseada em um conjunto de parâmetros estimados a partir de experiências passadas,  $p$ . Já a probabilidade posterior de ocorrência de colapso,  $H$ , pode ser utilizada na fase de escavação, onde a probabilidade de colapso é atualizada conforme dados de instrumentação são obtidos (Brown, 2012 citando Sousa & Einstein, 2012).

Assim, dadas as condições geológicas encontradas na seção escavada e instrumentada (S1), pode-se atualizar as probabilidades e prever as prováveis condições geológicas nas seções seguintes (S2 a SN), ainda não escavadas, e assim por diante, como mostra a Fig. 2.22, sendo o processo constantemente repetido até o fim da escavação. As variáveis  $x$  representam os parâmetros monitorados, como os apresentados na Seção 2.3.

A árvore Bayesiana pode ainda ser utilizada no âmbito global da análise de decisão em projetos geotécnicos (Fig. 2.23). No exemplo, a estratégia de construção é considerada um nó de decisão; as condições geológicas, obtidas da análise Bayesiana descrita anteriormente, e o modo de ruptura

são nós de probabilidade, pois representam as incertezas; e os custos totais fazem parte do nó que representa o resultado final da análise traduzido no valor do projeto.

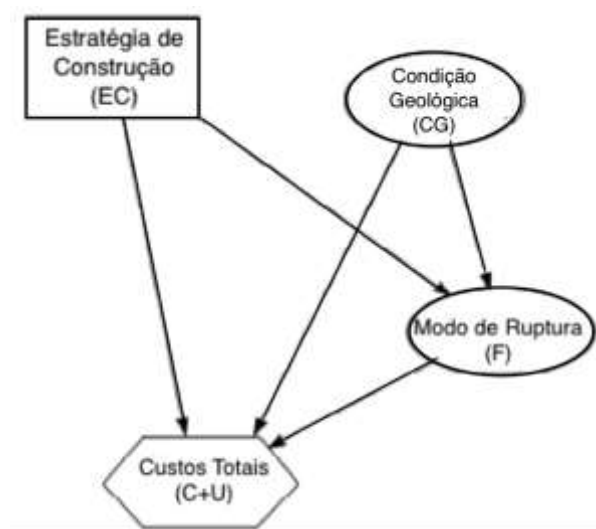


Figura 2.23 – Estrutura simples de modelo de decisão baseado na árvore Bayesiana (Sousa & Einstein, 2012).

Os custos totais são obtidos pela soma do custo do projeto (condicionado à estratégia de construção) e dos custos dos prejuízos sociais e econômicos gerados caso a falha ocorra (consequências do risco).

Uma abordagem sugerida por Einstein para lidar com ameaças geotécnicas naturais pode ser adaptada para a determinação quantitativa final do risco em projetos de túneis (Brown, 2012 citando Einstein, 1997; Einstein & Sousa, 2007; Einstein *et al.*, 2010). Nessa abordagem, Einstein trabalha a equação de risco (Eq. 2.1), de maneira a considerar o fato de que as consequências são incertas, além de dependerem do tipo de evento a ser considerado. As consequências no caso do colapso da escavação são diferentes das causadas por recalques excessivos, por exemplo. Assim, a equação de risco pode ser reescrita como:

$$\text{Risco} = P[V] \cdot P[C_R|V] \cdot U(C_R) \quad (2.13)$$

sendo  $P[V]$  a probabilidade de ocorrência do evento  $V$ ,  $P[C_R|V]$  a probabilidade de ocorrência das consequências e  $U(C_R)$  os custos das consequências.

## 2.5 - AVALIAÇÃO DO RISCO

Segundo a NBR ISO 31000 (ABNT, 2009), a avaliação do risco é o processo de comparar os resultados da análise de riscos com os critérios de risco, afim de determinar se o risco e/ou sua magnitude é aceitável ou tolerável.

Uma vez que a análise quantitativa do risco é realizada, geralmente parte-se para a definição qualitativa do mesmo, com base na classificação dos valores em intervalos qualitativos, definidos de acordo com as condições de cada projeto. Um exemplo simples dessa classificação é mostrado na Fig. 2.24. Nesse caso, os riscos são qualificados em intervalos denominados por: Risco Extremo, Risco Alto, Risco Médio e Risco Baixo.

Probabilidade	Consequências				
	Insignificantes	Pequenas	Moderadas	Grandes	Catastróficas
A	H	H	E	E	E
B	M	H	H	E	E
C	L	M	H	E	E
D	L	L	M	H	E
E	L	L	M	H	H

Figura 2.24 - Matriz de determinação qualitativa do risco. E: risco extremo, ação imediata requerida, risco inaceitável; H: risco alto, atenção do engenheiro requerida, risco inaceitável se ações não forem tomadas; M: risco moderado, decisão sob critério responsabilidade do engenheiro, risco aceitável se com medidas de controle; L: risco baixo, procedimentos de rotina, risco aceitável (Brown e Booth, 2009).

Cada nível de risco é atingido quando se ultrapassa um valor crítico definido para cada segmento. Normalmente, os níveis são segmentados de acordo com a aceitabilidade do risco e ações necessárias, como no exemplo da Fig. 2.24. Vale ressaltar que a aceitabilidade do risco está condicionada ao agente (empresas, agências reguladoras ou público em geral).

Além da matriz de riscos, a avaliação dos riscos pode ser baseada em Curvas de Farmer (Fig. 2.25), nas quais o eixo das abscissas corresponde às consequências e o das ordenadas à probabilidade do

risco. Nesse caso, a segmentação dos níveis de risco é dada pelas zonas de risco, representadas em cores diferentes na Fig. 2.25.

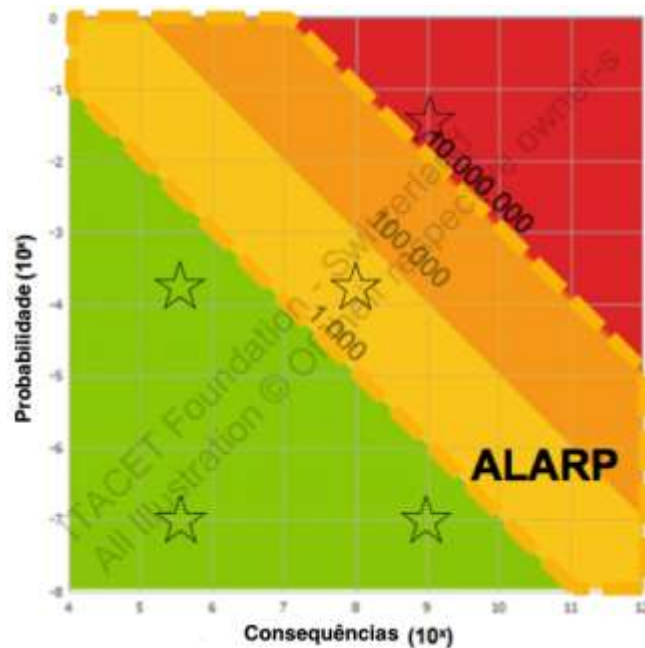


Figura 2.25 - Curva de Farmer para avaliação do risco (Assis, 2016).

As zonas verde e vermelha correspondem, respectivamente, às zonas de risco tolerável e intolerável. Já a região amarela, denominada ALARP (As Low As Rational Possible), corresponde à zona de risco tolerável condicional. Essa última, é a região em que ainda pode-se evitar o evento de risco, se tomadas medidas de reparação. No entanto, caso o risco atinja a zona vermelha, deve-se adotar os devidos Planos de Ação Emergencial (PAE), ou seja, os planos de acionamento, contenção de danos, evacuação e rotas de fuga.

Esse tipo de representação foi introduzido por F. Farmer, em 1967, para avaliação do risco de vazamento radioativo em reatores nucleares. A Curva de Farmer se baseia no fato de que acidentes com maiores consequências ocorrem com menor frequência do que os com consequências menores. A curva pode ser representada de dois modos: a) com a representação no eixo das ordenadas da probabilidade discreta ( $f$ ) relativa à consequência  $C_R$ ; b) com a representação no eixo das ordenadas da probabilidade acumulada,  $F_n = f_1 + f_2 + \dots + f_n$ , relativa à consequência maior  $N$ , que, por sua vez, é formada pelo conjunto das consequências de  $f$  (Belodedenko & Bilichenko,

2015). Nesse último caso, a vantagem é que pode-se levar em consideração a interdependência entre as consequências.

Para a curva perfeita de Farmer (denominada curva de risco neutro e representada pelas retas de delimitação dos níveis de risco), um aumento de  $x$  vezes no dano causado pelo evento de risco representa uma redução de  $x$  vezes na sua probabilidade de ocorrência (Belodedenko & Bilichenko, 2015).

A curva de Farmer pode ser considerada mais completa do que a matriz de risco, pois fornece o espectro de todos os valores possíveis do risco. No entanto, quando o objetivo da classificação qualitativa é fornecer de forma clara e direta a avaliação do risco (de maneira a informar rapidamente os perigos, quais ações devem ser tomadas, bem como quem são os responsáveis e o tempo permitido para a tomada de decisão), as matrizes de risco são vistas como uma maneira mais conveniente e compreensível, ainda que apresentem limitações.

## **2.6 – MITIGAÇÃO DO RISCO**

Segundo a A NBR ISO 31000 (ABNT, 2009), a mitigação do risco é o processo de tratamento dos riscos relativos às consequências negativas. O tratamento de risco pode envolver:

- a ação de evitar o risco pela decisão de não iniciar ou descontinuar a atividade que dá origem ao risco;
- assumir ou aumentar o risco, a fim de buscar uma oportunidade;
- a remoção da fonte de risco;
- a alteração da probabilidade;
- a alteração das consequências;
- o compartilhamento do risco com outra parte ou partes (incluindo contratos e financiamento do risco); e
- a retenção do risco por uma escolha consciente.

Observando novamente na árvore Bayesiana da Fig. 2.23, nota-se que essa é alimentada pelo nó de decisão, que é o ponto em que a experiência do engenheiro do projeto é requisitada. Os engenheiros

especialistas se baseiam em suas experiências de projetos passados para reduzir a gama de possibilidades de estratégia de projetos e potenciais riscos para o contexto da obra. Assim, são os agentes principais no começo (etapa Entendendo o Contexto) e fim (etapa Mitigação do Risco) do processo de gerenciamento do risco (Fig. 2.1). No entanto, o número de engenheiros especialistas capazes de realizar essas tarefas magistralmente é reduzido. É justamente por isso que os chamados Sistemas Especialistas podem contribuir de maneira única.

A seguir, descreve-se o funcionamento desses sistemas, bem como sua aplicação para o caso de projetos de túneis.

### **2.6.1 – SISTEMAS ESPECIALISTAS**

Para melhor entendimento dos Sistemas Especialistas, define-se, inicialmente, o conceito de Inteligência Artificial. Em seguida, descreve-se os Sistema Especialistas e sua diferença com relação ao sistema convencional.

O conceito de Inteligência Artificial pode ser dado como: Inteligência Artificial é a parte da ciência da computação que compreende o projeto de sistemas computacionais que exibam características associadas, quando presentes no comportamento humano, à inteligência (Barr & Feigenbaum, 1981). O sistema especialista é uma das formas mais difundidas de aplicação de Inteligência Artificial no cotidiano.

Sistema Especialista é, segundo Barreto & Prezoto (2010), um agrupamento de objetos/módulos, cada qual com sua especialidade, com o objetivo de fornecer a resposta mais próxima da resposta real.

Esse sistema é baseado em uma busca heurística e trabalha com problemas para os quais não existe uma solução convencional, organizada de forma algorítmica, disponível, ou quando essa solução é muito demorada. Ao contrário do sistema convencional, que se baseia em algoritmos desenvolvidos para processarem os dados de maneira padrão e repetitiva, produzindo uma resposta lógica ao problema, o Sistema Especialista produz resultados baseados na comparação do problema

com uma base de conhecimentos de problemas anteriores, gerando uma resposta heurística (aproximada de acordo com experiências de eventos passados) ao problema. Essa base de conhecimento equivale ao acúmulo de experiências passadas de um especialista, um engenheiro de projetos geotécnicos, por exemplo. Quanto mais projetos esse engenheiro realizar, mais experiência ele terá e mais assertiva será sua avaliação do comportamento do maciço.

Como a resposta depende da base de conhecimentos, ela deve ser constantemente expandida com a entrada de novos casos. Assim, a resposta produzida para um problema, atualmente, poderá não ser a mesma para o mesmo problema no futuro, após novos casos aprendidos pela base de conhecimento. Além disso, quanto mais um sistema especialista é utilizado, mais conhecimento ele adquire, e mais especialista ele se torna.

A formação de um sistema especialista pode ser dividida em quatro componentes principais:

- Base de Conhecimento, responsável por armazenar os dados de experiências passadas.
- Conjunto de Operadores, que são mecanismos que fazem as buscas na Base de Conhecimento a fim de encontrar respostas para o problema informado pelo usuário na Interface. Podem ser baseados em relações condicionais do tipo if-then-else, por exemplo.
- Estratégia de Controle, responsável por facilitar a busca realizada pelo Conjunto de Operadores, segmentando a Base de Conhecimento em conjuntos menores, a fim de diminuir, a cada dado fornecido, o universo de possíveis respostas aos problemas especificados.
- Interface, ferramenta responsável por permitir a interação do usuário com a o sistema. Nela, o usuário entra com os dados do problema e recebe a resposta dada pelo sistema.

### **2.6.2 – APLICAÇÃO EM TÚNEIS**

No caso de obras de túneis, a Base de Conhecimento pode ser formada pelo armazenamento de casos, tanto de sucesso, como de falha, de escavações. Pode-se acumular informação quanto ao tipo de geologia, solução de engenharia adotada, especificidades do projeto, bem como quais problemas foram enfrentados e que tipo de solução foi adotada. Quanto maior o número de informações, mais especialista se torna o sistema.

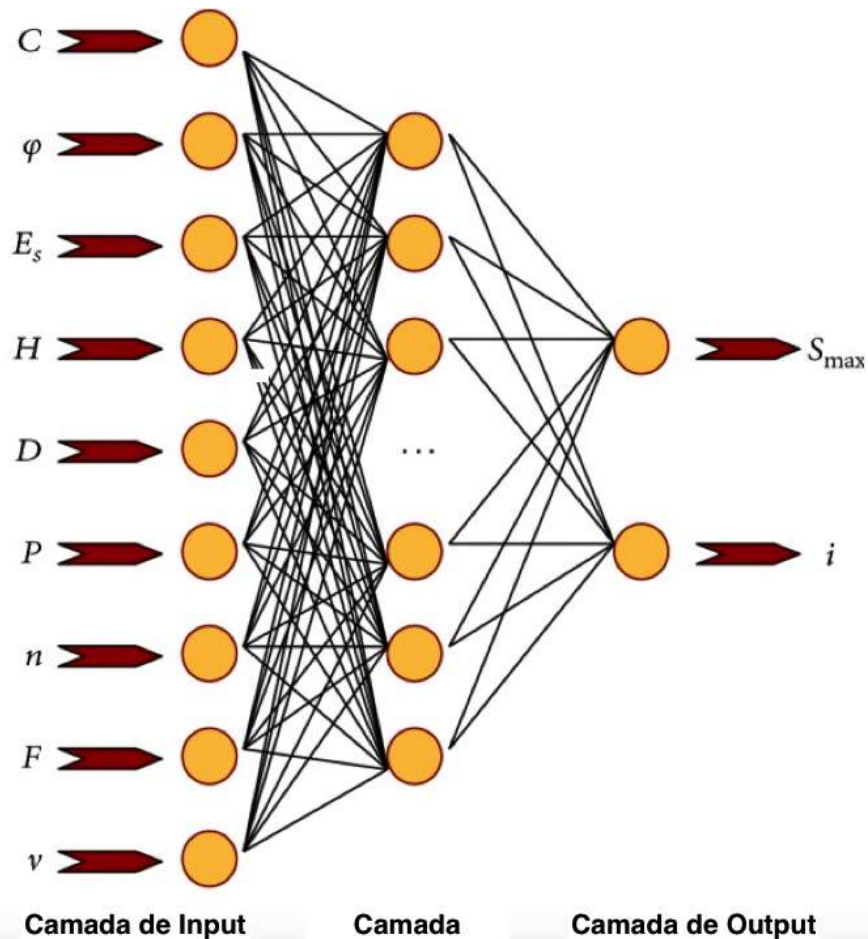
O sistema é alimentado pela entrada dos dados da escavação na Interface, ao longo da construção do túnel. Se os parâmetros encontrados na seção S1 (Fig. 2.22) informam alteração no valor esperado dos parâmetros, o sistema busca na Base de Conhecimentos casos análogos e interdependência entre variáveis para produzir uma resposta, que pode ser a possível geologia a ser encontrada nas seções à frente (S2 a SN), por exemplo.

