UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A INCORPORAÇÃO DE INCERTEZAS DE
NATUREZA GEOLÓGICA NO PROJETO E
CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS URBANOS - PROPOSTA
METODOLÓGICA BASEADA NA TEORIA DA
DECISÃO**

Adalberto Aurélio Azevedo

Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2002

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

A INCORPORAÇÃO DE INCERTEZAS DE NATUREZA GEOLÓGICA
NO PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS URBANOS –
PROPOSTA METODOLÓGICA BASEADA NA TEORIA DA DECISÃO

ADALBERTO AURÉLIO AZEVEDO

Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Fabio Taioli
Examinadores:	Prof. Dr. Celso Santos Carvalho
	Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto
	Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino
	Dr. Wilson Shoji Iyomasa

SÃO PAULO
2002

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A INCORPORAÇÃO DE INCERTEZAS DE NATUREZA GEOLÓGICA NO PROJETO
E CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS URBANOS – PROPOSTA METODOLÓGICA
BASEADA NA TEORIA DA DECISÃO**

Adalberto Aurélio Azevedo

Orientador: Prof. Dr. Fábio Taioli

TESE DE DOUTORAMENTO

DEDALUS - Acervo - IGC

30900011116

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2002

T
A994
AA.2
e.2

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto
de Geociências da Universidade de São Paulo

Azevedo, Adalberto Aurélio

A incorporação de incertezas de natureza
geológica no projeto e construção de túneis
urbanos : proposta metodológica baseada na teoria
da decisão / Adalberto Aurélio Azevedo - São
Paulo, 2002.

xviii, 181 p. : il.

=

Tese (Doutorado) : -

Orient. : Taioli, Fábio

1. Geologia de engenharia 2. Túneis urbanos 3.
Teoria da decisão I. Título

DOAÇÃO	Seção de
Pós-Graduação, IGC/USP	
Data: 20 / 09 / 02	

Aos meus pais,
e à
Ione, Marco,
Fe e Daniel

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT, pelo apoio para a realização desta pesquisa;

Ao Prof. Dr. Fábio Taioli, pela amizade, discussões e orientação competente;

À Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO, na pessoa do seu Diretor de Engenharia, Eng. Mário Akira Takikawa, por permitir a utilização das informações relativas aos estudos da Linha 4, bem como a divulgação dos resultados desta pesquisa;

Ao geólogo Hugo Cássio da Rocha, do METRO de São Paulo, pela amizade e colaboração fundamental no desenvolvimento desta pesquisa, atuando como avaliador;

À Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo – CET, em especial aos engenheiros Ricardo Laísa e Vicente Petrocelli, pela atenção e apoio na simulação de condições especiais de interrupção de tráfego em avenidas da cidade de São Paulo;

Ao consultor Eng. Pedro Szasz, pelas orientações no cálculo dos prejuízos decorrentes da interrupção do trânsito em ruas e avenidas de São Paulo;

Aos colegas do IPT, Celso S. Carvalho pelas discussões e Abraham Yu Su, pelas conversas e incentivo iniciais;

Aos colegas geólogo Naohiko Nagata, estatística Lúcia de Fátima Silveira Dozzi, estagiária Cyntia Mayumi Goto pela colaboração no desenvolvimento e implantação do sistema de informações geográficas para as simulações e análises de risco;

À colega geóloga Alessandra G. Siqueira pela amizade e pela inestimável colaboração na elaboração desta tese;

Aos técnicos Aroldo R. da Silva, Sebastião J. O. Carvalho, Osvaldir C. G. Marques, Sebastião M. de Almeida e Luís M. Fernandes e a todos os que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse realizado;

À minha família, pela paciência das longas horas de ausência.

SUMÁRIO

Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Lista de Figura	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Quadros	xii
Lista de Fotografias	xiv
Lista de Siglas	xv
Resumo	xvi
Abstract	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	8
2 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO - GEOTÉCNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS	9
3 IDENTIFICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E HIERARQUIZAÇÃO DO NÍVEL DE RISCO AO LONGO DA ROTA DO TÚNEL	20
3.1 O Túnel da Linha 4 (Amarela) da Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRO) - Generalidades	22
3.2 Características Litológicas e Estruturais do Maciço Rochoso	25
3.2.1 Condicionantes geológicos da estabilidade do maciço rochoso	32
3.2.2 Incertezas relacionadas aos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço	35
3.3 Susceptibilidade do Maciço Rochoso em Deflagrar os Processos Geradores de Risco	50
3.4 Caracterização da Ocupação Urbana em Superfície	63
3.5 Zoneamento de Risco ao Longo da Rota do Túnel	67
4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO DE DECISÃO	71
4.1 Definição da Necessidade de Investigações Complementares	73
4.2 Definição dos Métodos Construtivos	82
4.3 Processos Geradores de Risco e Conseqüências Potenciais	86
4.3.1 Procedimentos para o cálculo das conseqüências potenciais	91

4.4	Árvore de Decisão	109
4.5	Critério de Decisão	121
4.5.1	Condição de Análise 1 - "Não Executar Investigações Adicionais"	122
4.5.2	Condição de Análise 2 - "Investigações Executadas a Partir da Superfície. Maciço mais Homogêneo que o Esperado"	123
4.5.3	Condição de Análise 3 - "Investigações Executadas a Partir da Superfície Maciço mais Heterogêneo que o Esperado"	125
4.5.4	Condição de Análise 4 - "Investigações Executadas a Partir da Frente de Escavação"	127
5	TEORIA DA DECISÃO E PROBABILIDADE SUBJETIVA	130
5.1	Avaliação de Probabilidades Subjetivas - Codificação de Probabilidades	137
6	APLICAÇÃO DO MODELO DE DECISÃO	141
6.1	Definição e Caracterização da Área para Aplicação do Modelo de Decisão	142
6.2	Caracterização do Avaliador	143
6.3	Procedimento de Análise	145
6.3.1	Avaliação das probabilidades dos eventos aleatórios utilizando o método direto	145
6.3.2	Avaliação de probabilidades pelo método de "codificação de probabilidades"	148
6.3.3	Cálculo do valor monetário esperado das conseqüências	158
6.3.4	Cálculo do valor monetário esperado do metro linear de construção	161
7	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	165
7.1	Procedimentos para a Tomada de Decisão	167
8	CONCLUSÕES	171
9	BIBLIOGRAFIA	174

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Possibilidades dos estudos geológico-geotécnicos de influenciar os custos de um projeto (RUIZ, 1983).	5
FIGURA 2 - Fluxograma do processo de investigações geológico-geotécnicas de maciços	12
FIGURA 3 - Procedimento metodológico adotado no tratamento e análise dos atributos para hierarquização e zoneamento de risco da área nos entornos do traçado do túnel	23
FIGURA 4 - Planta de localização do traçado do túnel (modificado de IPT, 1998a)	24
FIGURA 5 - Contorno estrutural do topo rochoso	34
FIGURA 6 - Compartimentação geológica do maciço rochoso (modificado de IPT, 1998a)	36
FIGURA 7 - Seção geológica longitudinal ao longo da rota do túnel (modificado de IPT, 1998a)	37
FIGURA 8 - Compartimentação geológica do maciço rochoso. Direção do túnel subparalela à direção da foliação	40
FIGURA 9 - Compartimentação geológica do maciço rochoso. Direção do túnel ortogonal a oblíqua à direção da foliação	40
FIGURA 10 - Seção geológica pela passagem subterrânea Euryclides de Jesus Zerbini (modificado de IPT, 1998b)	42
FIGURA 11 - Gnaiss milonítico granítico. Histograma das espessuras dos corpos rochosos	43
FIGURA 12 - Gnaiss milonítico biotítico. Histograma das espessuras dos corpos rochosos	44
FIGURA 13 - Gnaiss milonítico bandado. Histograma das espessuras das intercalações graníticas	44
FIGURA 14 - Gnaiss milonítico bandado. Histograma das espessuras das intercalações biotíticas	45
FIGURA 15 - Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência dos condicionantes geológicos denominados "diferentes litotipos em diferentes porções da seção do túnel" e "faixas rochosas biotíticas contínuas, subverticais, paralelas à direção do túnel"	55