Até o momento, para o processo de aprendizagem do sistema para o caso de projeto de túneis, tem sido proposta a adoção de uma rede neural baseada em *back-propagation*, devido a sua capacidade de abordagem de mapeamento não linear, robustez e fácil realização (Lian *et al.*, 2016). Nesse caso, por meio da Base de Conhecimento, o sistema cria relações não lineares entre as diferentes variáveis que caracterizam o comportamento do maciço (Fig. 2.26). A força das conexões entre as variáveis é representada por uma estrutura de distribuição de pesos numéricos, como a matriz de interação da Tab. 2.8, por exemplo. Nessa matriz, os parâmetros-chave são representados na diagonal principal e nos demais elementos da matriz, descreve-se os mecanismos de interação entre esses parâmetros. Cada mecanismo de interação é, então, ponderado de acordo com a força da relação entre os parâmetros, gerando coordenações de causa e efeito.

O processo pode ser exemplificado, de maneira mais simples, como na Fig. 2.27. Ao escavar um túnel em uma região com condições climáticas e geológicas análogas às de Brasília (localização e profundidade da escavação) e, em determinado momento da escavação, a instrumentação apontar mudança nos parâmetros do solo, o sistema pode se basear em casos como o do metrô de Brasília (Fig. 2.28) para definir o possível material encontrado à frente, utilizando a interação entre os parâmetros de *input* (mudança do vetor deslocamento ou aumento das tensões) e os tipos de solo.

A Base de Conhecimento, sendo a componente mais importante para a confiabilidade do sistema, deve conter o maior número de casos passados de projetos de túneis possível. Para que isso seja viável, uma sugestão seria a criação de uma plataforma de código aberto para armazenamento desses dados, de maneira a permitir que os interessados possam acrescentar informações, seguindo regras e especificações, para melhoramento do sistema. O código aberto permite que os usuários criem API (Application Programming Interface) para a utilização da Base de Conhecimento, ou seja, a criação do Conjunto de Operadores e da Estratégia de Controle.





2.26 - Modelo de rede neural baseada com múltiplos parâmetros do solo como *input* (Lai *et al.*, 2016).

Tabela 2.8 - Matriz 4x4 de interação entre estrutura da rocha, tensão na rocha, presença de água e construção (Cai *et al.*, 2000 citando Hudson, 1992).

<b>Estrutura da Rocha</b>	Fraturas afetam o valor e orientação das tensões	A rede de fraturas governa a permeabilidade secundária	Fraturas podem influenciar o tamanho e orientação da escavação
Tensão pode abrir ou fechar as fraturas, assim como criá-las	<b>Tensão na Rocha</b>	Geralmente, quanto mais alta a tensão normal, mais baixa é a permeabilidade	Altas tensões na rocha podem causar falhas na construção
Fluxo de água em fraturas afeta as propriedades das mesmas	Tensões normais são reduzidas pela pressão da água	<b>Presença de Água</b>	Drenagem e injeção de calda de cimento podem ser requeridas durante a construção
Escavação a fogo pode causar danos à fratura existente ou criar novas	Nas vizinhanças da escavação, as tensões principais são alteradas	Uma escavação vai sempre ser um meio de vazamento para o fluxo de água	<b>Construção</b>

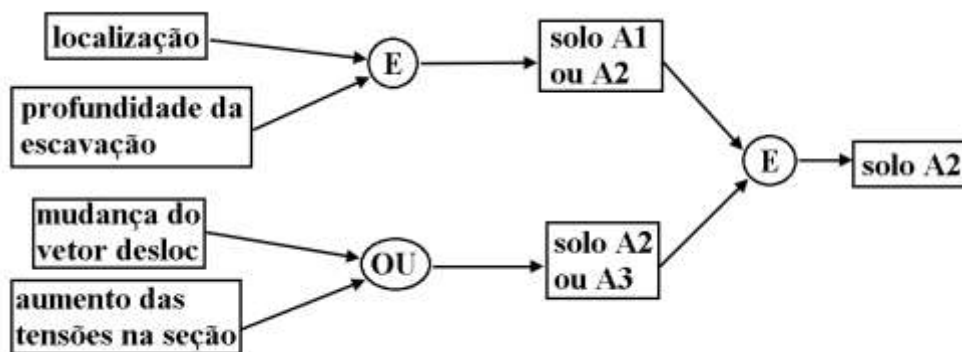


Figura 2.27 - Exemplo de cadeia de comparações para produção de um resultado em um sistema especialista.

	Sequência Depositional	FÁCIES SEDIMENTARES	ESPESSURA
Grupo Paranoá	E	ARGILO-CARBONATADA: metargilitos, ardósias, metassiltitos, lentes de calcário, calcários argilosos e raros dolomitos, ocasionais bancos de quartzito médio e microconglomerático.	150 m
	D	METARRITMITO ARGILOSO: metassilito, metargilitos, quartzitos finos centimétricos tabulares com acamamento ondulado, raras estruturas de contração.	100 m
	C	QUARTZITO: quartzitos médios, bem selecionados, marcas de onda, estrutura cruzada, acamada e espinha de peixe, lentes de metarritmito na base.	50 m
	B	METARRITMITO ARENOSO: metassiltitos, metargilitos, acamamento ondulado-lenticular. estruturas de contração e "Hummocky". Bancos de quartzitos de até 8 metros de espessura.	150 m
	A	ARDÓSIA: ardósias com leitos centimétricos de quartzitos finos e metassiltitos no topo.	50 m
	Unidades		

Figura 2.28 – Estratigrafia do Grupo Paranoá no DF (modificado de Faria, 1988).

A ICOLD (International Commission on Large Dams), representada no Brasil pelo CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens), por exemplo, mantém, desde 1958, o Registro Mundial de Barragens (World Register of Dams, WRD), provendo estatísticas dos projetos, bem como acesso ao banco de dados do registro.

É importante ressaltar que o sistema, assim como a decisão de um engenheiro apenas em experiências anteriores, deve ser levado em consideração como base, e não como verdade absoluta. Os projetos geotécnicos continuarão dependentes da validação do engenheiro responsável e do acompanhamento por meio da instrumentação.

Além disso, sabe-se que esse é um tópico que ainda precisa ser bastante desenvolvido, já que a própria tecnologia de Inteligência Artificial deve ser melhor dominada. O objetivo dessa seção, portanto, é apenas introduzir novos pensamentos e enriquecer a discussão sobre a inclusão dos avanços tecnológicos na análise de risco de projetos de túneis.

## **2.7 – COMUNICAÇÃO E CONSULTA**

Uma vez que a análise é feita e o risco quantificado e qualificado, esse resultado deve ser comunicado às partes interessadas. A comunicação deve ser rápida e de simples entendimento. Se o nível de Risco Extremo é atingido, por exemplo, deve-se, idealmente, soar um alarme de risco, bem como informar um plano de ação a todos os envolvidos dentro do raio de atuação dos possíveis danos. Para os engenheiros e técnicos da obra, além do alarme, deve-se fornecer informação mais detalhada dos dados de instrumentação. Já para a população em geral e trabalhadores não especializados, o aviso de perigo deve oferecer, se possível, planos de evacuação e rotas de fuga.

A seguir, são abordados meios de comunicação e alerta para os diferentes agentes a serem considerados em projetos de túneis.

### **2.7.1 – COMUNICAÇÃO TÉCNICA**

Uma das formas de tornar a comunicação mais eficiente para os responsáveis pelo projeto tem sido a adoção da tecnologia BIM (Building Information Modelling) em projetos de túneis. Ainda que BIM seja uma tecnologia reconhecida, inicialmente, como uma representação 3D das características físicas e funcionais de uma estrutura, os verdadeiros benefícios ocorrem quando são

incluídas sequências de construção, e até mesmo um cronograma detalhado, 4D, e análises de custos, 5D (Žibert *et al.*, 2016).

Dentre as atividades relacionadas à construção e operação de túneis, a tecnologia BIM, até recentemente, não suportava a complexidade das atividades de escavação. Nesse tipo de obra, o modelo tridimensional complexo, com diversas variáveis geológicas, variação do tipo de suporte e método de escavação, além de variáveis externas não previstas, dificulta o acompanhamento dos custos e do cronograma da obra. Em contrapartida, é justamente pelo fato de a construção do túnel apresentar tamanha complexidade, que o uso de uma tecnologia integrada pouparia muitos esforços e gastos, diminuindo os riscos.

No começo de 2015, utilizou-se com sucesso a tecnologia BIM 5D adaptada para túneis pela primeira vez, apresentando uma ferramenta capaz de mudar radicalmente a forma como os projetos de túneis são realizados, melhorando, além de tudo, a capacidade de controle de risco, por facilitar a tomada de decisão, provendo suporte preciso e rápido para a mesma (Žibert *et al.*, 2016).

Em túneis, essa tecnologia possui três elementos separados (Fig. 2.29), mas que são integrados de maneira que a mudança em um dos elementos é refletida nos demais.

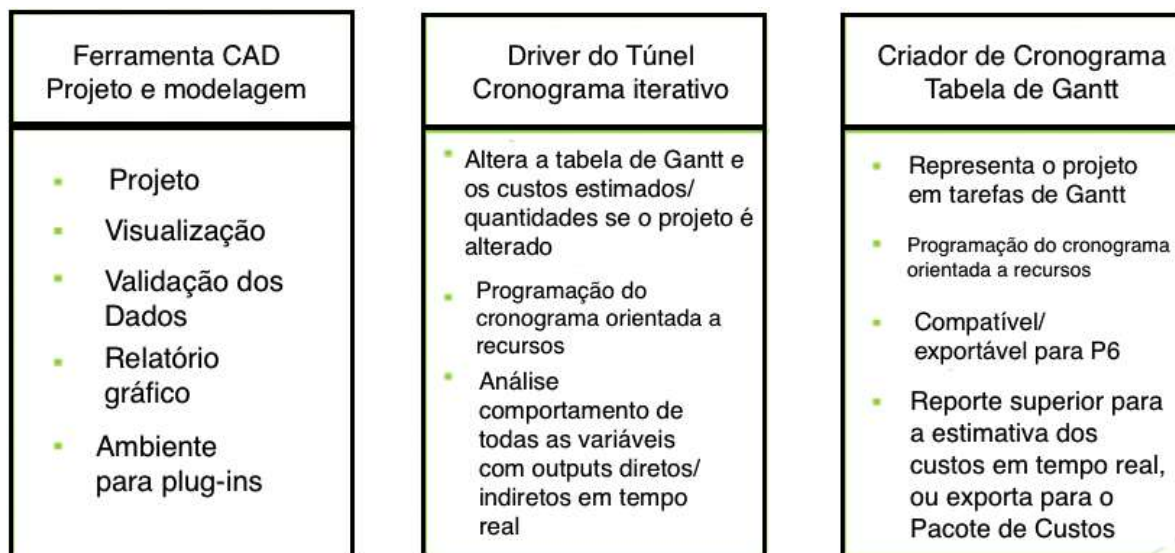


Figura 2.29 BIM 5D para escavação de túneis. Elementos do software e resumo de suas funções (Žibert *et al.*, 2016).

A Tabela de Gantt referido na Fig. 2.29, é um modelo gráfico de representação do cronograma da obra, sendo dividido em tarefas. Por meio de barras que representam uma linha do tempo, esse recurso permite que se tenha uma visão clara do tempo investido em cada tarefa e do prazo total para a entrega do projeto finalizado (Reis, 2016).

A análise de risco, nessa tecnologia, estaria incorporada no segundo elemento (Fig. 2.29).

## **2.7.2 – COMUNICAÇÃO PÚBLICA**

Já a comunicação com o público sob o raio de ação da construção do túnel (pessoas físicas e jurídicas), pode ser realizada aproveitando os avanços da tecnologia da informação e com base no modelo dos chamados Sistemas de Alerta. A seguir, faz-se uma revisão geral dos sistemas de alerta e, em seguida, sua aplicação aos projetos de túneis.

### **2.7.2.1 – VISÃO GERAL**

Em regiões suscetíveis a desastres naturais, como Japão e costa oeste dos Estados Unidos, os sistemas de alerta são utilizados para monitoramento e comunicação de alertas de risco. Segundo Pearson (2012), esses sistemas são combinações de ferramentas e processos incorporados dentro das estruturas institucionais, coordenados pelas agências internacionais e, às vezes, nacionais.

Os sistemas de alerta funcionam como os sistemas de monitoramento de risco de incêndio predial, por exemplo, mas em uma escala regional, nacional ou até mesmo internacional. Esses sistemas são compostos por quatro elementos: conhecimento do risco, um serviço técnico de monitoramento e alerta, disseminação do alerta para as pessoas em risco, e sensibilização pública e preparação para ação.

O serviço de monitoramento está no centro desses sistemas e como eles operam depende de se ter uma base científica sólida para a previsão do desastre, bem como de se ter uma capacidade de executar o monitoramento de forma confiável 24 h por dia. A base científica depende do tipo de

desastre a ser prevenido. A atual capacidade técnica de previsão de ondas sísmicas, por exemplo, é diferente da capacidade de previsão de enchentes.

Pearson (2012) lista ainda algumas tecnologias para monitoramento, já citadas anteriormente, e comunicação de alertas:

- monitoramento: tecnologia de previsão e modelagem computacional; sistemas de sensoriamento remoto; sistemas de informação geográfica (*Geographic Information Systems, SIG*).
- comunicação: tecnologia de comunicação por satélite; tecnologia de telefonia móvel; tecnologias de informação e comunicação (*Information and Communication Technologies, ICTs*) para *crowdsourcing*; e mapeamento de crise (*Crisis Mapping*).

A disseminação global de redes e telefones móveis, faz com que a telefonia móvel, já consolidada, seja cada vez mais usada para comunicar avisos e coordenar as ações em casos de risco. Após a detecção de ondas P, que precedem terremotos, agências japonesas enviam alertas SMS para todos os telefones celulares registrados no país, por exemplo.

As duas últimas tecnologias de comunicação citadas (*crowdsourcing* e *crisis mapping*) surgiram recentemente com o desenvolvimento de meios de comunicação em massa como aplicativos de *smartphones*, e o crescente acesso à conexão de internet.

O *crowdsourcing* se vale da entrada de informação pela própria população para o gerenciamento do risco. O termo surgiu como uma ferramenta no mundo empresarial, cuja ideia principal é terceirizar uma tarefa, tradicionalmente realizada por um agente designado, para um grupo amplo, aberto e indefinido de pessoas. O *crowdsourcing* permite que se utilize o poder da multidão para realizar tarefas que antes eram de apenas alguns especialistas (Howe, 2008).

O *Crisis Mapping* é um tipo de gerenciamento que se vale do *crowdsourcing* como uma das formas de recolhimento de informação, para, então, analisar e disponibilizar dados durante situações de crise, geralmente um desastre natural ou conflito social/político. Um dos primeiros grandes eventos em que se utilizou esse tipo de mapeamento foi durante os esforços de resgate e recuperação dos

danos causados pelo terremoto que afetou o Haiti, principalmente a cidade de Porto Príncipe, em 2010.

Esse mapeamento se utiliza das seguintes ferramentas e métodos para fornecer um alerta eficaz para uma resposta rápida a emergências humanitárias complexas:

- aplicativos para celular e web,
- mapas participativos e dados de eventos obtidos por crowdsourcing,
- imagens aéreas e de satélite,
- plataformas geoespaciais,
- simulação em tempo real,
- modelos computacionais e estatísticos.

O *Crisis Mapping* é feito por comunidades internacionais de voluntários, formadas por especialistas, profissionais, políticos, técnicos, pesquisadores, jornalistas, acadêmicos, hackers e voluntários qualificados, engajados no cruzamento das crises humanitárias com novas tecnologias, *crowdsourcing* e mapeamento de crise (ICCM, 2016).

Uma dessas comunidades, The International Network of Crisis Mappers (Crisis Mappers Net), funciona como principal fórum de tecnologia humanitária do mundo, com mais de 8100 membros, em mais de 160 países, que são filiados a mais de 3000 instituições diferentes, incluindo mais de 400 universidades, 50 agências e projetos das Nações Unidas, dezenas de empresas de tecnologia de ponta, vários voluntários e técnicos de redes comunitárias e organizações humanitárias globais, nacionais e locais (ICCM, 2016).

Em 2013, após o terremoto de 7,7 de magnitude na escala Richter que atingiu o sudeste do Paquistão, o Instituto de Pesquisa Computacional do Qatar (QCRI) aplicou um conjunto de ferramentas que combinam um software de Inteligência artificial para Resposta Digital (AIDR) com aplicativos simples para entrada de informações por usuários (MicroMappers).

O AIDR é uma plataforma que recolhe e classifica Twitter/SMS automaticamente, de acordo com o tipo de informação sendo fornecida (pedidos de socorro, por exemplo) e importância da mesma. Esta ferramenta utiliza o processamento de linguagem natural e a aprendizagem de máquina

(subcampo da inteligência artificial que utiliza algoritmos que permitem que o computador extraia regras e padrões de grandes conjuntos de dados) (MicroMappers, 2016).

Já os MicroMappers, são aplicativos que permitem que o usuário classifique o conteúdo da informação (seja ela uma mensagem em rede social ou uma imagem, por exemplo), de maneira a organizar essas informações (Fig. 2.30).