FIGURA 16 - Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico denominado "faixas rochosas biotíticas contínuas, subverticais, subortogonais à direção do túnel"	56
FIGURA 17 - Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência dos condicionantes geológicos denominados "matacões de rocha" e "faixas rochosas biotíticas contínuas, subhorizontais"	57
FIGURA 18 - Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico denominado "juntas de alívio de tensão subhorizontais"	58
FIGURA 19 - Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico denominado "estruturas de direção NNW/SSE, subparalelas à direção do túnel"	59
FIGURA 20 - Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico denominado "estruturas de direção NNW/SSE, subortogonais à direção do túnel"	60
FIGURA 21 - Susceptibilidade do maciço rochoso em deflagrar os processos geradores de risco	62
FIGURA 22 - Conseqüências potenciais em superfície	68
FIGURA 23 - Zoneamento de risco ao longo da rota do túnel	70
FIGURA 24 - Comprimento total de sondagens perfurado em relação ao comprimento do túnel, conforme levantamento do USNC/TT, 1984 (modificado de PARKER, 1997)	75
FIGURA 25 - Custo total das investigações em relação aos custos básicos da construção do túnel previsto em projeto, conforme levantamento efetuado pelo USNC/TT em 1984 (modificado de PARKER, 1997)	75
FIGURA 26 - Qualidade das investigações. Relação entre densidade de amostragem e geometria das sondagens	78
FIGURA 27 - Qualidade das investigações em função da susceptibilidade do maciço rochoso em desenvolver os processos geradores de risco	79
FIGURA 28 - Qualidade das investigações em função do risco	80
FIGURA 29 - Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pelo número de veículos/hora, em condições normais (os números indicam a quantidade de veículos/hora nas vias. As cores e as espessuras das linhas indicam o estado de criticidade da via)	102
FIGURA 30 - Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pela relação número de veículos/capacidade da via, em condições normais.	103

FIGURA 31 - Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pela relação número de veículos/capacidade da via, após interrupção total das duas pistas da marginal do rio Pinheiros, no sentido bairro-centro, condição “dia seguinte”	104
FIGURA 32 - Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pela relação número de veículos/capacidade da via, após interrupção total das duas pistas da marginal do rio Pinheiros, sentido bairro-centro, condição de equilíbrio (os números indicam a relação veículos/capacidade da via.	105
FIGURA 33 - Prejuízos adicionais diários e acumulados devido à interrupção da pista local, sentido bairro-centro, da avenida marginal do rio Pinheiros.	107
FIGURA 34 - Prejuízos adicionais diários e acumulados devido à interrupção da pista expressa, sentido bairro-centro, da avenida marginal do rio Pinheiros.	107
FIGURA 35 - Prejuízos adicionais diários e acumulados devido à interrupção das pistas local e expressa, sentido bairro-centro, da avenida marginal do rio Pinheiros.	108
FIGURA 36 - Diagrama de Fluxo de Decisão	109
FIGURA 37 - Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 1 - “Não executar investigações adicionais”	116
FIGURA 38 - Diagrama de fluxo de decisão quando a decisão é “Executar investigações adicionais”	117
FIGURA 39 - Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 2 - “Investigações executadas a partir da superfície. Maciço mais homogêneo que o esperado”	118
FIGURA 40 - Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 3 – “Investigações executadas a partir da superfície. Maciço mais heterogêneo que o esperado”	119
FIGURA 41 - Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 4 - “Investigações executadas a partir da frente de escavação”	120
FIGURA 42 - Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco”. Processo construtivo - NATM	153
FIGURA 43 - Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória “número de dias de interrupção das escavações no interior do túnel”. Processo construtivo – NATM	153
FIGURA 44 - Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória “número de dias de interrupção do trânsito em superfície”. Processo construtivo - NATM	154
FIGURA 45 - Curva de correlação entre as variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco” e o “número de	

dias de interrupção das escavações no interior do túnel”. Processo construtivo NATM	154
FIGURA 46 - Curva de correlação entre as variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco” e o “número de dias de interrupção do trânsito em superfície”. Processo construtivo – NATM	155
FIGURA 47 - Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco”. Processo construtivo – TBM	155
FIGURA 48 - Curva de correlação entre as variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco” e o “número de dias de interrupção das escavações no interior do túnel”. Processo construtivo TBM	156
FIGURA 49 - Curva de correlação entre as variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco” e o “número de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel e do trânsito em superfície”. Processo construtivo – TBM	156
FIGURA 50 - Planta de delimitação dos sub-trechos para análise de decisão	169

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Índices físicos médios dos litotipos (modificado de IPT, 1998)	31
TABELA 2 - Parâmetros geomecânicos médios dos litotipos.....	31
TABELA 3 - Atributo "compartimentação geológico-estrutural do maciço". Pesos conferidos às variáveis do atributo	51
TABELA 4 - Atributo "susceptibilidade dos litotipos em desenvolver os condicionantes geológicos da estabilidade do maciço". Pesos conferidos às variáveis do atributo	52
TABELA 5 - Atributo "relação entre a direção da foliação e a direção do túnel". Pesos atribuído às variáveis do atributo.	53
TABELA 6 - Atributo "importância da atuação da água". Pesos atribuído às variáveis do atributo.	53
TABELA 7 - Atributo "uso e ocupação do solo em superfície". Pesos conferidos às variáveis do atributo.	67
TABELA 8 - Atributo "Intensidade do trânsito". Pesos conferidos às variáveis do atributo.	67
TABELA 9 - Atributo "densidade de amostragem". Pesos conferidos ao atributo	76
TABELA 10 - Atributo "geometria das sondagens". Pesos conferidos ao atributo	77
TABELA 11 - Processos que podem conduzir ao aumento significativo do custo de túneis, conforme levantamento do USNC/TT (modificado de PARKER, 1997	88
TABELA 12 - Eventos inesperados associados à escavação com "SHIELD" (modificado de ISAKSON <i>et al.</i> , 1999)	89
TABELA 13 - Classes de conseqüências definidas subjetivamente (ISAKSON <i>et al.</i> , 1999).	89
TABELA 14 - Conseqüências na superfície decorrentes de acidentes em túneis construídos em NATM (modificado de HSE, 1996, apud RIBEIRO NETO, 1999)	91
TABELA 15 - Prejuízos (deseconomias) anuais causados por congestionamentos de trânsito em dez cidades brasileiras (modificado de IPEA/ANTP, 1999)	99
TABELA 16 - Resultados da simulação relativa à interrupção do tráfego nas pistas da marginal do rio Pinheiros	100
TABELA 17 - Capacidade das vias de tráfego das avenidas sobre a rota do túnel (ZSAZS, 2000)	108
TABELA 18 - Probabilidades de ocorrência dos eventos aleatórios, estimadas de	

forma subjetiva com a utilização do método direto	147
TABELA 19 - Valores esperados das variáveis aleatórias e probabilidade de ocorrência dos eventos aleatórios, estimados de forma subjetiva, para o trecho em análise	157
TABELA 20 - Valores de produtos e serviços utilizados para o cálculo do valor esperado das consequências	158
TABELA 21 - Valores estimados do metro de escavação do túnel, segundo os diferentes métodos construtivos	159
TABELA 22 - Valor monetário estimado das consequências para o trecho analisado	160
TABELA 23 - Valor monetário estimado das consequências para o trecho analisado, segundo os diferentes processos geradores de risco, para as diferentes condições de análise	162
TABELA 24 - Valor monetário total esperado da construção do túnel no trecho analisado, segundo as diferentes alternativas para redução do risco	163
TABELA 25 - Valor monetário esperado do metro linear de construção do túnel, segundo as diferentes alternativas para redução do risco	164
TABELA 26 - Valor monetário total esperado da construção do túnel no trecho analisado, segundo as diferentes alternativas para redução do risco, considerando -se apenas as consequências no interior do túnel	168