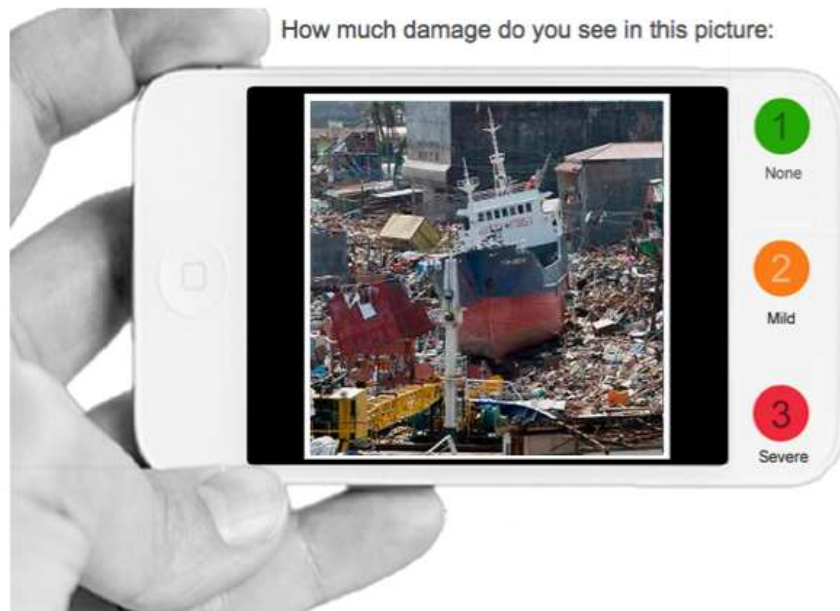


Figura 2.30 – Exemplo de aplicativo MicroMapper (MicroMappers, 2016).

### 2.7.2.2 – APLICAÇÃO EM TÚNEIS

Como os projetos de túneis quase sempre envolvem riscos a terceiros, principalmente no caso de túneis urbanos, o modelo dos Sistemas de Alerta tem muito a acrescentar para a análise de risco. O monitoramento dos danos às estruturas na superfície por meio da instrumentação, por exemplo, pode ser acrescentado por informações reportadas pelos usuários das mesmas, muitas vezes presentes diariamente no local.

Esse tipo de gerenciamento de risco é viável, uma vez que o público é parte interessada na segurança da escavação. Plataformas que permitem a simples comunicação com esses agentes, como aplicativos de celular, fornecem uma forma de controle para os mesmos, que passam a ser



ativos, e não mais passivos, na análise do risco. Ao mesmo tempo que informações são fornecidas pelo usuário, o mesmo recebe atualizações e alertas em caso de nível de risco extremo. Em caso de risco de colapso eminente, a rápida comunicação com o público sobre os perigos, planos de evacuação e rotas de fuga pode salvar muitas vidas.

Essa percepção de controle aumenta a aceitação do público ao risco. Enquanto analistas de risco tendem a categorizar o risco de acordo com as mortes anuais ou impactos econômicos, as pessoas normais tendem a categorizar o risco com base no potencial de ocorrência de catástrofe; no controle; na ameaça às gerações futuras, família e patrimônio; no nível de percepção do risco; e uma série de outros fatores menos quantitativos (Baecher & Christian, 2003).

Vale ressaltar, no entanto, que esse tipo de gerenciamento de risco com base em *crowdsourcing* serve como complemento aos gerenciamentos técnicos, não sendo aplicados sozinhos. O controle das informações fornecidas pelo público, nesses casos, deve ser bem filtrado, a fim de que se identifique os dados relevantes. Além disso, alguns obstáculos podem surgir, interrompendo a comunicação - como postes de telefonia danificados ou redes sobrecarregadas, por exemplo.

Por fim, após todos os passos de análise de risco descritos nas seções anteriores desse Capítulo, caso o nível do risco não seja aceitável, medidas remediadoras devem ser tomadas e a Eq. 2.13 é estendida, passando o risco atualizado,  $R'$ , computado como:

$$R' = P'[V] \cdot P'[C_R|V] \cdot U(C_R') + U(CA) \quad (2.14)$$

em que  $P'[V]$  e  $P'[C_R|V]$  são, respectivamente a probabilidade de ocorrência do evento e a probabilidade das consequências após as medidas remediadoras. O custo das consequências é dado por  $U(C_R')$ , caso essas sejam reduzidas, e  $U(CA)$  representa os custos das medidas adotadas.

O fluxo completo de análise de risco, como descrito ao longo de todo o Capítulo, é, então, repetido até que o risco seja aceitável.

### **3 – APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ANÁLISE DE RISCO**

No presente capítulo, aplica-se a maior parte dos conceitos e métodos, descritos até então no trabalho, para um exemplo de um projeto simples de um túnel. Ressalta-se que, como o objetivo é demonstrar, de maneira simples e de fácil entendimento, como o exposto no trabalho pode ser aplicado, a aplicação será mais superficial, e não um estudo detalhado de um projeto real.

Primeiramente, realizou-se uma simulação numérica da escavação desse túnel, afim de identificar qual parâmetro melhor se adequaria como indicador na análise de risco, ou seja, aquele que apresenta mudança de padrão mais cedo quando há mudança nas condições geológicas. Posteriormente, realiza-se uma análise de risco e apresenta-se um modelo de aplicativo para comunicação do risco.

#### **3.1 – METODOLOGIA**

A seguir, apresenta-se a metodologia utilizada nesta aplicação do processo de análise de risco. Primeiramente, aborda-se o programa computacional utilizado para simulação e, em seguida o modelo geológico adotado para o maciço, bem como as características do túnel (geometria e forma de escavação).

##### **3.1.1 – PROGRAMA COMPUTACIONAL**

O Método dos Elementos Finitos foi utilizado neste trabalho para análise dos deslocamentos na simulação de escavação de um túnel simples em rocha. Para isso, utilizou-se o programa computacional PLAXIS 3D Tunnel, por esse ser um programa de simples utilização e capaz de cumprir os objetivos da análise.

A seguir, apresenta-se o funcionamento básico do programa, bem como os parâmetros geotécnicos adotados para os materiais e as características do túnel. Posteriormente, apresenta-se os gráficos para os diferentes parâmetros, como descritos na Seção 2.2.

Plaxis 3D Tunnel é um programa computacional baseado no método dos elementos finitos, que foi desenvolvido especificamente para a análise de deformação e de estabilidade em projetos de túneis. Sua interface gráfica simples para a entrada do modelo a ser simulado (*Input*) permite a rápida geração de modelos complexos, assim como as ferramentas de *Output* proporcionam uma apresentação detalhada dos resultados (PLAXIS 3D Tunnel Introductory Version Tutorial Manual).

O programa funciona com quatro módulos:

- *Input*: módulo para a entrada da geometria, condições de contorno, propriedades dos materiais, cargas e condições iniciais de tensão, poropressão e deformação, além da geração da malha de elementos finitos bidimensional e tridimensional.
- *Calculations*: módulo que permite a definição das fases de carregamento, seja por aplicação de cargas externas, por escavação, por construção, ou por mudança nas propriedades do material. Após a entrada da sequência de carregamento, o módulo executa o cálculo do estado de tensões e deformações resultantes. O cálculo termina quando se atinge o número de passos de carregamento e iterações determinadas ou um nível de carregamento admissível.
- *Output*: módulo de apresentação dos resultados, fornecendo opções de visualização das tensões, deslocamentos e deformações do modelo 3D ou das seções transversais. Podem ser obtidas tabelas com a completude dos resultados, assim como gráficos, vetores de deslocamento e pontos de tração e de plastificação.
- *Curves*: módulo que permite a obtenção dos deslocamentos em pontos específicos do modelo, selecionados no módulo de cálculo, em forma de gráfico ou tabela.

O programa possui quatro opções diferentes para o modelo constitutivo do material: elástico perfeitamente plástico, com critério de ruptura de Mohr-Coulomb (*Mohr-Coulomb Model*); modelo elasto-plástico anisotrópico, para casos particulares de presença de falha em uma direção específica (*Jointed Rock Model*); modelo de endurecimento do solo, com variação do módulo de rigidez de acordo com a tensão (*Hardening-Soil Model*); e o modelo que considera a fluência do solo (*Soft Soil Creep Model*).

### 3.1.2 – GEOLOGIA

Para os propósitos deste trabalho, o modelo buscou simular o caso de uma escavação em uma rocha (que chama-se aqui de Geologia Esperada, GE, pois representa o tipo de geologia que se esperava encontrar ao longo de toda a escavação, antes do começo da mesma), onde, após 51 m de escavação do trecho considerado na análise (não necessariamente após 51 m do emboque do túnel), há uma zona (com extensão de cerca de um diâmetro do túnel) com um tipo de material diferente, com propriedades inferiores (que chama-se, para fins de análise, de Geologia Desconhecida, GD). Dessa forma, procurou-se avaliar se essa mudança nas propriedades do material poderia ser detectada pelos diferentes tipos de análise de deslocamento, citados no Capítulo 2, antes que a escavação atingisse a região alterada.

Ao todo foram realizadas três simulações: uma apenas com GE, para fins de comparação; uma com um material geológico com propriedades inferiores às da GE, mas ainda resistente, chamado aqui de GD1; e uma com um material geológico com propriedades muito inferiores aos demais, que não suporta a escavação, apresentando colapso, chamado aqui de GD2. Vale ressaltar, que o uso do termo material geológico se deve ao fato de que não é de interesse, para fins desta análise, saber qual é o tipo de material, seja ele um arenito ou um quartzito, por exemplo.

Para a simulação, adotou-se o modelo constitutivo de endurecimento, pois este descreve com maior acurácia a rigidez do material, considerando sua mudança de valor quando o material sofre carregamento ou descarregamento, como ocorre durante escavações. Além do ângulo de atrito,  $\phi$ , da coesão,  $c$ , e do ângulo de dilatância,  $\psi$  (também utilizados para descrever estados limite de tensão no modelo de Moh-Coloumb), o módulo de rigidez é determinado com base em três valores de entrada: a rigidez obtida pelo carregamento triaxial,  $E_{50}$ ; a rigidez obtida pelo descarregamento triaxial,  $E_{ur}$ ; e a rigidez obtida pelo carregamento oedométrico,  $E_{oed}$ .

Como padrão, o programa adota  $E_{ur} \approx 3E_{50}$  e  $E_{oed} \approx E_{50}$ . Este padrão foi mantido e os valores adotados, para essas e para as demais propriedades geotécnicas, tanto para a GE, quanto para GD1 e GD2, podem ser encontrados nas Tab. 3.1, Tab. 3.2 e Tab. 3.3. Para os valores adotados para GE, Tab. 3.1, baseou-se nas propriedades de uma rocha ígnea, sã. A estimativa das propriedades de

GD1 (Tab. 3.2) e GD2 (Tab.3.3) foi feita reduzindo os valores das propriedades adotadas para GE, afim de que se obtivesse as situações de deslocamento desejadas.

Além disso, a favor da simplificação, adotou-se o coeficiente de empuxo no repouso,  $k_0$ , constante e igual a um para todos os materiais. No entanto, vale ressaltar que a diminuição do valor de  $k_0$  aumenta a zona de influência da redistribuição de tensões devido à escavação e poderia, dessa forma, influenciar a mudança de comportamento nos gráficos.

Tabela 3.1 – Propriedades da Geologia Esperada (GE).

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Modelo Constitutivo	---	Hardening Soil	---
Tipo de Comportamento do material	---	Drenado	---
Peso Específico	$\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}}$	27	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de Rigidez no Carregamento Triaxial	$E_{50}$	30	GPa
Módulo de Rigidez no Descarregamento Triaxial	$E_{\text{ur}}$	90	GPa
Módulo de Rigidez no Carregamento Oedométrico	$E_{\text{oed}}$	29	GPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,2	---
Coesão	$c$	25	MPa
Ângulo de Atrito	$\phi$	45	°
Ângulo de Dilatância	$\psi$	5	°

Como pode-se ver nas Tab. 3.1 e Tab. 3.2 os materiais possuem propriedades de rochas competentes. Como o objetivo da primeira simulação era simplesmente avaliar a mudança de comportamento nos deslocamentos, independentemente das propriedades do material, optou-se por um modelo simples, com material capaz de suportar a escavação à seção plena, sem necessidade de instalação de sistema de suporte. Ou seja, o que interessa, nesse caso, são os valores relativos, e não os absolutos, das propriedades. Nesse caso, o  $E_{\text{ur}}$  de GD1 é três vezes menor do que o  $E_{\text{ur}}$  da GE.

Já o material da Tab. 3.3, possui propriedades comparativamente muito inferiores aos dois anteriores. Sua rigidez é doze vezes menor do que a da GE.

Tabela 3.2 – Propriedades da Geologia Diferente 1 (GD1).

Parâmetro	Nome	Valor	Unidade
Modelo Constitutivo	---	Hardening Soil	---
Tipo de Comportamento do material	---	Drenado	---
Peso Específico	$\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}}$	23	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de Rigidez no Carregamento Triaxial	$E_{50}$	10	GPa
Módulo de Rigidez no Descarregamento Triaxial	$E_{\text{ur}}$	30	GPa
Módulo de Rigidez no Carregamento Oedométrico	$E_{\text{oed}}$	9,6	GPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,2	---
Coesão	$c$	1	MPa
Ângulo de Atrito	$\phi$	35	°
Ângulo de Dilatância	$\psi$	5	°

Tabela 3.3 – Propriedades da Geologia Diferente 2 (GD2).

Parâmetro	Nome	Valor	Unidade
Modelo Constitutivo	---	Hardening Soil	---
Tipo de Comportamento do material	---	Drenado	---
Peso Específico	$\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}}$	20	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de Rigidez no Carregamento Triaxial	$E_{50}$	0,5	GPa
Módulo de Rigidez no Descarregamento Triaxial	$E_{\text{ur}}$	1,5	GPa
Módulo de Rigidez no Carregamento Oedométrico	$E_{\text{oed}}$	0,5	GPa
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,2	---
Coesão	$c$	0,025	MPa
Ângulo de Atrito	$\phi$	35	°
Ângulo de Dilatância	$\psi$	5	°

### 3.1.3 – TÚNEL

O trecho de túnel simulado possui um diâmetro de 10 m, escavado à seção plena, com avanço de 3 em 3 m, e um comprimento total de 99 m escavados (Fig. 3.1). A mudança no tipo de geologia, como dito anteriormente, ocorre a 51 m do começo da simulação da escavação, fora da zona de influência das condições de contorno.

A geometria do modelo de entrada no programa é apresentada na Fig. 3.2, onde valeu-se da simetria do problema para maior rapidez nos cálculos do programa. Pontos de coleta dos deslocamentos foram selecionados no teto e na lateral das seções transversais, geralmente a partir dos 33 m escavados e a cada 3 m seguintes, até a ultrapassagem da zona com propriedades diferentes (Fig. 3.3).

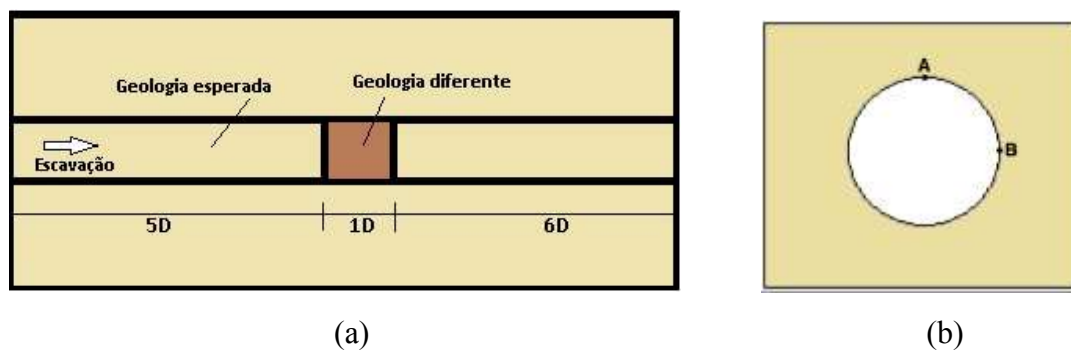


Figura 3.1 – Esquema representativo: a) Vista superior do modelo. b) Pontos de coleta de deslocamentos na seção transversal do túnel.

Para fins de análise, o deslocamento vertical será considerado o deslocamento que ocorre na direção do eixo Y e o deslocamento horizontal ocorrendo no eixo Z, conforme sistema de eixos apresentado na Fig. 3.2b.

### 3.1.4- ANÁLISE DE RISCO

A árvore Bayesiana apresentada na Fig. 2.24 será a ferramenta utilizada para análise. O Custo Total não será quantificado nesta análise, já que é um tópico extenso, não abordado neste trabalho. Vale ainda ressaltar que todas as premissas adotadas e expostas a seguir foram baseadas no trabalho de Sousa & Einstein (2012).