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Condicionantes geológicos e possíveis processos geradores de risco associados	47
QUADRO 2 - Probabilidade qualitativa relativa de ocorrência dos condicionantes geológicos em função do tipo de maciço. Foliação subparalela à direção de desenvolvimento do túnel.	48
QUADRO 3 - Probabilidade qualitativa relativa de ocorrência dos condicionantes geológicos em função do tipo de maciço. Foliação subortogonal a inclinada à direção de desenvolvimento do túnel.	49
QUADRO 4 - Caracterização da ocupação urbana na superfície nos entornos da área de desenvolvimento do túnel	65
QUADRO 5 - Técnicas de Avaliação Subjetiva Individual (modificado de ROBERDS, 1990)	136

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTO 1 - Variedades litológicas típicas presentes no maciço rochoso (IPT, 1997)	27
FOTO 2 - Variedade litológica “gnaisse milonítico granítico”, de coloração cinza médio, fortemente milonitizado, foliação subvertical (IPT, 1997).	28
FOTO 3 - Variedade litológica “gnaisse milonítico granítico”, de coloração cinza claro, foliação difusa, inclinada (IPT, 1997)	28
FOTO 4 - Variedade litológica “gnaisse milonítico biotítico”, de coloração cinza escuro a preto, foliação subvertical (IPT, 1997)	29
FOTO 5 - Variedade litológica “gnaisse milonítico biotítico”, de coloração cinza escuro a preto, foliação inclinada (IPT, 1997)	30
FOTO 6 - Variedade litológica “gnaisse milonítico granítico”, de coloração cinza claro, foliação inclinada, fortemente milonitizado (IPT, 1997)	32
FOTO 7 - Aspecto típico do maciço gnáissico milonítico granítico (SM-6707)	38
FOTO 8 - Aspecto típico do maciço gnáissico milonítico biotítico (SM-6527)	38
FOTO 9 - Aspecto típico do maciço gnáissico milonítico bandado (SM-6529)	39
FOTO 10 - Equipamento EPB <i>shield</i> , de 9,67 m de diâmetro, utilizado na construção de túnel ferroviário na Holanda	84
FOTO 11 - Equipamento EPB/TBM, de face mista, com 6,17 m de diâmetro, utilizado na abertura dos túneis do Metro de Singapura	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFGB - Comitê Francês de Grandes Barragens
ANTP - Associação Nacional dos Transportes Públicos
CET - Companhia de Engenharia de Tráfego
CPTM - Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
EPB - Earth Pressure Balanced
NATM - New Austrian Tunneling Method
MERCOSUL - Mercado Comum do Cone Sul
SIG - Sistema de Informações Geográficas
USNC/TT - United States National Committee on Tunnel and Tunneling
TBM - Tunnel Boring Machine
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

RESUMO

Acidentes em obras de engenharia são freqüentemente atribuídos a “imprevistos ou surpresas geológicas”. Tal denominação denota um desconhecimento relativo da geologia dos maciços rochosos nos quais estas obras são implantadas. Este desconhecimento traduz o quadro de incertezas que permeia o ambiente geológico, responsável por inúmeros insucessos em obras de engenharia. Em vista das dificuldades que o meio técnico encontra para equacionar o problema o estudo propõe a incorporação destas incertezas ao projeto e construção de túneis em áreas urbanas, através da análise de decisão. A metodologia e o modelo de decisão propostos envolveram uma estratégia para redução do risco, apoiada em dois princípios básicos: reduzir as incertezas através da obtenção de um maior número de informações geológicas do maciço ou limitar o impacto das incertezas no desempenho técnico e econômico do projeto, adotando-se alternativas de construção que, em princípio, podem parecer mais caras. A aplicação do modelo de decisão exige a estimativa de probabilidades da ocorrência de eventos aleatórios, que são tratadas segundo os princípios da Teoria das Probabilidades, em sua visão subjetiva. A proposta metodológica desenvolvida foi aplicada na região das marginais do rio Pinheiros, correspondente a um subtrecho do túnel da Linha 4 – Amarela, da Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO, atualmente em processo de licitação. O trecho analisado foi caracterizado como de alto risco nas análises efetuadas, e os resultados obtidos demonstraram que o modelo de decisão adotado foi capaz de diferenciar a melhor alternativa para redução do risco bem como indicar o método de escavação do túnel que, frente ao critério de risco inicialmente estabelecido, fosse o mais econômico.

ABSTRACT

Failures in engineering works are always attributed to geological uncertainty. These facts denote that there is a significant lack of knowledge of the rock mass behavior where the works are developed. This lack of knowledge reflects the uncertainty associated to the geological environment, and responsible for several accidents in civil works. Aiming at solving that problem, this thesis proposes to incorporate these uncertainties in the design and construction of tunnels in urban areas, using decision theory. The methodology and decision model suggested evolves a risk reduction strategy based on two basic principles: 1) to reduce the uncertainty through the addition of more geologic information (obtained by more investigation) and 2) to limit the impact of the uncertainty in the technical and economical performance of the design, adopting construction alternatives that, initially, may appear more expensive. The application of the decision model implies the estimation of the probabilities that aleatory events may occur, which are analyzed according the Probability Theory in its subjective approach. The methodology here proposed was applied in the region of the marginal Rio Pinheiros avenue, corresponding to a portion of the Line 4 – Yellow, of the Metropolitano de São Paulo – METRO. The portion submitted to the analysis showed to be of high risk and the results obtained demonstrated that the decision model proposed and adopted was able to differ the best alternative to reduce the risk, as well as to indicate the most appropriate construction method considering the risk criterion initially established.

“In thinking about sources of uncertainty in engineering geology,
one is left with the fact that uncertainty is inevitable.
One attempts to reduce it as much as possible, but it must ultimately be faced.
It is a well recognized part of life for the engineer.
The question is not whether to deal with uncertainty, but how?”

Einstein & Baecher, 1982

1 INTRODUÇÃO

Freqüentemente o meio técnico é surpreendido por notícias ou relatos de acidentes e/ou incidentes em obras de engenharia. Não raro esses acidentes e/ou incidentes têm sua origem no ambiente geológico e são comumente designados de “surpresas” ou “imprevistos” geológicos.

A designação de “surpresa” ou “imprevisto”, ou seja, “o que não é previsto, súbito, inesperado, aquilo que não se prevê” (HOLANDA, 1975), confere aos condicionantes geológicos de projeto um caráter de total aleatoriedade e que, embora sejam empreendidas extensas campanhas de investigação geológico-geotécnica, há um desconhecimento significativo da geologia dos sítios de implantação das obras.

Estas constatações refletem, em maior ou menor grau, uma preocupação sempre presente quando são discutidos riscos e custos na construção de obras de engenharia.

Tal sentimento é muito bem explicitado por MAIONCHI (1997):

Dentro dos riscos de engenharia, os preponderantes são dois: um deles é a hidrologia e o outro é a geologia. Eu diria até que a geologia é mais pesada do que a hidrologia, devido à imprecisão desta ciência (grifo nosso). Na geologia existem condições imponderáveis (grifo nosso) que nenhum construtor é capaz de prever. Esse é o maior risco que temos. Você faz uma sondagem e logo após 100 m faz outra, no meio pode haver uma variação bem grande. É impossível qualquer construtor prever isso. (grifo nosso).