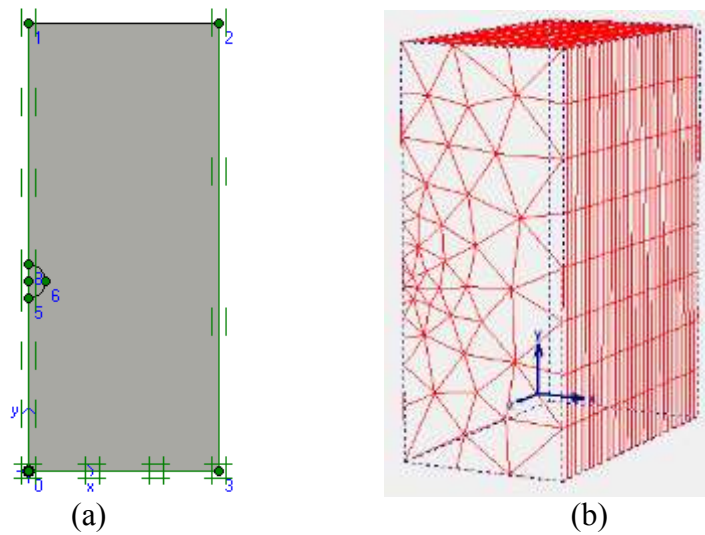


Figura 3.2 - Modelagem no programa PLAXIS 3D Tunnel: (a) Seção transversal. (b) Representação dos sistemas de eixos no modelo 3D.

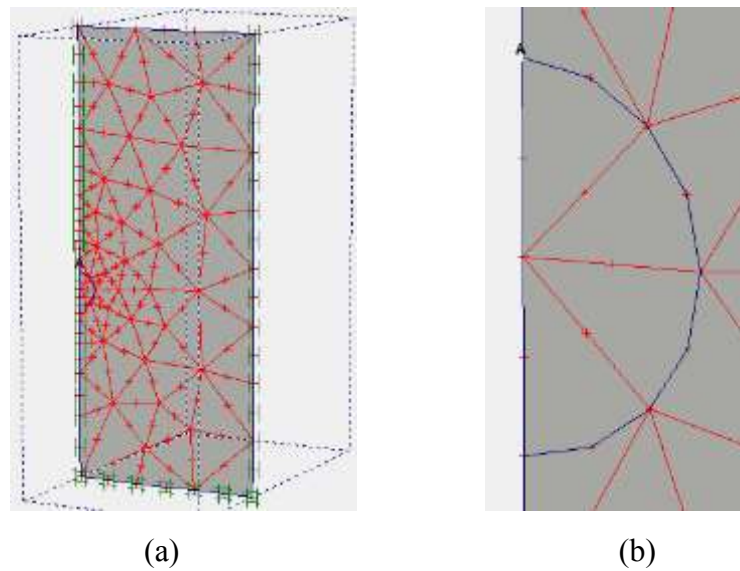


Figura 3.3 - Ponto A para obtenção dos valores de deslocamentos no teto das seções transversais escavadas: (a) Seção transversal em localização no modelo 3D. (b) Seção transversal.

Para esse caso o nó de decisão, Estratégia de Construção, poderá assumir as seguintes formas:

- Seção Plena Sem Suporte;
- Seção Plena Com suporte.



Já a condição geológica, CG, poderá ser:

- Geologia Esperada, GE;
- Geologia Desconhecida 1, GD1;
- Geologia Desconhecida 2, GD2.

O Modo de ruptura poderá ser:

- Não Colapso;
- Colapso.

O nível de ocupação pode ser categorizado como:

- Alto;
- Médio;
- Baixo.

O nível dos danos, assim como definido em Sousa e Einstein (2012), poderá ser:

- Sem danos a terceiros;
- Nível 1 de danos – danos em estruturas devido à deformação;
- Nível 2 de danos – colapso causando danos às estruturas e perigo à população.

O nível de risco será definido como na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 - Matriz de avaliação do risco.

Probabilidade (%)	Consequências		
	Sem danos a terceiros	Nível 1 de danos	Nível 2 de danos
>10%	Alto	Extremo	Extremo
1 – 10	Médio	Alto	Extremo
0,1 – 1	Baixo	Alto	Extremo
0 – 0,1	Baixo	Médio	Alto

As Tab. 3.5 e Tab. 3.6 são as tabelas de probabilidade utilizadas para a árvore Bayesiana.

Tabela 3.5 – Tabela de probabilidades para relação entre condição geológica, estratégia de construção e modo de ruptura.

<b>Condição Geológica</b>	GE		GD1		GD2	
	Seção plena sem suporte	Seção plena com suporte	Seção plena sem suporte	Seção plena com suporte	Seção plena sem suporte	Seção plena com suporte
Colapso	0,05	0	0,15	0,05	1	0,35
Não Colapso	0,95	1	0,85	0,95	0	0,65

Tabela 3.6 – Tabela de probabilidades para a relação entre o modo de ruptura, o nível de ocupação da superfície e o nível dos danos.

<b>Modo de Ruptura</b>	<b>Ocupação da Superfície</b>	Sem Danos	Nível 1 de Danos	Nível 2 de Danos
Colapso	Alta	0,02	0,18	0,8
Não Colapso	Alta	1	0	0
Colapso	Média	0,05	0,4	0,55
Não Colapso	Média	1	0	0
Colapso	Baixa	0,1	0,5	0,4
Não Colapso	Baixa	1	0	0

Para fins de exemplificação, considerar-se-á que os envolvidos dispõem de um aplicativo para acompanhamento do projeto, cujo *layout* está representado na Fig. 3.4. Tal aplicativo foi criado exclusivamente para a presente dissertação a partir da plataforma App Inventor, disponibilizada pelo Massachusetts Institute of Technology. A primeira tela do aplicativo consiste das opções de acompanhamento da obra, como no caso BIM 5D, acrescentando a opção de análise do risco.

### 3.2 – RESULTADOS

A seguir, apresentam-se os resultados das simulações, bem como da análise de risco.

Primeiramente, são reportados os resultados da simulação com a GD1, cujo material, como dito anteriormente, possui propriedades inferiores às da GE, mas é, ainda, resistente. Em seguida, são

reportados os resultados da simulação com GD2, material com propriedades muito inferiores aos demais, que não suporta a escavação, apresentando colapso. Por fim, realiza-se uma análise de risco, apresentando um modelo de aplicativo para comunicação do risco.

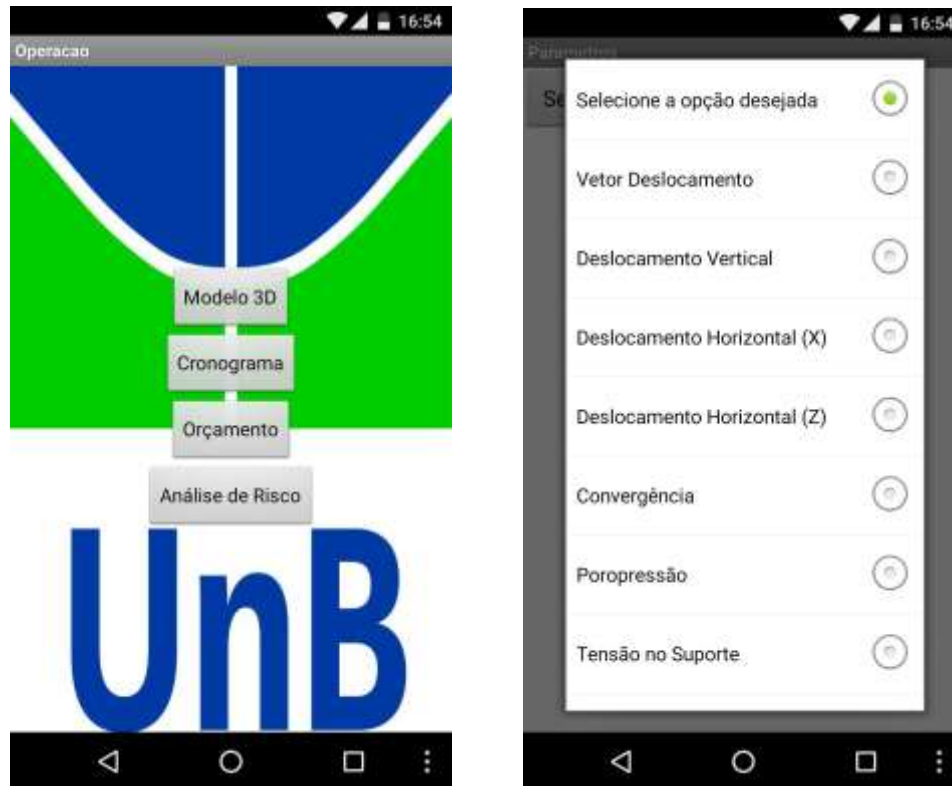


Figura 3.4 - Modelo de aplicativo criado por meio da plataforma App Inventor: (a) Telas inicial. (b) Tela de escolha do parâmetro a ser visualizado.

### 3.2.1 – SIMULAÇÃO COM A GEOLOGIA DIFERENTE 1

A seguir, apresenta-se os resultados da segunda simulação nos seguintes gráficos: história dos deslocamentos, razão entre deslocamentos no teto e na lateral da seção, curva de deflexão e curva de tendência. Nos gráficos, é possível perceber que os valores dos deslocamentos são muito pequenos, pois as rochas são muito competentes. No entanto, mesmo com valores absolutos baixos, pode-se perceber a influência da alteração nas propriedades do material no comportamento dos gráficos.

A Fig. 3.5 apresenta os deslocamentos verticais no teto da seção escavada, para pontos específicos (entre 33 e 57 m de escavação). A seção onde ocorre a mudança de material é marcada por uma linha vertical laranja, assim como nos demais gráficos, a 51 m.

Como pode-se perceber, a variação no padrão do gráfico só ocorre após a escavação ter atingido o material com propriedades diferentes, não havendo possibilidade de previsão dessa alteração.

A Fig. 3.6 apresenta os deslocamentos horizontais para os mesmos pontos da Fig. 3.5. Percebe-se que a alteração no padrão das curvas pode ser percebida cerca de 10 m (um diâmetro do túnel) antes da escavação encontrar a zona com propriedades diferentes. No entanto, ainda assim, essa discrepância de comportamento somente se torna mais clara cerca de 5 m antes da mudança de material, ou seja, a meio diâmetro da escavação chegar a GD1.

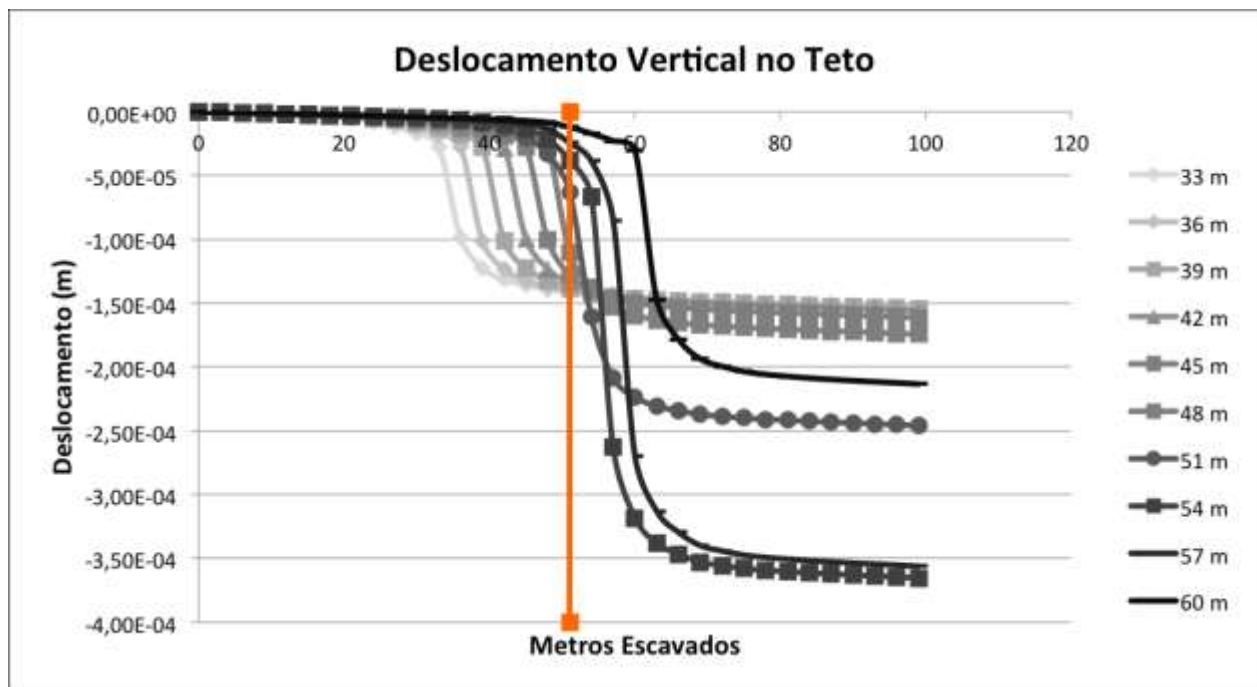


Figura 3.5 – Histórico dos deslocamentos verticais no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD1.

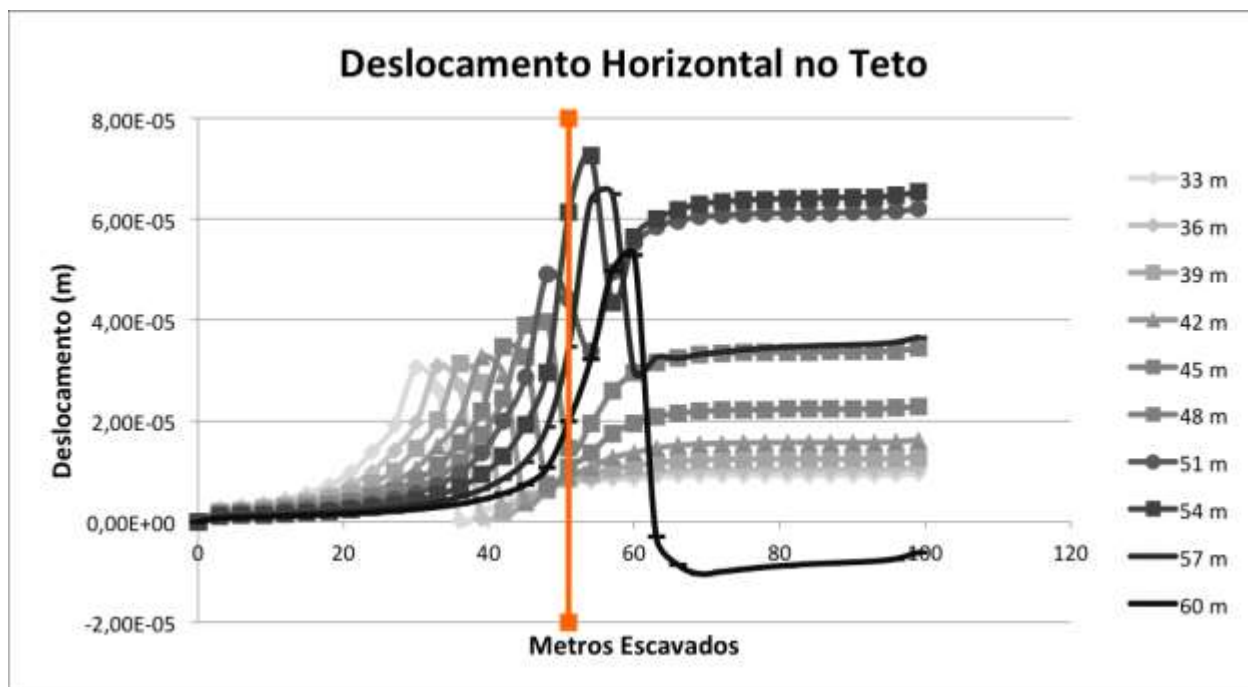


Figura 3.6 – Histórico do deslocamento horizontal no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD1.

A razão entre as componentes de deslocamento, deslocamento vertical, por exemplo, em pontos diferentes da seção transversal, pode produzir resultados capazes de prever a alteração do material. No entanto, nem sempre pode-se ter certeza da mudança de comportamento por meio dessa análise. Supondo que a instrumentação forneceu os deslocamentos do ponto A da Fig. 3.8 e, em seguida os deslocamentos do ponto B, o engenheiro responsável não terá certeza se foi uma alteração causada pelo próprio instrumento ou se foi devido à mudança das propriedades.

De qualquer maneira, as Fig. 3.7 e Fig. 3.8 reforçam o reportado nas Fig. 3.5 e Fig. 3.6. Ou seja, os deslocamentos horizontais sofrem alteração de comportamento antes da chegada da escavação, enquanto os verticais somente depois.

A Fig. 3.9 apresenta as curvas de deflexão entre 33 e 60 m escavados. Nesse caso, a mudança de comportamento é percebida uma fase de escavação (três metros) antes da mudança de material. Vale ressaltar que as curvas de deflexão são geradas a partir dos deslocamentos verticais e, assim como eles, não demonstram mudança de comportamento antecipadamente.