Estas afirmações são corroboradas por outras, como aquelas contidas no Informativo “NOTÍCIAS” (1999) da Construtora Camargo Corrêa:

Desafios gerados principalmente por imprevistos de ordem geológica (grifo nosso) deram o tom às obras de interligação do Rio Tietê com o reservatório do Rio Jundiá, complexo que se estende por mais de 20 quilômetros, entre as cidades de Mogí das Cruzes e Biritiba Mirim. O maior dos desafios foi a alteração dos planos iniciais de escavação do túnel 2. Isso porque, somente durante as escavações iniciais, detectou-se que o solo acima do túnel 2 não era tão rochoso como previam os estudos geológicos (grifo nosso), o que trazia risco de desmoronamentos. Um trecho do túnel precisou ser aprofundado e desviado em 80 m do traçado original.

O desconhecimento relativo dos condicionantes geológicos de projeto e de suas características geotécnicas e geomecânicas, ou, em outras palavras, das incertezas (incerteza - falta de certeza, hesitação, indecisão, dúvida - HOLANDA, 1975) que

permeiam o ambiente geológico em locais de implantação de projetos de engenharia, é um problema que preocupa a comunidade técnica há muitos anos, devido as implicações técnicas, econômicas e financeiras que as mesmas acarretam.

Tais incertezas estão associadas à variabilidade espacial das feições geológicas, bem como à variabilidade espacial e temporal das propriedades e parâmetros geotécnicos, hidráulicos e geomecânicos dos maciços terrosos e/ou rochosos.

A essas incertezas estão freqüentemente associados os insucessos verificados em diversas obras, sejam barragens, túneis, taludes, etc., traduzidos por rupturas, aumento de custos, prolongamento de cronogramas.

Dentre os vários motivos apontados como responsáveis pelos insucessos destacam-se, a pouca verba destinada para as campanhas de investigação, associada ao prazo exíguo para execução dos estudos (CFGB, 1982; RUIZ, 1983; GUIDICINI, 1983; VAZ, 1984; HOEK e PALMIERI, 1998; BRITO, 1998), à inadequação das técnicas e métodos de investigação utilizados (CFGB, 1982; GUIDICINI, 1983), ao despreparo técnico das equipes responsáveis pela condução dos trabalhos (GUIDICINI, 1983) e ao desconhecimento da geologia e da geomorfologia da área onde esta inserido o projeto (CFGB, 1982; GUIDICINI, 1984; HOEK e PALMIERI, 1998). VAZ (1999) professa a hipótese estabelecida por STAPLEDON (1976), de que os "imprevistos geológicos" ocorrem quando o "limite do estado conhecimento" em determinado assunto é alcançado. No entanto, ressalta-se que, paralelamente a este argumento, STAPLEDON (1976) aponta as falhas nos trabalhos de geologia (investigações inadequadas ou insuficientes) e a falta de preparo das equipes de geologia como um dos principais motivos dos insucessos.

As causas apontadas contribuem para que o problema persista. Contudo, a execução de mais e melhores investigações e em prazos compatíveis, não podem, por si só, resolver adequadamente o problema, apesar de contribuírem de forma significativa para redução do risco em trabalhos desta natureza.

O fato é que condições geológicas imprevistas e os problemas geotécnicos decorrentes são os fatores que mais contribuem para o aumento dos custos e dos prazos nos projetos de grandes obras de engenharia, particularmente em obras lineares como túneis. Apesar dos esforços para superar tais situações,

incorporando varias exigências nos documentos contratuais, o problema persiste (HOEK e PALMIERI, 1998).

Análise efetuada pelo Banco Mundial em 135 projetos para geração de energia em países em desenvolvimento (64 termelétricas e 71 hidroelétricas), envolvendo custos totais entre US\$ 1,8 milhões e US\$ 3,2 milhões e prazos de desenvolvimento variando entre 1,2 e 14,4 anos, demonstra que os custos de construção das hidroelétricas foram, em média, 27 % acima do estimado enquanto que os prazos de construção o foram em cerca de 28 %. Os custos adicionais devido a fatores geológicos não foram separados de outros, tais como, falhas de gerenciamento, problemas políticos e/ou financeiros, etc. É ressaltado, no entanto, que nos projetos analisados, menos de 1 % do custo total do projeto foi efetivamente gasto nos estudos de pré-viabilidade, viabilidade, investigações geológicas e estudos hidrológicos, antes do projeto de engenharia ser desenvolvido. A respeito dos riscos geológicos o estudo conclui: "Mudanças no escopo do projeto durante a sua implementação podem ter impacto significativo no custo e no cronograma do projeto. Tais mudanças podem surgir, por exemplo, da incapacidade dos programas de investigação geológico-geotécnica em eliminar os riscos provenientes de condições geológicas desconhecidas" (apud HOEK e PALMIERI, 1998).

De fato, incertezas são inerentes ao ambiente geológico. A incerteza é pervasiva na geologia, particularmente na geologia de engenharia.

As decisões técnicas e econômicas de um projeto de engenharia, apoiam-se, em grande parte, nas características geológicas e geotécnicas do local de implantação da obra, particularmente nas suas fases iniciais.

A FIGURA 1 mostra as possibilidades que os estudos geológico-geotécnicos têm de influenciar no custo final de uma barragem, conceito que pode ser estendido para todos os tipos de obra.

Nas fases iniciais, de inventário e viabilidade, são tomadas as decisões sobre o local, o tipo de obra e o "lay out" mais adequado. Como ressaltado por diversos autores, justamente nestas fases o projeto conta normalmente com recursos financeiros exíguos e prazos bastante curtos para o desenvolvimento dos trabalhos. Às demais fases do projeto competem, exclusivamente, a definição das estruturas da obra (escopo do projeto básico) e a trabalhos que visem o detalhamento das estruturas (escopo do projeto executivo e construção), não se dando mais ênfase ao fato do local

de implantação ter sido o mais indicado. Eventuais erros cometidos serão, normalmente, de difícil solução econômica (RUIZ, 1983).

A detecção de um condicionante geológico pode ocorrer em qualquer fase do projeto.

Em princípio, as investigações geológico-geotécnicas levadas a termo desde as fases iniciais são executadas exatamente para que tais condicionantes sejam identificados, caracterizados e incorporados ao projeto. Contudo, se um condicionante for detectado somente durante a construção da obra pode, em função das suas características, afetar em maior ou menor grau os custos e o cronograma da mesma, pois pressupõe-se que os critérios de segurança do projeto devam ser mantidos. Se o mesmo for detectado após o início da operação, tal condicionante pode afetar temporariamente a segurança da obra, implicando em custos adicionais, dada a necessidade de obras complementares. A segurança da obra poderá ser reconhecida frente aos critérios de projeto, em função das obras complementares efetuadas. Porém, se o condicionante não foi detectado após a obra entrar em operação, a segurança da mesma pode ficar comprometida. Neste caso, a obra pode conviver com a feição geológica por toda a sua vida útil ou então, chegar à ruptura (RUIZ, 1984).

As etapas de desenvolvimento de um projeto são de crucial importância e devem ser conduzidas com o máximo de acuidade possível

As áreas urbanas em particular, por suas peculiaridades, oferecem, reconhecidamente, inúmeras dificuldades adicionais para o desenvolvimento de um consistente programa de investigações geológico-geotécnicas dos maciços nos quais serão implantadas obras de engenharia, com destaque especial para as obras subterrâneas.

A construção de qualquer estrutura subterrânea, especialmente em ambiente urbano, pressupõe o entendimento do comportamento da estrutura subterrânea em si e do maciço que a circunda, além do uso de técnicas construtivas eficientes e confiáveis, visando evitar, ou minimizar ao máximo danos a estruturas próximas, ou outros distúrbios durante a construção.