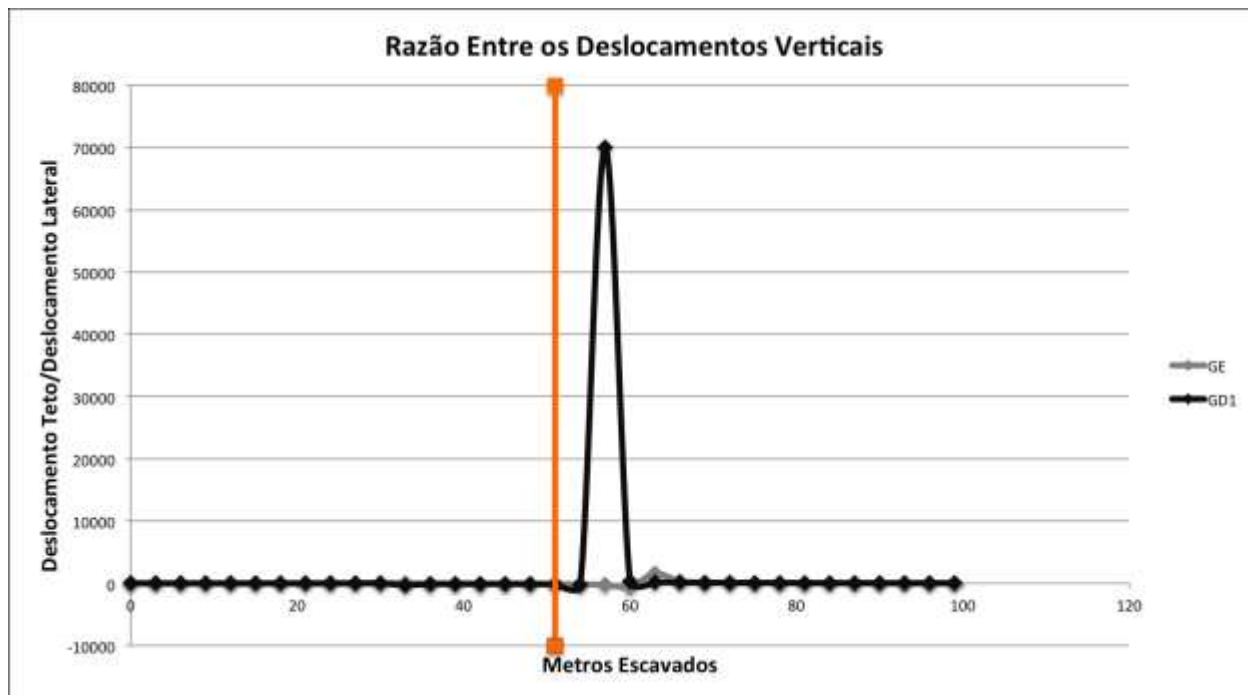


Figura 3.7 - Razão entre os deslocamentos verticais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD1.

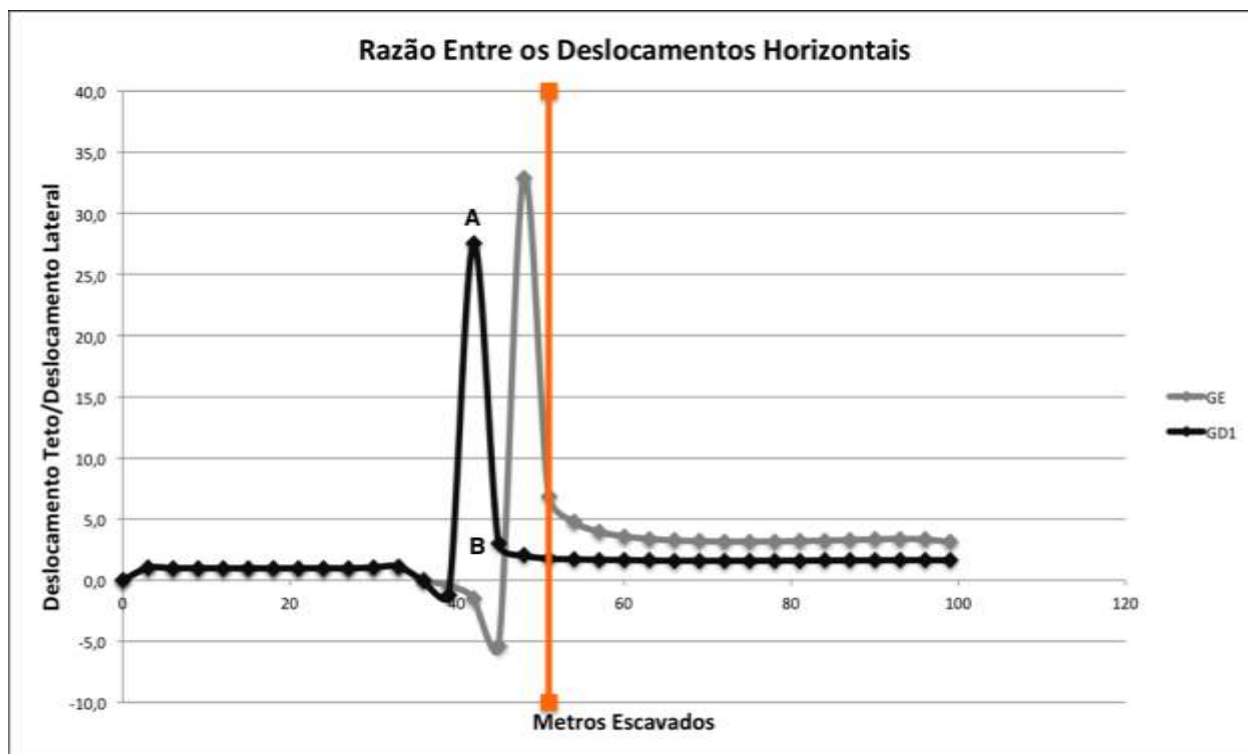


Figura 3.8 - Razão entre os deslocamentos horizontais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD1.

No caso da simulação por meio de programas computacionais, tem-se os dados de deslocamento antes mesmo de chegar ao ponto monitorado. Durante a construção, entretanto, isso não ocorre, já que o primeiro deslocamento reportado ocorre somente após a escavação do local monitorado e instalação da instrumentação. Dessa forma, a curva de deflexão seria reportada como na Fig. 3.10, desprezando os deslocamentos anteriores à instalação do instrumento. Nesse caso, a mudança de material não pode ser percebida previamente à escavação.

Pode-se perceber, na Fig. 3.11, que a curva de tendência também só produz resultados significativos a cerca de 2 m da mudança de material.

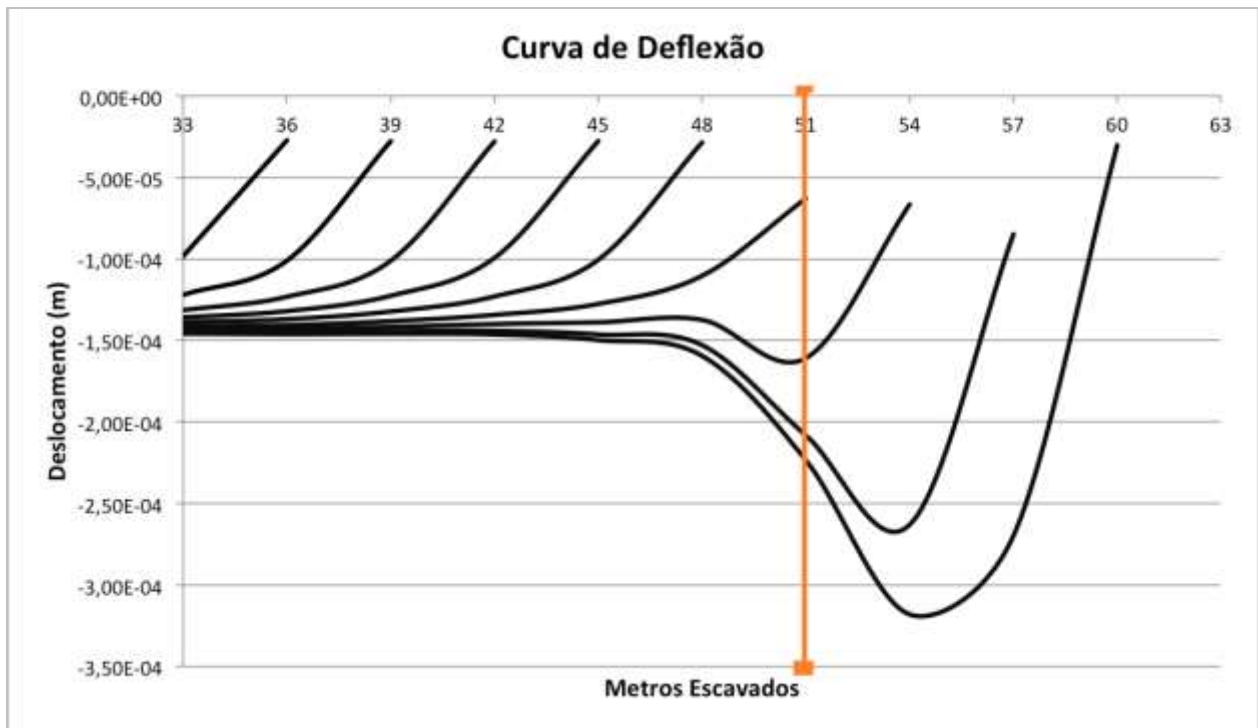


Figura 3.9 - Curva de Deflexão para GD1.

O vetor deslocamento, Fig. 3.12, foi obtido pela composição dos deslocamentos horizontais e verticais no teto da seção escavada, a uma posição de 3 m da mesma. Percebe-se, nesse caso, que a alteração do comportamento esperado começa a ocorrer cerca de 15 m antes da escavação da zona alterada (1,5 diâmetros do túnel), se tornando mais expressiva 12 m (1,2 diâmetros do túnel) antes

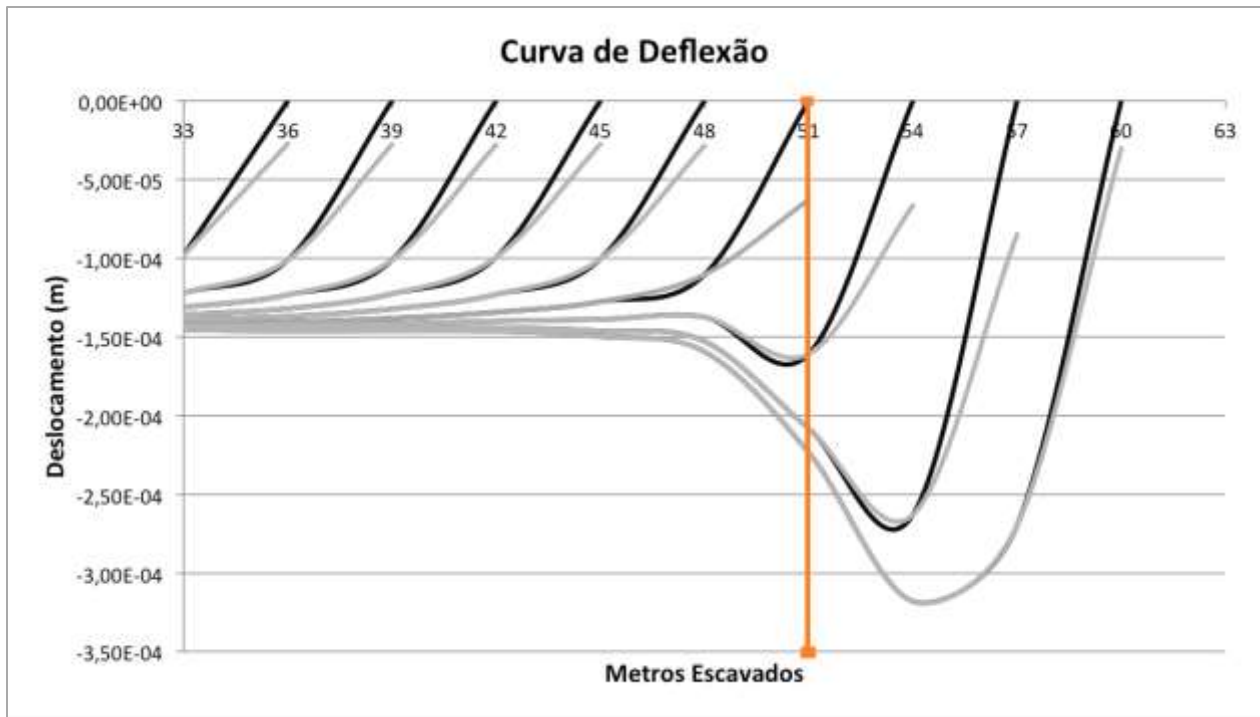


Figura 3.10 - Curva de Deflexão desprezando-se os deslocamentos anteriores à escavação do ponto para GD1.

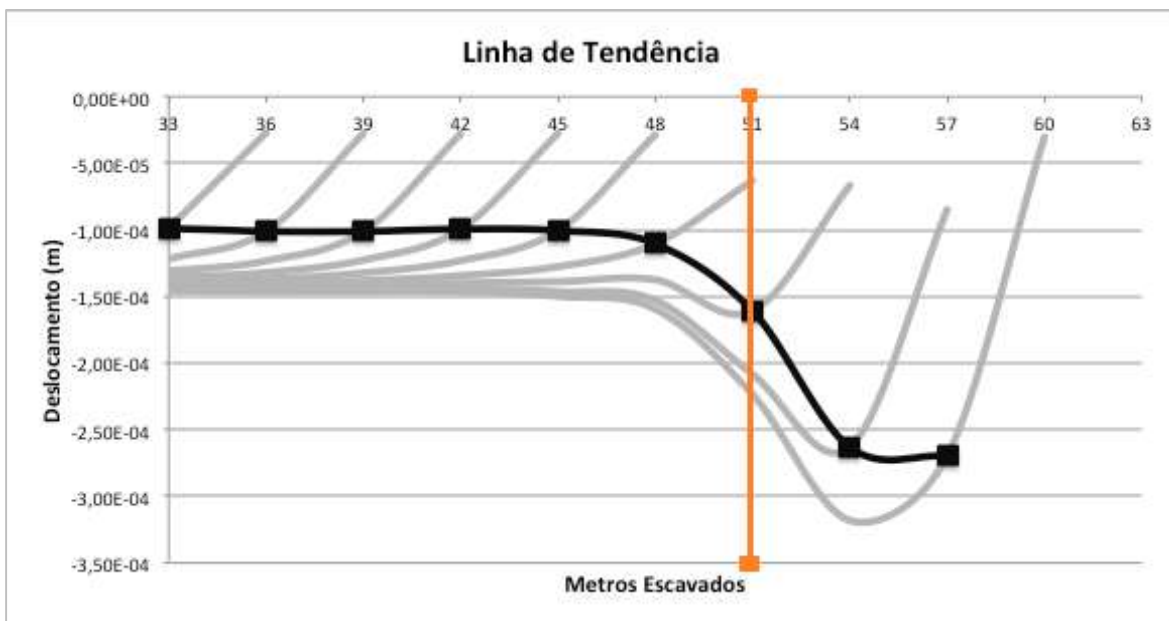


Figura 3.11 - Linha de Tendência para GD1.

Além disso, a queda no gráfico, na convenção de sinais adotada na simulação, indica que à frente possivelmente há uma zona com menor rigidez.



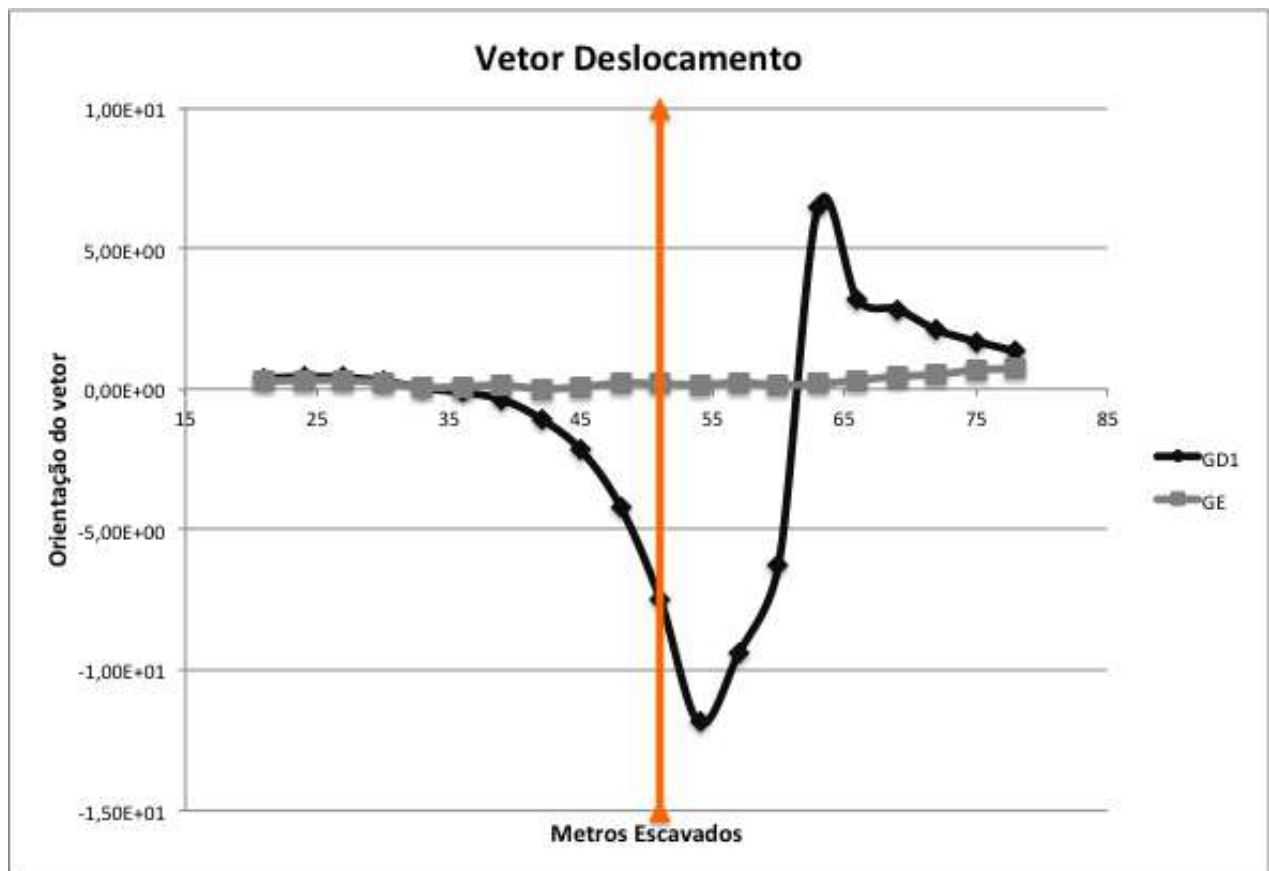


Figura 3.12 - Vetor deslocamento formado pelos deslocamentos vertical e horizontal no teto das seções transversais, a 3 m da face para GD1.

### 3.2.2 – SIMULAÇÃO COM A GEOLOGIA DIFERENTE 2

A seguir, apresenta-se os gráficos da terceira simulação, com GD2, para os mesmos parâmetros da segunda simulação. Nesse caso, há colapso logo depois da escavação da GD2 (metro 51 a 60), após 69 m escavados.

A Fig. 3.13, mostra que, ainda que os deslocamentos sejam maiores nesse caso, o histórico dos deslocamentos verticais só apresenta mudança após a chegada da escavação na zona alterada. Já a Fig. 3.14, mostra que o histórico dos deslocamentos horizontais aponta mudança de comportamento antes, mas ainda somente a poucos metros de GD2. Dessa forma, nenhum dos dois gráficos permite a tomada de medidas antes da mudança das condições geológicas.

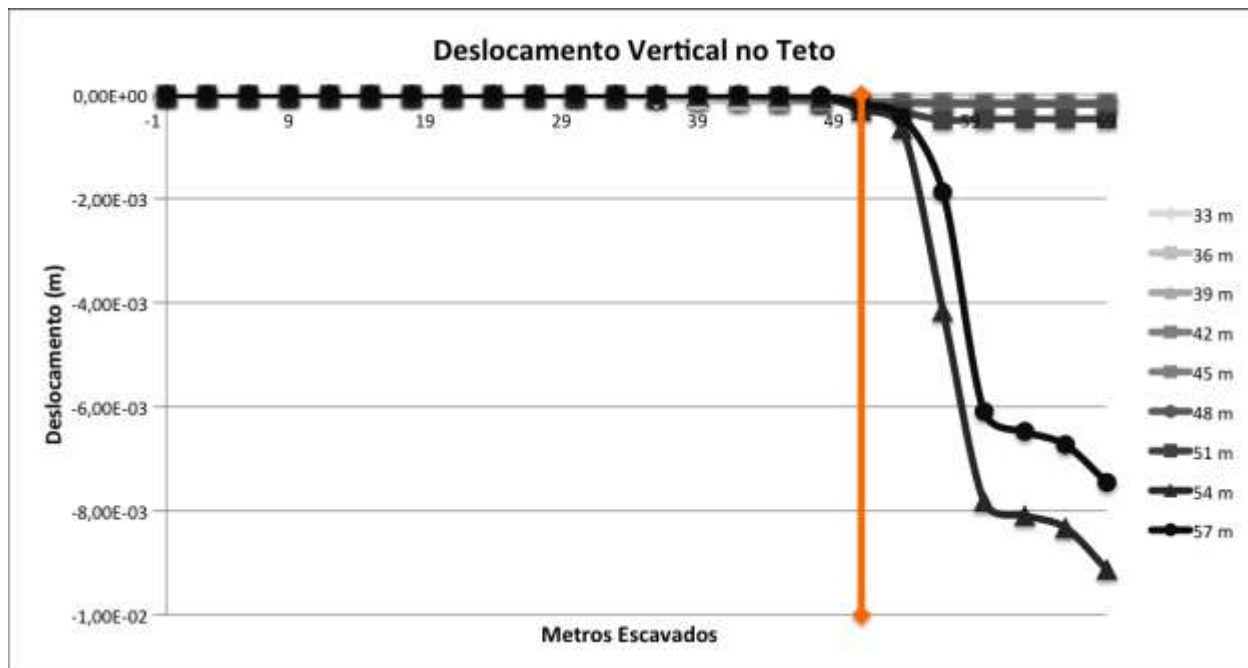


Figura 3.13 - Histórico dos deslocamentos verticais no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD2.

O gráfico da razão dos deslocamentos verticais também não seria um bom indicador para análise de risco nesse caso, Fig. 3.15, já que seu comportamento só se altera após os 51 m de escavação. Já o gráfico da razão dos deslocamentos horizontais, Fig. 3.16, permite a percepção da mudança de comportamento a cerca de 10 m (1 diâmetro do túnel) antes da geologia desconhecida. No entanto, essa mudança de comportamento só se torna clara a cerca de 3 m antes, ou seja, uma etapa de escavação antes da chegada à região formada por GD2.

A curva de deflexão, Fig. 3.17, permite uma clara verificação de mudança de comportamento a 5 m da seção de GD2. Já a Fig. 3.18, como para a segunda simulação, apresenta a curva de deflexão caso os deslocamentos anteriores à escavação e à instalação dos instrumentos sejam desconsiderados. A percepção de alteração de comportamento será possível somente logo antes da mudança de material, não sendo esse um bom indicador para acompanhamento do risco.

A Fig. 3.19 mostra a curva de tendência, na qual percebe-se que a mudança de comportamento se torna clara somente a cerca de 4 m da GD2.

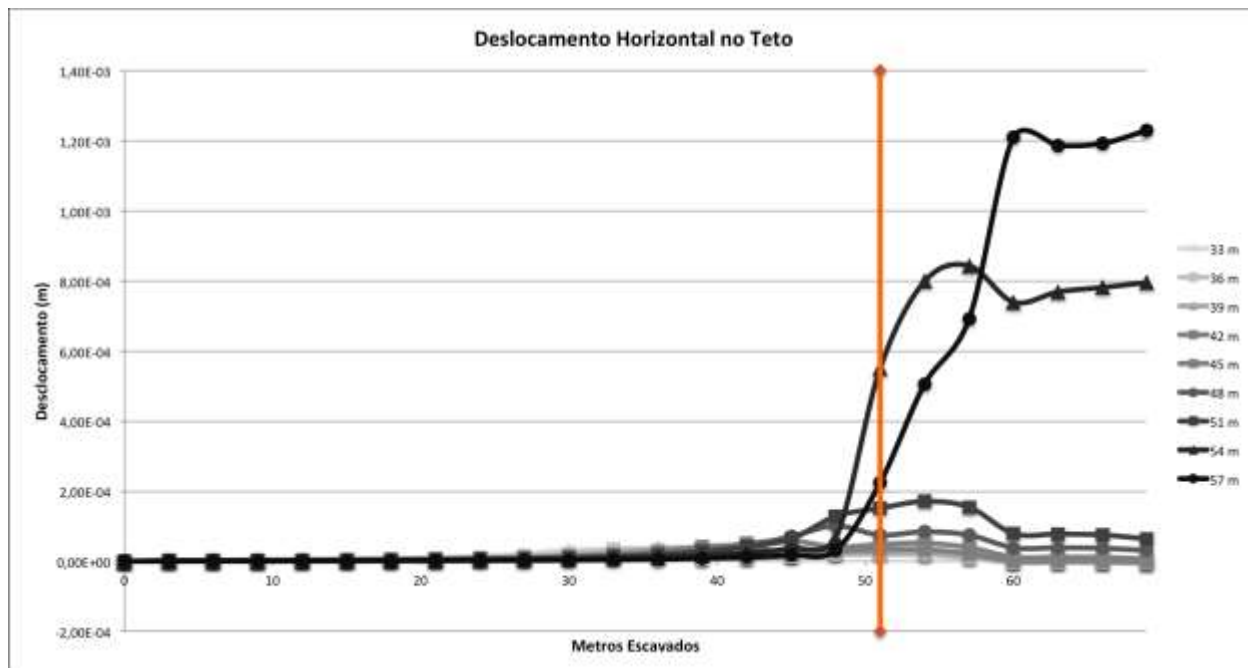


Figura 3.14 - Histórico dos deslocamentos horizontais no teto das seções transversais especificadas no gráfico para GD2.

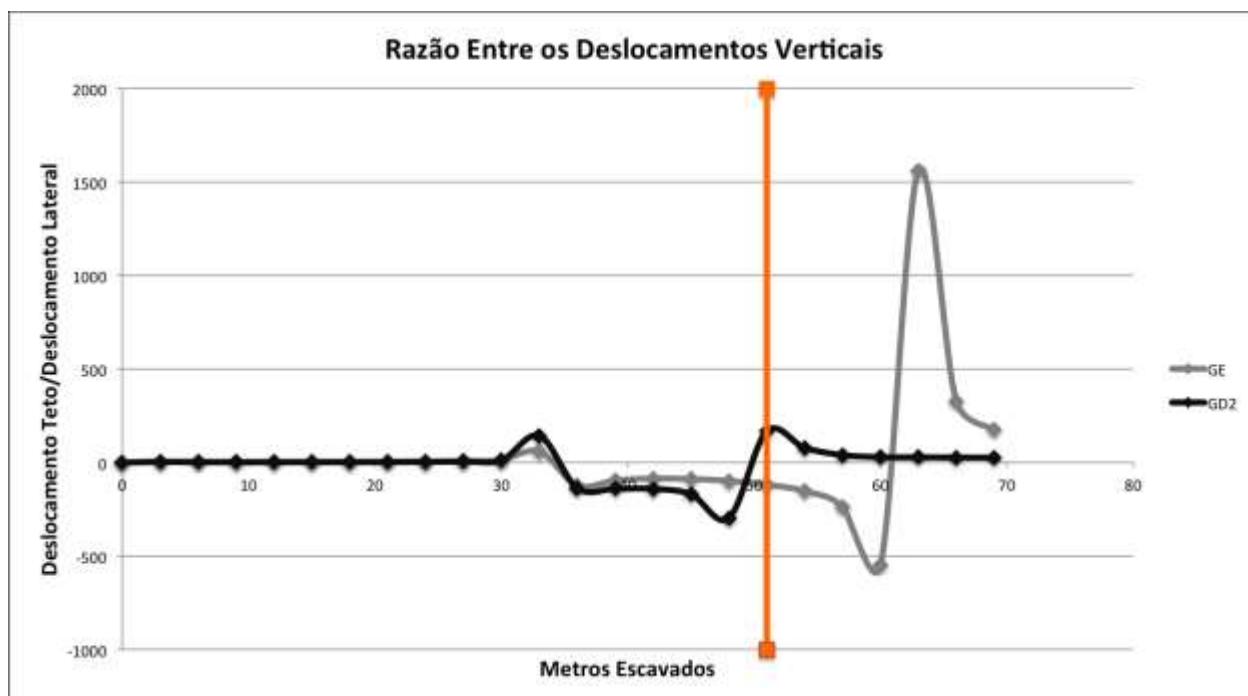


Figura 3.15 - Razão entre os deslocamentos verticais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD2.

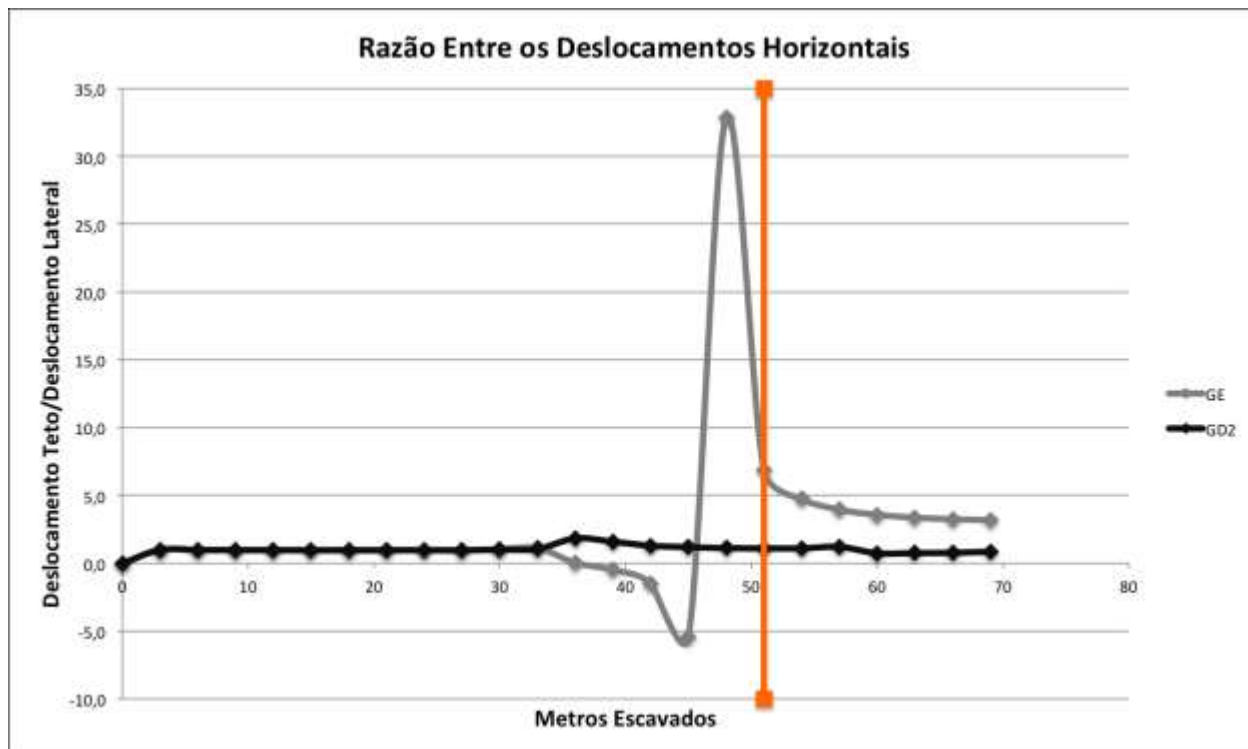


Figura 3.16 - Razão entre os deslocamentos horizontais no teto e na lateral da seção transversal a 33 m escavados para GD2.

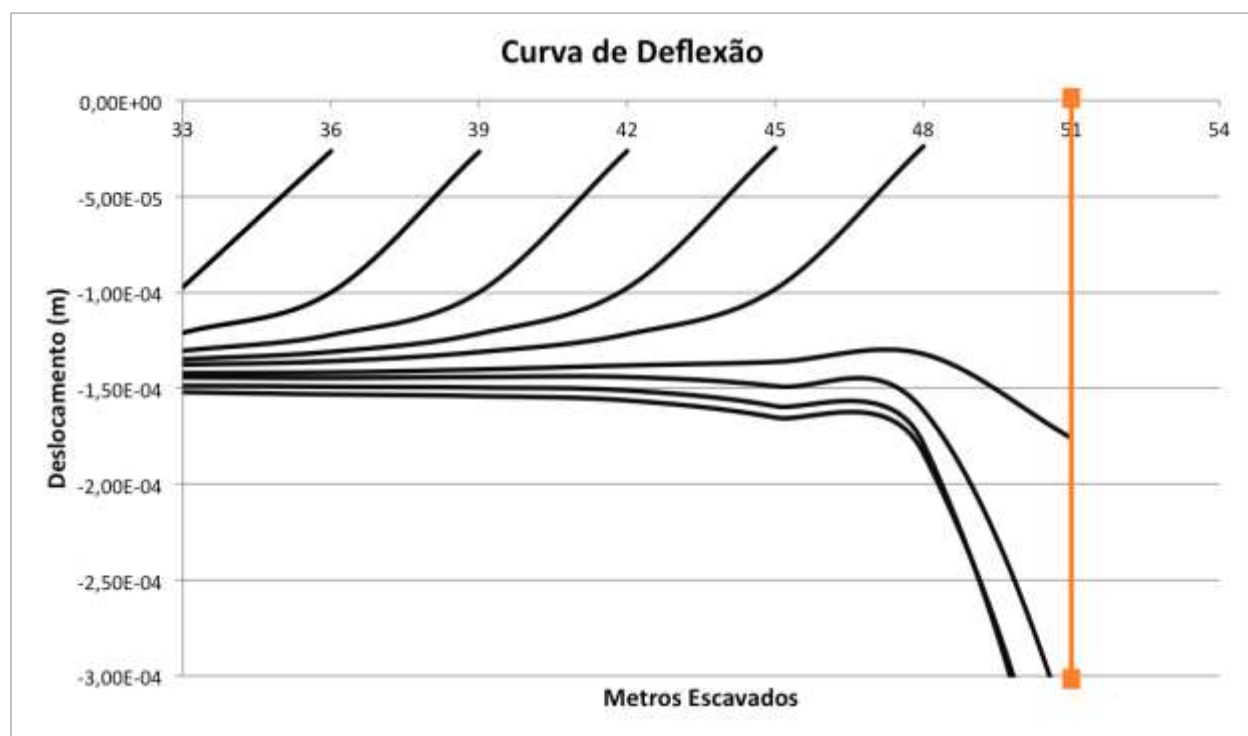


Figura 3.17 - Curva de Deflexão para GD2.