Portanto, todas as variáveis do problema devem ser cuidadosamente analisadas, principalmente aquelas que podem conduzir a rupturas e colapsos, e/ou que afetem os critérios de deformação e deslocamentos admissíveis. Estas variáveis estão intimamente associadas à geologia do local e respectivas propriedades

geotécnicas, hidráulicas e geomecânicas, ao método construtivo, à finalidade e modo de operação da estrutura subterrânea e a interação entre eventuais materiais estocados e o maciço circundante (ASSIS, 1999).

FIGURA 1 - Possibilidades dos estudos geológico-geotécnicos de influenciar os custos de um projeto (RUIZ, 1983).

No caso de túneis urbanos, a compatibilização entre estas variáveis é sensivelmente prejudicada pelas restrições impostas pelo meio no qual a obra esta inserida.

A rota de um túnel é fortemente influenciada pela demanda, como, por exemplo, fluxo (origem-destino) de passageiros e/ou de veículos, pela presença de estruturas urbanas pré - existentes, pela ocupação em superfície, etc., fazendo com que tal rota obedeça a rigorosos critérios de deslocamentos máximos aceitáveis. A geologia não se configura como um importante fator de decisão no estabelecimento da rota. Deve-se, portanto, projetar a obra segundo as condições geológicas impostas por estas restrições (ASSIS, 1999).

Aliam-se a estas, as restrições relativas ao desenvolvimento de uma campanha de investigação em ambiente urbano. São dificuldades de diversas ordens, ressaltando-se a disponibilidade de espaço para um arranjo espacial adequado das investigações geológicas, a interferência das redes de utilidades públicas, as vias de tráfego, impedimentos operacionais e logísticos para a realização das investigações diretas e/ou indiretas, ressarcimentos de danos e de possíveis transtornos a terceiros, etc. (MANGOLIM FILHO e OJIMA, 1995), fatores que restringem, ou mesmo impedem que, por vezes, longos trechos do maciço sejam investigados e caracterizados.

No entanto, a geologia exerce um papel fundamental nas decisões relativas ao projeto e construção de túneis, determinando a viabilidade executiva, segurança e custos, ou mesmo evitando situações que, caso não sejam antecipadas, podem ampliar cronogramas e incrementar custos, gerando disputas e conflitos entre os agentes envolvidos na construção.

Estas particularidades fazem com que túneis sejam obras muito peculiares, uma vez que, por estarem literalmente imersas no maciço, este atua não só como agente dos mecanismos de carregamento do espaço aberto, mas também como suporte primário da escavação aberta, devendo sustentá-la até que os suportes definitivos sejam instalados (PARKER, 1997).

O arcabouço geológico do maciço e suas propriedades geotécnicas, hidráulicas e geomecânicas definem portanto, em grande parte, a escolha do método construtivo, a necessidade e dimensionamento dos suportes e de revestimentos e de todos os demais processos aplicados na construção (VAZ, 1999).

Estes são os motivos pelos quais as condições geológicas do maciço são apontadas como a principal causa de acidentes em túneis, secundada pela escolha ou aplicação inadequada do método construtivo (PELIZZA, 1996; PELIZZA e GRASSO, 1998; ANDERSON, 1998).

O não reconhecimento antecipado de situações geológicas “desfavoráveis” ou “não conhecidas”, que podem ocasionar acidentes em túneis, é creditado a vários fatores, dentre os quais destacam-se: a complexidade geológica; a profundidade do túnel que dificulta a execução de investigações; ao limite orçamentário imposto pelo proprietário da obra; ao plano de investigações geológicas desvinculado do método de escavação a ser aplicado; o desrespeito às etapas de projeto, às quais estão vinculadas etapas de investigação; ao descompasso e desvinculação entre as

informações obtidas na frente de escavação (mapeamento da face de escavação e paredes do túnel, por exemplo) e as necessidades do projeto; as dificuldades para execução de investigações adicionais, especialmente quando os trabalhos de escavação têm de ser interrompidos; ao avanço rápido da escavação, em atendimento unicamente às necessidades de produção do construtor, com apoio implícito do proprietário da obra, subestimando os aspectos de segurança geotécnica e hidrogeológica (RIBEIRO NETO, 1999).

A despeito da multiplicidade de causas dos acidentes, o produto destes em áreas urbanas restringem-se, quase sempre, a transtornos no trânsito, ruína de construções em superfície, colapso da rede de utilidades públicas (rede de água, esgoto, gás, etc.), mais raramente perda de vidas, além das conseqüências que afetam diretamente o desenvolvimento das obras. Embora apontem para uma pequena gama de situações, estas conseqüências freqüentemente têm custos financeiros extremamente elevados.

As conseqüências ambientais em áreas urbanas densamente ocupadas tendem, com raras exceções, a ser menos expressivas que as demais.

Estes aspectos fazem com que estruturas subterrâneas em ambiente urbano sejam obras de risco elevado, o que justifica o esforço no desenvolvimento de técnicas e metodologias de gerenciamento de risco, do projeto à construção da obra, visando o desenvolvimento das mesmas em condições mais seguras ou dentro de riscos calculados e aceitáveis.

Condições geológicas desfavoráveis não antecipadas são a causa fundamental que impedem estabelecer, a priori, as quantidades de serviços e a definição dos métodos construtivos mais apropriados (CELESTINO, 1995). Em decorrência, a avaliação do risco geológico e dos demais riscos envolvidos na construção da obra (risco de terceiros, saúde ocupacional, segurança das pessoas diretamente envolvidas na construção, riscos econômicos e financeiros, etc.) é sensivelmente prejudicada.

Estes fatores impossibilitam o estabelecimento do preço global da obra, dificultando estabelecer as condições contratuais ao início da obra (CELESTINO, 1995), problemas que caso não sejam sanados podem levar a litígios e disputas entre as partes envolvidas.

CASAGRANDE (1965), por meio de vários exemplos que ilustram a importância e a natureza dos riscos em obras de terra, destaca a necessidade de se avaliar os

possíveis riscos, e os custos decorrentes, como ferramenta auxiliar na tomada de decisão em engenharia geotécnica.

Em seu artigo "Role of 'Calculated Risk' in Earthwork and Foundation Engineering" , o termo "calculated risk" incorpora dois elementos: o uso do conhecimento imperfeito, guiado pelo julgamento profissional e pela experiência, para estimar as variações prováveis dos diversos parâmetros que participam da solução de um determinado problema e a definição da margem de segurança apropriada a ser adotada, ou o grau de risco, considerando fatores econômicos e a magnitude das perdas que poderiam resultar de uma possível ruptura da obra.

1.1 Objetivos

Baseado nos conceitos emitidos por CASAGRANDE (1965), o presente trabalho propõe metodologia de análise de risco que visa incorporar as incertezas de natureza geológica ("incorporação do conhecimento imperfeito") ao projeto e construção de túneis em áreas urbanas.

A metodologia proposta é aplicada ao túnel da Linha 4 – Amarela, a ser construído na cidade de São Paulo pela Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRO, no trecho onde o mesmo será implantado em rocha.

Após analisar alguns aspectos e problemas relativos aos trabalhos de investigação geológico-geotécnica para caracterização de maciços rochosos e/ou terrosos para obras de engenharia, o trabalho descreve a geologia e os condicionantes geológicos do maciço, onde as incertezas associadas a esses condicionantes exercem papel fundamental na estabilidade do mesmo. Dado o pequeno controle na distribuição espacial dos condicionantes, a ocorrência destes pode ser entendida como um evento aleatório que varia em função das diversas particularidades do maciço, inclusive a inter-relação entre o arcabouço lito-estrutural e a direção da rota do túnel. Frente à dificuldade em se prever onde um determinado condicionante geológico irá se manifestar e, por consequência, definir o método construtivo, projetar tratamentos de controle e contenção, etc., propõe-se incorporar este desconhecimento ao projeto e construção do túnel utilizando-se, para tanto, da Análise de Decisão.