Já o vetor deslocamento, Fig. 3.20, no caso desta simulação, mostra alteração de comportamento a partir de 20 m (2 diâmetros do túnel) antes da seção com geologia desconhecida. Essa alteração no gráfico se torna mais clara já a 15 m (1,5 diâmetros do túnel) de GD2, o que equivale a cinco seqüências de escavação. Dessa forma, esse parâmetro, assim como na segunda simulação, é o melhor indicador para a análise de risco.

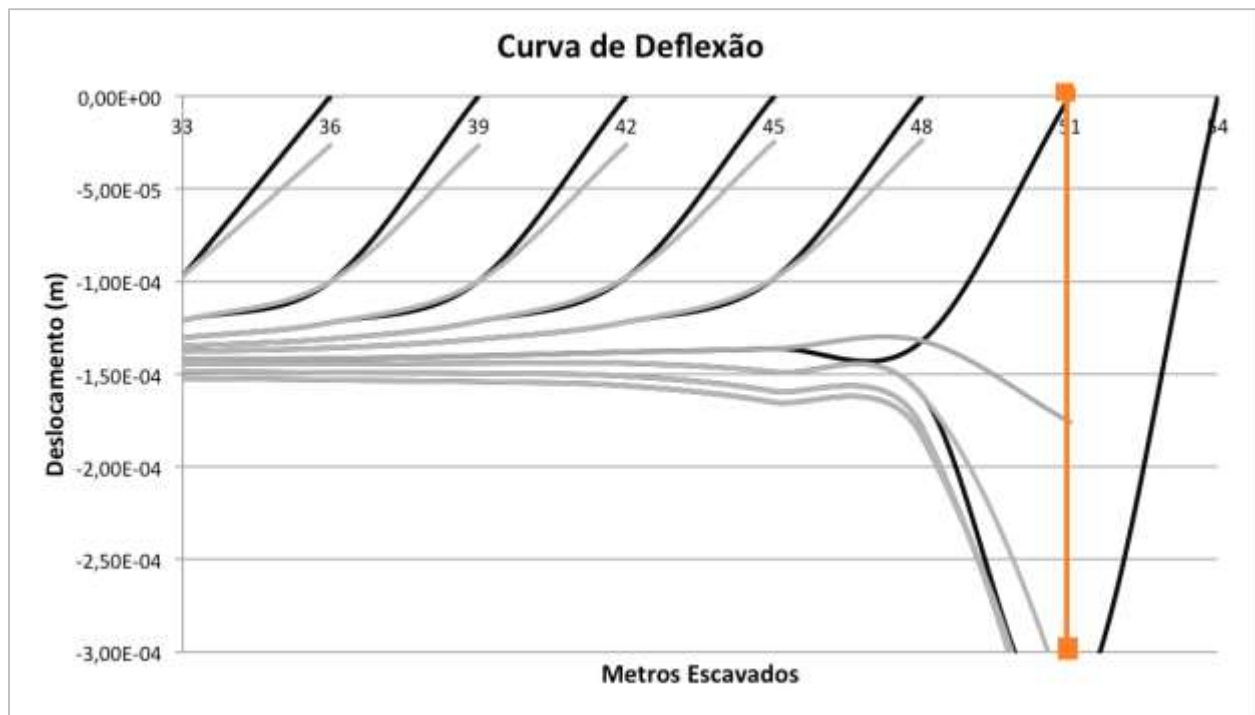


Figura 3.18 - Curva de Deflexão desprezando os deslocamentos anteriores à escavação do ponto para GD2.

Após a análise dos gráficos das duas simulações, conclui-se que o vetor de deslocamento se mostrou mais promissor para a previsão de mudança de comportamento do material. Além disso, vemos que os deslocamentos horizontais contribuem mais significativamente para esse propósito. Isso pode ser explicado pelo fato de que a mudança das propriedades ocorre na direção do eixo Z. Caso a região com propriedades diferentes estivesse localizada na direção do eixo X, por exemplo, os deslocamentos nesse eixo estariam mais sensíveis às mudanças, como reportado em OEGG (2014).

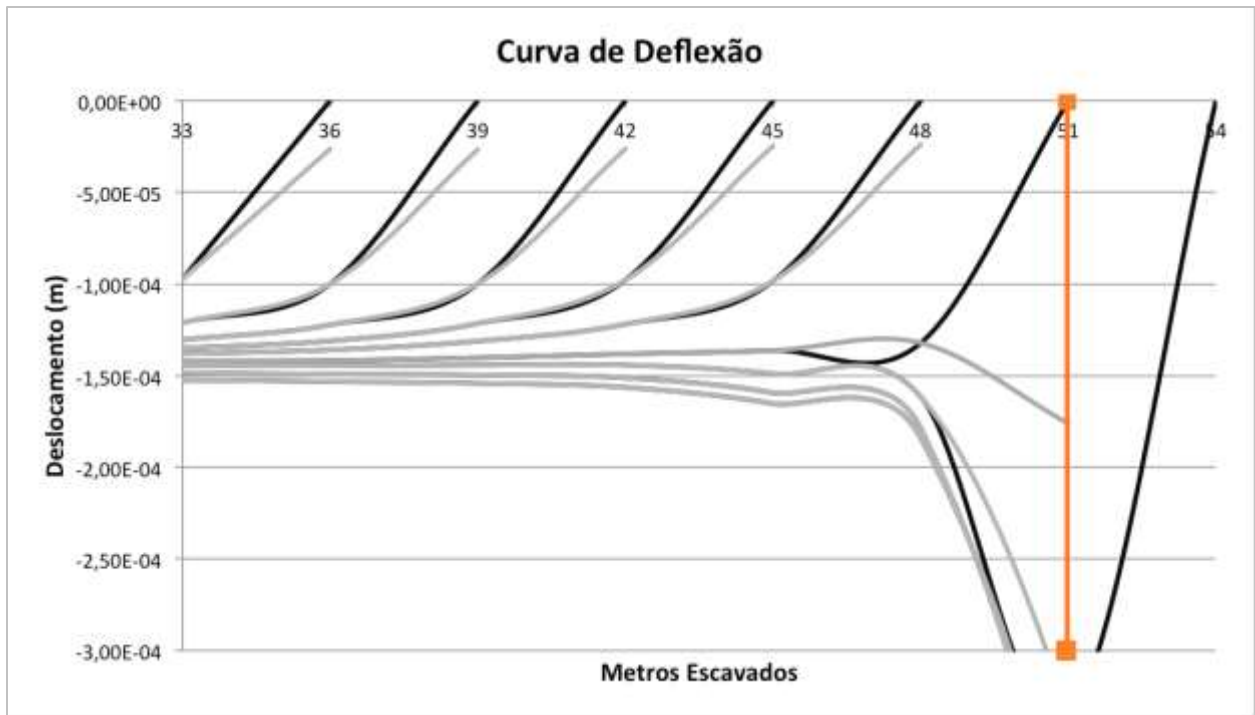


Figura 3.19 - Linha de Tendência para GD2.

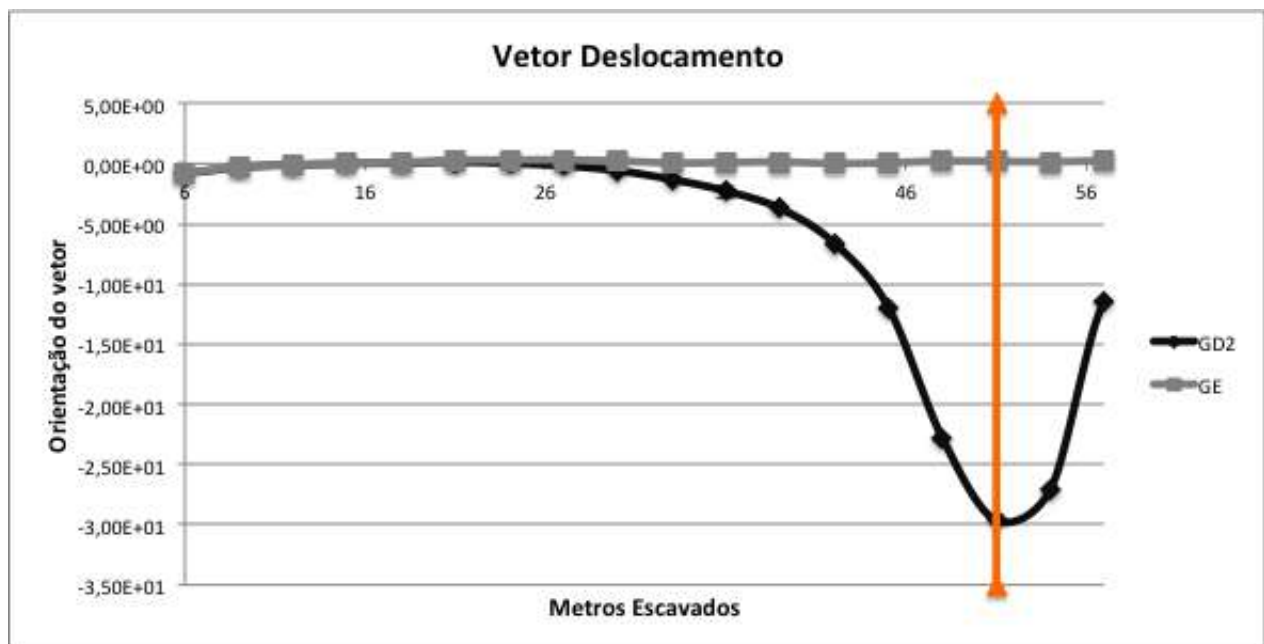


Figura 3.20 - Vetor deslocamento formado pelos deslocamentos vertical e horizontal no teto das seções transversais, a 3 m da face para GD2.

### 3.2.3 – ANÁLISE DO RISCO

Nesta seção, simula-se uma análise do risco, de maneira simples, com base no gráfico do vetor deslocamento das simulações numéricas das seções anteriores. Ressalta-se que, como a intenção desta análise é a exposição da metodologia, os valores utilizados para as tabelas de probabilidade são meramente ilustrativos, não se preocupando com a sua veracidade.

Assim que a escavação do trecho analisado começa, a árvore Bayesiana se encontra como na Fig. 3.21. Ela permanece assim, ao longo da escavação da geologia esperada, GE, e, conseqüentemente, o custo total permanece o mesmo. O nível de risco, nesse caso, permanece como Baixo.

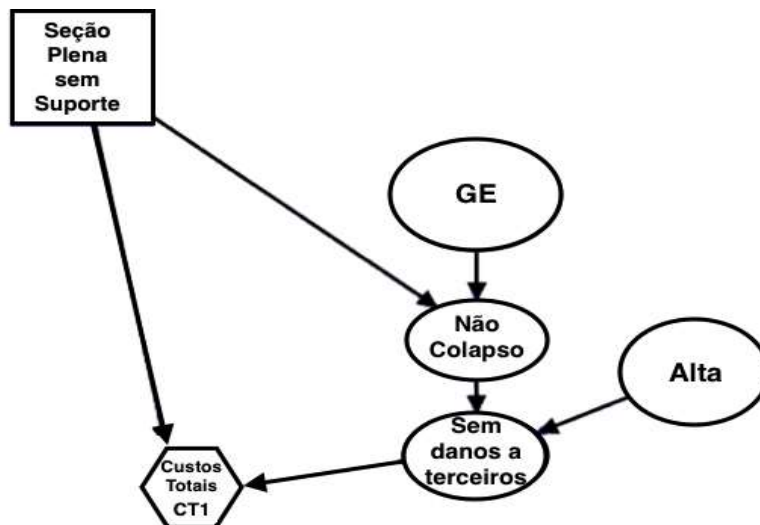


Figura 3.21 - Esquema de decisão com base em árvore bayesiana.

Após 41 m escavados, se o comportamento do vetor deslocamento é alterado como na Fig. 3.12, a probabilidade de danos a terceiros aumenta. No entanto, mesmo que essa probabilidade aumentasse para 50%, por exemplo, os deslocamentos ainda são pequenos e não haveria perigo à população. Assim, o risco passa a ser considerado como médio e tem-se um estado de alerta, ainda que não haja perigo de colapso. A mensagem enviada será de atenção, apontando a necessidade de acompanhamento constante da instrumentação porque há a possibilidade de mudança de material (Fig. 3.23).

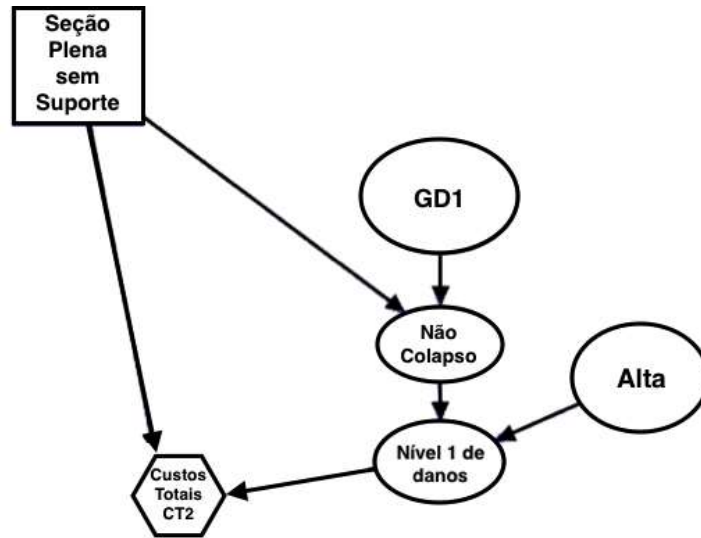


Figura 3.22 - Árvore Bayesiana após detectada mudança de geologia (GD1).



Figura 3.23 - Modelo de aplicativo, aviso de risco médio.

Se o engenheiro não tomar medidas de tratamento do risco, o risco será maior e a árvore Bayesiana será a da Figura 3.22. Supondo que o engenheiro mude a estratégia de construção, adotando um sistema de suporte, o risco volta a ser médio/baixo e a árvore Bayesiana será atualizada (Fig. 3.24).



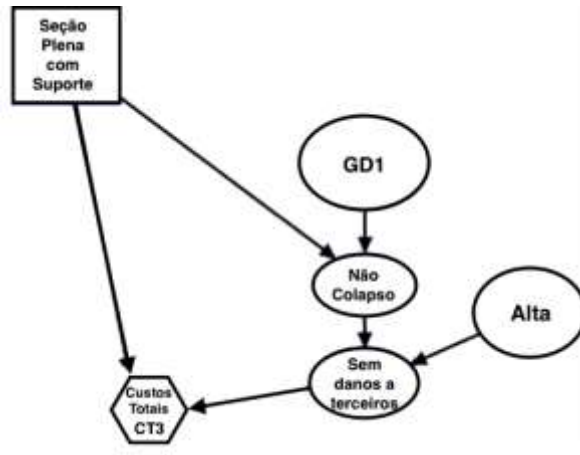


Figura 3.24 - Árvore Bayesiana após medidas de mitigação do risco.

Agora, supondo que o vetor deslocamento esteja se comportando como na Fig. 3.20. Aos 41 m escavados, o estado de atenção já foi atingido, o engenheiro já deve estar acompanhando constantemente os dados da instrumentação e preparado para a tomada de decisão, pois a condição geológica provável passa a ser GD2 e o risco de colapso aumenta. Caso o nível de ocupação da superfície seja alto, como considerado nessa análise, há risco de danos à população. Dessa forma, tem-se um estado de alerta de colapso iminente e a mensagem enviada será a de ação imediata necessária (Fig. 3.26) e a árvore Bayesiana estará como apresentada na Fig. 3.25.

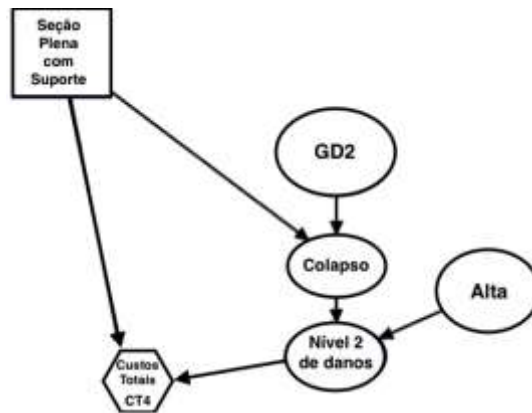


Figura 3.25 - Árvore Bayesiana após detectada mudança de geologia (GD2).

Adotando a nomenclatura da Tab. 3.7 para os diversos custos, a cada nova geologia encontrada, a melhor decisão minimizaria os custos totais. Para essa otimização da decisão, seria necessário a realização de todos os cálculos da Tab. 3.8, para se encontrar o menor valor de custos totais. No entanto, é inviável o cálculo da Tab. 3.8 para as diversas estratégias de construção existentes, assim

como seria inviável calcular os custos de construção e dos danos com base em todas as variáveis possíveis. Além disso, o próprio modo de ruptura contém incertezas, uma vez que os parâmetros geológicos também têm sua certeza condicionada à própria limitação do nosso conhecimento geotécnico. É em todas essas incertezas e infinitas possibilidades que atua a experiência do engenheiro projetista, que pode ser otimizada por meio dos sistemas especialistas.