2 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO - GEOTÉCNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS

Investigações geológico-geotécnicas são executadas com objetivo de elucidar o arcabouço geológico-estrutural dos locais de implantação de obras de engenharia. Este arcabouço é traduzido através de modelos conceituais, denominados de modelos geológico-geotécnicos, no qual, além das informações de natureza essencialmente geológica, são conjugados outros parâmetros, denominados de parâmetros geotécnicos. Esta conjugação de parâmetros visa identificar e setorizar o maciço em porções relativamente homogêneas, permitindo estabelecer o comportamento do maciço frente às solicitações que serão impostas pela obra. A inserção de parâmetros e propriedades mecânicas (resistência e deformabilidade) e hidráulicas do maciço, e/ou de feições particulares do mesmo, completam o trabalho, que culmina na definição do denominado modelo geomecânico, a partir do qual são elaboradas as hipóteses do projeto de engenharia.

Para atingir os objetivos estabelecidos para uma campanha de investigação e caracterização de maciços, quais sejam, definir da forma mais acurada possível todos os fatores de natureza geológica, geotécnica, hidráulica e geomecânica que intervêm no desempenho técnico e econômico da obra, são necessários, dentre outros trabalhos, definir o arcabouço geológico do meio, delimitar as diferentes unidades lito-estruturais presentes e a relação geológico-estrutural entre as mesmas, caracterizar a relação hidrogeológica e hidrogeotécnica entre as unidades discriminadas, obter parâmetros de natureza geotécnica dos maciços e das descontinuidades (estado de alteração e alterabilidade das rochas, grau de fraturamento do maciço, caracterização geotécnica das descontinuidades, etc.), selecionar e executar os ensaios de caracterização, de laboratório e "in situ", definir o valor dos parâmetros mecânicos e hidráulicos a ser utilizado no projeto, etc. Em suma, definir, caracterizar e parametrizar todos os condicionantes geológicos da estabilidade da obra.

Condicionante geológico é toda feição ou um aspecto geológico particular de um maciço rochoso e/ou terroso cuja presença, em função de suas características geotécnicas, hidráulicas e geomecânicas e das solicitações impostas por uma determinada obra, pode afetar a estabilidade ou o desempenho técnico-econômico da mesma.

Os condicionantes geológicos podem ser de natureza litológica, tectônica, estrutural, morfológica, hidrogeológica, etc., que controlam, de forma inequívoca, o comportamento dos maciços. As propriedades geotécnicas e os parâmetros geomecânicos de interesse à estabilidade dos maciços estão intimamente associados aos condicionantes geológicos, sendo por estes determinados.

Portanto, a determinação dos condicionantes geológicos, a sua variabilidade espacial e temporal, as suas características geotécnicas e geomecânicas, são tarefas imprescindíveis para a elaboração de um adequado modelo de comportamento do maciço.

Para tanto, são utilizados diversos métodos e técnicas de investigação, cuja aplicação requer amplo domínio e conhecimento de todas as ferramentas disponíveis, principalmente as limitações e capacidade de resolução das mesmas.

Por ser uma tarefa bastante complexa, requer, necessariamente, o trabalho de uma equipe de especialistas, pois envolve um amplo leque de atividades, nas mais diversas áreas do conhecimento.

São trabalhos que exigem a aplicação de metodologias e/ou roteiros metodológicos, gerais ou específicos para um tipo particular de maciço ou ambiente geomorfológico, visando alocação mais eficiente dos recursos destinados a esta atividade.

Os trabalhos de cunho metodológico apresentados por diversos autores (ROTSTEIN, 1962; NÁPOLES NETO, 1963; NUNES, 1963; VAZ, 1969; OLIVEIRA, 1970; MELLO, 1972; CABRERA, 1975; COPPEDÊ JR, 1985; MATOS, 1989; MANGOLIM FILHO e OJIMA, 1995; YUHR, BENSON e SHARMA, 1996; PARKER, 1997; HOEK e PALMIERI, 1998), constituem-se em poderosas ferramentas, desenvolvidas e utilizadas pelo meio técnico como decorrência da necessidade de otimização dos trabalhos. As metodologias são freqüentemente apresentadas como uma das soluções para minimizar os riscos em geologia de engenharia.

As metodologias, de forma geral, são trabalhos de sistematização, que organizam e discriminam as atividades e os meios de investigação a ser utilizados nas várias etapas de desenvolvimento dos projetos, determinando os objetivos a atingir a cada passo. Refletem, em maior ou menor grau, e a seu tempo, o estado da arte dos trabalhos de investigação e de caracterização geológico-geotécnica de maciços.

No entanto, as metodologias não traduzem o caráter dinâmico dos trabalhos e, via de regra, não alertam para o problema das incertezas que são de diferentes naturezas, produto das diversas atividades levadas a efeito durante o transcorrer do processo, ou seja, não se traduz a enorme tarefa e os inúmeros percalços encontrados ao longo de uma campanha de investigação e caracterização geológico - geotécnica de maciços, onde, todas as fases do projeto são guiadas fortemente pela experiência e julgamento profissionais dos técnicos responsáveis pela condução dos trabalhos.

O primeiro e um dos mais importantes passos para um correto e eficiente processo de investigação e caracterização geológica, é a elaboração do modelo geológico conceitual da região onde será implantado o empreendimento (FIGURA 2).

Este modelo deve conter todos os elementos para o entendimento da evolução geológica da área, contemplando todos os aspectos relativos à formação dos maciços rochosos, além dos sucessivos eventos que os modificaram ao longo da sua história geológica.

Os trabalhos nesta etapa devem ter caráter regional, envolvendo áreas além dos entornos do empreendimento propriamente dito, procurando-se entender a fisiografia do meio, fator determinante na definição do "lay out" mais adequado da obra. A partir deste "lay out" preliminar podem ser definidas as hipóteses de projeto e as solicitações a que o maciço será submetido.

O modelo geológico conceitual, que pode ser denominado de "modelo geológico-estrutural-evolutivo preliminar", é fundamental para elaborar as primeiras hipóteses sobre os condicionantes da estabilidade que devem ser esperados num determinado tipo de maciço, bem como auxiliar a compreensão de diversos aspectos relativos ao comportamento dos mesmos. Inúmeros são os locais onde somente após uma bem elaborada construção do modelo geológico foi possível entender comportamentos particulares dos maciços, como bem demonstrado por HASUI e MIOTO (1992), MASSAD (1999), dentre outros.

Esta etapa, que tem por objetivo definir o arcabouço geológico do meio, a delimitação das diferentes unidades lito-estruturais, as relações geológico-estruturais entre estas unidades, as características hidrogeológicas preliminares, etc., nem sempre é simples de ser executada. Os trabalhos devem ser conduzidos com a aplicação de técnicas e métodos de investigação apropriados, utilizando as diversas ferramentas disponíveis.

FIGURA 2 – Fluxograma do processo de investigações geológico-geotécnicas de maciços

FOOKES (1997) desenvolveu um sistema denominado "Geological Environment Matrix" (GEM), para auxiliar na elaboração dos modelos geológicos conceituais.

O sistema desenvolvido por FOOKES (1997) parte da premissa de que em qualquer local, "a geologia é a soma da sua história", ou seja, da gênese do maciço rochoso e de toda e qualquer alteração subsequente provocada por agentes da dinâmica interna, tais como, tectonismo, hidrotermalismo, metamorfismo, atividades ígneas, etc., ou agentes da dinâmica externa como a diagênese, o intemperismo, o trabalho das águas superficiais e subterrâneas, processos marinhos, eólicos, glaciais, erosão e sedimentação, formação de depósitos superficiais, etc.