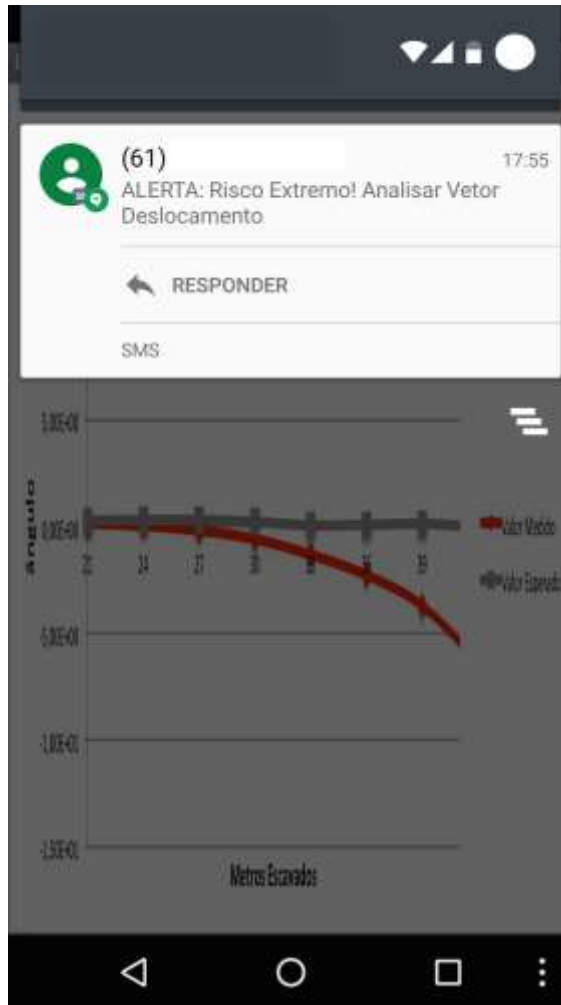


Figura 3.26 - Modelo de aplicativo, aviso de risco extremo

Tabela 3.7 - Nomenclatura dos custos.

	GE sem suporte	GE com suporte	GD1 sem suporte	GD1 com suporte	GD2 sem suporte	GD2 com suporte
Custo de Construção	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6
Custo sem danos a terceiros	U1	U1	U4	U7	U10	U13
Custo com nível 1 de danos	U2	-	U5	U8	U11	U14
Custo com nível 2 de danos	U3	-	U6	U9	U12	U15

Tabela 3.8 – Conjunto de cálculos a serem realizados quando há mudança nas variáveis da árvore Bayesiana.

		<b>Colapso</b>	<b>Não Colapso</b>
<b>GE</b>	<b>Sem Suporte</b> (Custo Total X1)	$CC1 + 0,02x0,05xU1$	$CC1 + 0,95x1xU1$
		$CC1 + 0,18x0,05xU2$	
		$CC1 + 0,8x0,05xU3$	
	<b>Com Suporte</b> (Custo Total X2)	-	$CC2 + 1x1xU1$
<b>GD1</b>	<b>Sem Suporte</b> (Custo total Y1)	$CC3 + 0,02x0,15xU4$	$CC3 + 0,85x1xU4$
		$CC3 + 0,18x0,15xU5$	
		$CC3 + 0,8x0,15xU6$	
	<b>Com Suporte</b> (Custo Total Y2)	$CC4 + 0,02x0,05xU7$	$CC4 + 0,95x1xU7$
		$CC4 + 0,18x0,05xU8$	
		$CC4 + 0,8x0,05xU9$	
<b>GD2</b>	<b>Sem Suporte</b> (Custo Total Z1)	$CC5 + 0,02x1xU10$	-
		$CC5 + 0,18x1xU11$	
		$CC5 + 0,8x1xU12$	
	<b>Com Suporte</b> (Custo Total Z2)	$CC6 + 0,02x0,35xU13$	$CC6 + 0,65x1xU13$
		$CC6 + 0,18x0,35xU14$	
		$CC6 + 0,8x0,35xU15$	

## 4 – CONCLUSÕES

Após a aplicação de cada etapa do gerenciamento de risco, como exposto na NBR ISO 31000 (ABNT, 2009), conclui-se que o controle dos riscos em projetos de túneis é cada vez mais viável devido aos avanços tecnológicos: a identificação de mudanças de comportamento se tornou mais eficaz com as novas tecnologias de instrumentação, gerenciamento e transmissão dos dados coletados durante a escavação; a análise de risco, por sua vez, é viável devido ao cálculo computacional das probabilidades; e a comunicação dos riscos e planos de ação é possível devido às novas tecnologias de informação.

Dentre as conclusões a que pode-se chegar com este trabalho, destacam-se as seguintes:

- a escolha dos parâmetros a serem utilizados como indicadores de risco é de extrema importância para o sucesso do gerenciamento do risco. O vetor deslocamento tem se mostrado efetivo para identificação da mudança na rigidez do material à frente da escavação no caso de escavações em rocha.
- para a administração das variáveis envolvidas na análise de risco durante a construção do túnel, a árvore Bayesiana se mostrou eficaz, por ser capaz de englobar as complexidades e relações de dependência das mesmas.
- A tomada de decisão na mitigação dos riscos pode ser otimizada por meio de sistemas especialistas e tecnologias como a BIM 5D, que permitem a integração entre os elementos do projeto.

Ainda que a análise de risco em obras subterrâneas tenha evoluído consideravelmente na última década, esse é um tópico que ainda precisa ser bastante desenvolvido. É imprescindível que os projetos de túneis incorporem essas novas tecnologias para melhor atenderem as demandas da população e empresas envolvidas. Isso porque o melhor controle dos riscos viabiliza a opção de uso do espaço subterrâneo, permitindo maior controle sobre o orçamento, aumento da aceitação desse tipo de solução pelo público, e o desenvolvimento das seguradoras que, por sua vez, contribuem para as vantagens anteriores.

O objetivo deste trabalho será atingido se o mesmo contribuir para o enriquecimento da discussão sobre a inclusão dos avanços tecnológicos na análise de risco de projetos de túneis. Espera-se, dessa forma, divulgar a adoção desse tipo de projeto como solução de engenharia no Brasil.

Como esta dissertação procurou expor o maior número de informações possíveis sobre o tema, o conteúdo apresentado, ainda que descrito de forma completa para seu entendimento, não descreve de maneira extensa e aprofundada os métodos e conceitos abordados. Recomenda-se, então, pesquisas futuras, principalmente nos seguintes tópicos:

- aplicação do conceitos e métodos de gestão de risco, principalmente dos parâmetros de acompanhamento de comportamento e análise probabilística do risco, descritos no trabalho, para um caso real.
- avaliação dos parâmetros de acompanhamento para o caso de solos tropicais.
- criação de um banco de dados global de projetos de túneis, que seja confiável e que, ao mesmo tempo, possa ser constantemente atualizado.
- exploração de métodos para se avaliar as consequências do risco, valendo-se da análise probabilística, e precificação dessas consequências.
- exploração das vantagens e limitações do monitoramento colaborativo por meio das novas mídias sociais.
- entendimento de cada elemento e da rede que conecta esses elementos para o funcionamento da tecnologia BIM 5D para túneis.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- ABNT (2009) NBR ISO 31000. Gestão de riscos — Princípios e diretrizes, Rio de Janeiro, Brasil, 24 p.
- AMBERG, F. (2016). Instrumentation Installation. Monitoring & Control in Tunneling, Training Session, World Tunnel Congress 2016 (WTC 2016), São Francisco, CA.
- ASSIS, A. (2016); Role of Monitoring on Risk Management. Monitoring & Control in Tunneling, Training Session, World Tunnel Congress 2016 (WTC 2016), São Francisco, CA.
- BAECHER, G. B. & CHRISTIAN, J. T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, 605 p.
- BARLOW, J. P. (1986). Interpretation of Tunnel Convergence Measurements. The University of Alberta, Master's Thesis, Alberta, Canadá.
- BARR, A., FEIGENBAUM, E. (1981). The Handbook of Artificial Intelligence. Los Altos, Califórnia: William Kaufmann Inc., 1981. V.I-II.
- BARRETO, L., PREZOTO, M. (2010). Introdução a Sistemas Especialistas. Trabalho de Pós-Graduação, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP.
- BELODEDENKO, S.V., & BILICHENKO, G.N. (2015). Quantitative risk-analysis methods and mechanical systems safety. Metallurgical and Mining Industry, 12: 272-279.
- BLANCO, S.B.; 1995. Aspectos de Geologia de Engenharia da Escavação do Metrô de Brasília - Trecho Asa Sul. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 019/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95 p.
- BRIERLEY, G. S. (2016). Tunneling - A Historical Perspective. Tunnel Business Magazine, Special Commemorative Issue, USA Tunneling, pp. 17 – 32.
- BROWN, E. T. (2012); Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 4(3): 193-204.
- CAI, J. G.; ZHAO, H. Y. B. J. & FENG, X. T. (2000). Rock engineering system approach in tunneling and underground excavation. Tunnels and Underground Structures: Proceedings Tunnels & Underground Structures, Singapore, pp. 343.
- GROBAUER, K. & LENZ, G. (2007). Is it Possible to Automate the Interpretation of Displacement Monitoring Data? FELSBAU 25, 5: 99-106.
- GROSSAUER, K. & SCHUBERT, W. (2007). Methods for the evaluation and interpretation of displacement monitoring data in tunneling. Rock Mechanics - Meeting Society's Challenges and Demands, pp. 1149-1156.

- GROSSAUER, K., SCHUBERT, W. & LENZ, G. (2008). Automatic displacement monitoring data interpretation – the next step towards an expert system for tunneling. Proceedings of the 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium and the 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, São Francisco, CA.
- GROSSAUER, K., SCHUBERT, W. & SELNER, P. (2005). The Importance of Displacement Prediction. *Underground Space Use - Analysis of the past and lessons for the future*, 2: 1239-1244.
- GRØV, E. (2016). Contractual Roles and Responsibilities: What Entity has Responsibility. Monitoring & Control in Tunneling, Training Session, World Tunnel Congress 2016 (WTC 2016), São Francisco, CA.
- HOEK, E. (1991). When is a design in rock engineering acceptable? Proceedings of the 7th International Congress on Rock Mechanics, 3: 1485-1497.
- HOWE, J. (2008). *Crowdsourcing: How the power of the crowd is driving the future of business*. Random House.
- ICCM. International Conference on Crisis Mapping. Disponível em: <http://www.attendiccm.com/what-is-crisis-mapping/>. Data de acesso: 23/03/2016.
- ICOLD. The World Register of Dams (WRD). , International Commission on Large Dams. Disponível em: [http://www.icold-cigb.net/GB/World\\_register/world\\_register.asp](http://www.icold-cigb.net/GB/World_register/world_register.asp). Data de acesso: 24/01/2016.
- ITA (2011). *Monitoring and Control in Tunnel Construction*. International Tunneling and Underground Space Association. ITA Working Group No. 2 Report n°009, Suíça, 23 p.
- LAI, J., QIU J., FENG Z., CHEN J. & FAN, H. (2016). Prediction of Soil Deformation in Tunneling Using Artificial Neural Networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2016:6708183. doi:10.1155/2016/6708183.
- LEONOVA, M. (2014). Laser Scanning vs. Photogrammetry. Disponível em: <http://lanmarservices.com/2014/11/07/laser-scanning-vs-photogrammetry/>. Data de acesso: 23/03/2016.
- LUNARDI, P. (2008). *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media.
- MICROMAPPERS; Digital Disaster Response. <https://micromappers.wordpress.com/about-info/>. Data de acesso: 20/07/2016.
- OEGG (2014). *Geotechnical Monitoring in Conventional Tunneling Handbook*. Austrian Society for Geomechanics, 90 p.

- PEARSON, L. (2012). Early warning of disasters: Facts and figures. Sci Dev Net. Disponível em <http://www.scidev.net/global/communication/feature/early-warning-of-disasters-facts-and-figures-1.html>. Data de acesso: 20/08/2015.
- PERAZELLI, P., ROTONDA, T., BOLDINI, D., AJMONE-CAT, A. M. & GIANVECCHIO, P. M. (2011). Analysis of Convergence Data and 3D Numerical Modelling of Tunnels Excavated in Fine-Grained Soils. Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Roma, 8p.
- PLAXIS 3D TUNNEL. Introductory Version Tutorial Manual. Disponível em: [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl). Data de acesso: 20/08/2015.
- PLAXIS 3D TUNNEL. Material Models Manual Version 2. Disponível em: [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl). Data de acesso: 20/08/2015.
- RABENSTEINER, K. (2016). Types of Instruments, Data Collection, Information Management. Monitoring & Control in Tunneling, Training Session, World Tunnel Congress 2016 (WTC 2016), São Francisco, CA.
- REIS, T.; Gráfico de Gantt: como e por que utilizá-lo para gerenciar projetos? Disponível em: <http://www.projectbuilder.com.br/blog-pb/entry/conhecimentos/grafico-de-gantt-como-e-por-que-utiliza-lo-para-gerenciar-projetos>. Data de acesso: 03/07/2016.
- RIAZ, A. (2015). Tunnel Convergence Monitoring – From Concept to Implementation. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/281113987\\_Tunnel\\_Convergence\\_Monitoring\\_-\\_From\\_Concept\\_to\\_Implementation](https://www.researchgate.net/publication/281113987_Tunnel_Convergence_Monitoring_-_From_Concept_to_Implementation). Data de acesso: 23/03/2016.
- ROXO, M. C. J. (2003). Tunnels as a Sustainable Environmental Solution – A Case Study. Reclaiming the Underground Space (2 Volume Set): Proceedings of the ITA World Tunneling Congress, Amsterdam, 1212 p.
- SELLNER, P. J., GROSSAUER, K. & SCHUBERT, W. (2002). Advanced Analysis and Prediction of Displacements and System Behavior in Tunneling. International Symposium-EUROCK 2002. International Society for Rock Mechanics, Madeira, Portugal.
- SCHUBERT, W. (2011). Risk oriented design and construction of tunnels. Anais do 12º Congresso Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM), Pequim, China.
- SCHUBERT, W. & GROSSAUER, K. (2004); Evaluation and Interpretation of Displacements in Tunnels. 14th International Conference on Engineering Surveying, Zurique, Suíça.
- SCHUBERT, W., GROSSAUER, K. & BUTTON, E. A. (2004). Interpretation of Displacement Monitoring Data for Tunnels in Heterogeneous Rock Mass. Institute for Rock Mechanics and Tunneling, Graz University of Technology, Áustria, p.
- SCHUBERT, W., STEINDORFER, A. & BUTTON, E. A. (2002); Displacement Monitoring in Tunnels – an Overview. FELSBAU, 20(2): 7-5.



- SELLNER, P. J., GROSSAUER, K. & SCHUBERT, W. (2002). Advanced Analysis and Prediction of Displacements and System Behavior in Tunneling. ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions, pp. 539 – 546.
- SOUZA, R. L. (2010). Risk Analysis for Tunneling Projects. Tese de doutorado, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Cambridge.
- SOUSA, Rita L., & EINSTEIN, H. H. (2012). Risk Analysis During Tunnel Construction Using Bayesian Networks: Porto Metro Case Study. *Tunneling and Underground Space Technology* 27 (1): 86-100.
- ŠPAČKOVÁ, O. (2012). Risk management of tunnel construction projects. Tese de doutorado, Czech Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanics, Praga.
- SULEM, J., PANET, M. & GUENOT, A. (1987). Closure Analysis in Deep Tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4(3): 145-154.
- TÉCHNE (2008). As causas do acidente da Estação Pinheiros da Linha 4 do Metrô de São Paulo. *Revista Técnica*, Edição 138, pp.
- THE 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF CRISIS MAPPERS (2016); What is Crisis Mapping? <http://www.attendiccm.com/what-is-crisis-mapping/>. Data de acesso: 20/07/2016.
- TUNNELS AND TUNNELLING (2014). RIO Realised. *Tunnels and Tunnelling International*. September 2014 issue, pp. 27.
- UN, UNITED NATIONS (2016). Urban Population (% of Total). *World Urbanization Prospects, United Nations Population Division*. Disponível em: <http://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2015&start=1960>. Data de acesso: 08/09/2015
- WANNICK, H. (2006). The Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works Future Tunnelling Insurance from the Insurers, Point of View (Presentation). ITA Conference Seoul.
- WONG, K. L. & CHAN, H. H. (2015). Catalogue of Notable Tunnel Failure Case Histories. Mainland East Division, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Disponível em: <http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo/doc/HK%20NotableTunnel%20Cat.pdf>. Data de acesso: 13/10/2015.
- YAN, J. (2016). Monitoring Methods and Layout in Mechanized Tunnelling. Monitoring & Control in Tunnelling, Training Session, World Tunnel Congress 2016 (WTC 2016), São Francisco, CA.
- ŽIBERT, M., KENISTON, S., KARLOVŠEK, J. (2016); Tunnel Information Modelling in Most Recent Form - Applying BIM Technologies and Procedures in Tunnelling Environment,

Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2016 (WTC 2016), San Francisco, CA.