Destaca-se, nesta etapa, o importante papel da geologia estrutural e a necessidade de identificação correta das unidades litológicas presentes.

Em inúmeros projetos esta etapa tem sido executada de uma maneira que pode ser considerada superficial, compreendendo unicamente a elaboração de um mapa litológico e de um esboço das estruturas presentes

Nos primórdios da Geologia de Engenharia, as descrições dos maciços rochosos dos sítios de implantação de obras caracterizavam-se por uma descrição eivada de termos e detalhes próprios da geologia, fazendo com que tais descrições, muitas vezes, tornassem-se inócuas, perdendo o seu objetivo precípuo.

Com o tempo, e submetidos a muitas críticas, os geólogos de engenharia foram se afastando deste tipo de descrição, fazendo crer que muitos dos termos e detalhes descritivos fossem, efetivamente, desnecessários.

Tal afastamento provocou uma simplificação exagerada nos trabalhos de descrição e caracterização geológica dos maciços, fruto de um distanciamento de alguns princípios essenciais da geologia, sendo esta, talvez, uma das principais causas de alguns casos de insucesso em geologia de engenharia.

Um exemplo que pode ser constatado é o relativo à denominação das variedades litológicas.

A denominação de uma rocha é designativa da sua gênese. A partir dela pode-se inferir quais são os condicionantes geológicos mais comuns daquela variedade litológica, além de comportamentos específicos daquele tipo de maciço. Portanto, é extremamente importante que as rochas sejam adequadamente caracterizadas e denominadas.

É freqüente, encontrar-se na bibliografia trabalhos que descrevem maciços rochosos constituídos por granitos-gnaisses, onde foram verificadas feições, caracterizadas como extensas faixas biotíticas alteradas, que colocaram em risco a estabilidade da obra ou exigiram alterações nos projetos de tratamento. Estas extensas faixas biotíticas que cortam os maciços, alteradas ou não, são típicas de maciços gnáissicos ou migmatíticos e não de maciços graníticos.

Da mesma forma, a geologia estrutural também vem sendo pouco ou mal utilizada na geologia de engenharia. De forma geral, as análises enfocam apenas a geometria das descontinuidades, não diferenciando distintos domínios tectônicos e/ou estruturais ou mesmo diferentes tipos de estruturas rochosas (acamamentos, foliações, fraturas, falhas, etc.) e nem utilizando outras evidências presentes, tais como, estrias de fricção, lineamentos minerais, etc.

Afora os benefícios advindos para a elucidação do arcabouço geológico e estrutural dos maciços, análises estruturais detalhadas contribuem de forma significativa para os estudos geotécnicos (BLEUS e FEUGA, 1981; HASUI e MIOTO, 1992), lembrando que, as propriedades mecânicas e hidráulicas das descontinuidades guardam estreita relação com a cinemática da deformação, como resultado das tensões a que o maciço foi submetido ou, em certos casos, com o estado de tensões ainda atuantes (CFGB, 1982).

A definição do modelo geológico-estrutural-evolutivo e do "lay out" da obra são condições essenciais para se estabelecer quais são os condicionantes geológico-geotécnicos esperados para um determinado tipo de maciço e que devem ser caracterizados, em vista das necessidades do projeto, ou seja, em função das solicitações que serão impostas ao maciço rochoso pela obra de engenharia.

Estes dois elementos, modelo geológico conceitual (condicionantes da estabilidade) e "lay out" da obra (solicitações), mantêm uma relação biunívoca a partir da qual define-se o modelo de investigação geológico-geotécnica. Este modelo deve incorporar a necessidade de identificar e caracterizar os condicionantes geológicos, aliando esta às necessidades do projeto. Em suma, o modelo de investigação geológico-geotécnica deve definir, com base na relação condicionantes geológicos x solicitações da obra de engenharia, onde e como investigar, quais ferramentas utilizar, de que forma (geometria espacial das investigações, densidade de investigação, que

profundidades alcançar), que ensaios realizar, que resultado esperar de cada ferramenta, etc.

De maneira geral, na prática atual dos programas de investigação, não são considerados, *a priori*, os condicionantes geológicos do maciço. A caracterização destes é o objetivo maior de uma campanha de investigação.

As investigações devem ter seu foco voltado, prioritariamente, para a definição e caracterização destes condicionantes, adequando-as para os demais objetivos das investigações (cotas de fundação, balanceamento de materiais, etc.), ao contrário do que freqüentemente se observa: investigações distribuídas geometricamente segundo as estruturas da obra de engenharia, acreditando-se que os condicionantes possam ser naturalmente individualizados e caracterizados unicamente pelo fato de se estar investigando o maciço. As investigações são dirigidas em função da geometria da obra e não em função das particularidades dos maciços.

Em obras subterrâneas, é comum o desenvolvimento de uma intensa campanha de investigação nos emboques dos túneis, uma obra a céu aberto.

É importante ressaltar que determinados condicionantes geológicos do projeto não são, ou não podem ser, identificados e caracterizados pelos métodos e técnicas mais usuais de investigação. É o caso, por exemplo, de algumas feições estruturais, como estreitas zonas de cisalhamento e/ou de falhas, diques, condições de contorno estrutural do topo rochoso, presença e distribuição de condutos cársticos, matacões, etc., que necessitam de métodos de investigação específicos e/ou da conjugação de diferentes métodos para a sua determinação.

Condicionantes geológicos que foram prognosticados a partir do modelo geológico conceitual elaborado nos estudos prévios (modelo geológico evolutivo do maciço), e que não foram comprovados nas investigações realizadas, devem ser analisados à luz das técnicas e métodos de investigação utilizados e das interpretações efetuadas, verificando-se se estas foram, efetivamente, as mais indicadas, observando-se de forma cuidadosa a capacidade de resolução dos métodos de investigação, o espaçamento e a qualidade das investigações, etc.

Freqüentemente as investigações fornecem indicações de comportamentos ou de condicionantes não previstos pelo modelo geológico. Estas novas informações devem ser sempre criteriosamente analisadas frente ao modelo geológico, frente as

técnicas e métodos de investigação e da capacidade de resolução das ferramentas utilizadas.

O caso da barragem de Nova Avanhandava exemplifica de forma notável tal assertiva. Durante os estudos de viabilidade, ensaios de sísmica de refração indicaram no leito do rio a existência de um baixo relativo do topo rochoso, com largura variando entre 30 m e 70 m, comprimento pesquisado de 580 m e base próxima à cota 306 m, cerca de 15 m abaixo do leito do rio. Uma vez concluídas as investigações, iniciadas as obras e efetuado o ensecamento do rio, verificou-se a presença de um paleo canal entalhado no maciço rochoso (com 25 m de largura, 450 m de comprimento máximo verificado e 12 m de profundidade), totalmente atulhado por sedimentos aluvionares pleistocênicos (conglomerados e areias com cimentação carbonática), não interceptado pelas sondagens rotativas executadas. Tal ocorrência obrigou a introdução de modificações profundas no projeto, escavações adicionais e aumento no consumo de concreto (MANO, 1987). É interessante notar que somente após iniciadas as escavações pode-se entender a presença de cascalho no meio de “manobras” durante a execução de sondagens rotativas (MANO, informação pessoal). O cascalho preenchia os “vazios”, produto da erosão do material de preenchimento de “juntas falhas” presentes no maciço, e que condicionaram a evolução do paleo canal. As investigações para o projeto (tipo, quantidade, espaçamento, etc.), foram consideradas quase que uma rotina para obras construídas em basalto (MANO, 1987).

Os resultados de cada campanha de investigação, em cada etapa do projeto, devem, portanto, ser analisados frente ao modelo geológico inicialmente estabelecido e frente as técnicas e métodos de investigação utilizados. Estes devem, a todo momento ser reavaliados, aferindo-os frente às novas informações que vão sendo obtidas com o transcorrer dos trabalhos. É um processo dinâmico onde as informações de uma determinada etapa devem sempre ser consideradas nas etapas seguintes.

Quanto mais cuidadosos e criteriosos forem os trabalhos de investigação, em todas as fases do projeto, menor a probabilidade de ocorrer condicionantes geológicos aos quais pode ser imputada a denominação de “surpresa” ou “imprevisto” geológico.

Segundo GUIDICINI (1984), “surpresa ou imprevisto geológico” é um fato ou uma feição geológica que não chegou a ser devidamente identificada ou que foi devidamente identificada mas cuja importância passou despercebida no contexto da obra. Segundo este autor, se o fato geológico não chegou sequer a ser identificado,

isso se deve basicamente ao despreparo da equipe de investigação, escassez de recursos, exiguidade de tempo ou inadequação das técnicas de investigação utilizadas, causas que podem ocorrer de forma isolada ou conjunta.

As causas levantadas por GUIDICINI (1984) são as mesmas apontadas por VAZ (1984), que destaca que a origem do problema pode estar na indefinição de responsabilidades, devido a interferência de diversos atores no projeto, tais como, o proprietário da obra, o projetista, o construtor e os consultores autônomos.

Análise elaborada pelo CFGB (1982), em 63 barragens com altura maior que 20 m, construídas entre 1957 e 1976 pela *Eletrecité de France*, mostrou que em 18 barragens houve necessidade de se efetuar trabalhos complementares para adequação dos critérios de projeto, ou mesmo modificações no projeto, devido a condições geológicas não previstas.

O estudo mostra que foi necessário executar trabalhos complementares em cerca de 25% das barragens analisadas e que os trabalhos de reconhecimento geológico-geotécnico forneceram um quadro incompleto e bastante imperfeito dos locais de implantação das obras.

As causas apontadas pelos autores foram creditadas a investigações incompletas, investigações executadas de forma tardia e/ou dificuldades na interpretação dos dados obtidos nas investigações geológicas.

As investigações incompletas consistem na ausência de certos tipos de investigação, tais como poços e trincheiras em regiões fortemente mascaradas por formações superficiais ou a execução somente de sondagens mecânicas, insuficientes para definir a geologia em áreas com presença de acidentes tectônicos. As investigações executadas de forma tardia podem ter origem em dificuldades administrativas, tais como a obtenção de autorização para realização de trabalhos em áreas de terceiros ou onde são requeridas autorizações especiais, como por exemplo, áreas de proteção ambiental. As dificuldades na interpretação dos dados obtidos nas investigações geológicas ocorrem, em particular, em regiões de geologia e geomorfologia mal conhecidas.

O estudo constata razões bem distintas para explicar os problemas encontrados nas investigações: erros nos programas de investigação (debitados a erros na escolha das técnicas de investigação, ausência de alguns trabalhos de reconhecimento geológico, execução de forma tardia de algumas investigações e interpretação

inadequada de informações obtidas nas investigações); e limite das possibilidades de investigação dentro de certos domínios, ou seja, dificuldades associadas ao limite de capacidade de resolução das próprias técnicas de investigação.

VAZ (1984), apresenta um relato, produto das contribuições apresentadas ao 2º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, cujas conclusões são análogas àquelas divulgadas pelo CFGB (1982), envolvendo, no entanto, diferentes tipos de obras (barragens, túneis, taludes de estradas, etc.).

Estes estudos, apresentados há cerca de duas dezenas de anos continuam bastante atuais. Inúmeros casos semelhantes, com uma série deles bastante recentes, poderiam ser acrescentados aos apresentados por aqueles autores, indicando que este é um problema recorrente.

Os denominados “imprevistos” ou “surpresas” de natureza geológica podem ser sensivelmente minimizados com o desenvolvimento de um extensivo trabalho de geologia. Os benefícios resultantes são significativos, pois além de auxiliar na determinação dos condicionantes geológicos do maciço e no estabelecimento dos procedimentos de investigação, auxiliam na compreensão e prognóstico de comportamentos dos mesmos.

Uma campanha correta e eficiente de investigação deve, desde o início dos trabalhos, evidenciar os principais condicionantes geológicos presentes em um determinado maciço. A melhor solução é definir as condições geológicas mais cedo e o mais acuradamente possível para que as “surpresas” sejam minimizadas (HOEK e PALMIERI, 1998). BENSON *et al.*, (1996), consideram esta a “pedra de toque” da maior parte dos projetos geotécnicos e ambientais.

No entanto, por mais que os trabalhos sejam conduzidos de forma acurada e cuidadosa, as informações nunca serão completas. Sempre existirão diferentes níveis de incerteza associados aos dados obtidos, às interpretações efetuadas ou aos parâmetros e propriedades de engenharia adotados.

As incertezas são decorrentes dos vários fatores que interferem numa campanha de investigação. Devido à dinâmica do trabalho e à influência das informações de uma etapa sobre as decisões tomadas nas etapas seguintes, pode haver uma somatória de efeitos cujos resultados podem não ser os mais apropriados.

Todas as etapas dos trabalhos estão permeadas por incertezas de diferentes graus e natureza. São incertezas associadas ao modelo e aos condicionantes

geológicos, à resolução dos métodos utilizados nas investigações, às propriedades hidráulicas do maciço, aos parâmetros geotécnicos e geomecânicos a ser utilizados no projeto, etc.

Freqüentemente são dados complexos e incompletos, com variações espaciais, em alguns casos em função da escala de trabalho, em outros em função do tempo.

De maneira geral, a base de dados utilizada para as análises é freqüentemente incompleta e a avaliação dos resultados é, em última análise, fortemente influenciada por um julgamento profissional, que reflete a opinião pessoal, particular, de um técnico ou de um grupo de técnicos, que reflete, por sua vez, o grau de experiência e conhecimento do(s) profissional(is) envolvido(s) no problema.

A geologia exerce um papel fundamental nas decisões relativas ao projeto e construção de obras, e em particular as obras subterrâneas. Independente das dificuldades relativas à execução de um adequado trabalho de geologia e da multiplicidade das causas dos acidentes, o produto destes em áreas urbanas tem conseqüências freqüentemente adversas, caracterizando estas obras como de risco elevado.

Os sistemas de gerenciamento e/ou de análise de risco respondem exatamente a essa demanda, procurando reduzir os riscos envolvidos no projeto, construção ou na operação de túneis urbanos.

3 IDENTIFICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E HIERARQUIZAÇÃO DO NÍVEL DE RISCO AO LONGO DA ROTA DO TÚNEL

O projeto e construção de uma obra subterrânea envolve uma série de decisões tomadas em ambiente de incerteza, envolvendo diferentes tipos de risco.

Grande parte destes riscos decorrem das incertezas que permeiam o ambiente geológico e, em particular, daquelas que condicionam a estabilidade do maciço rochoso.

O quadro de incertezas relativo à estabilidade do maciço refere-se aos processos associados à construção da obra, definidos como processos geradores de risco, que podem levar o maciço rochoso a deformações ou deslocamentos excessivos e às incertezas quanto a variação espacial, temporal, propriedades e comportamento das particularidades de natureza geológica que condicionam a deflagração daqueles processos.

A despeito das diferentes causas (escolha e/ou aplicação inadequada do método construtivo, falhas de gerenciamento, etc.), sistematicamente apontadas como deflagrações dos processos geradores de risco (ANDERSON, 1998; PELLIZA e GRASSO, 1999), aquelas de natureza geológica são, reconhecidamente, as principais.

Neste sentido, os processos geradores de risco podem ser entendidos como eventos aleatórios, deflagrados por particularidades do maciço rochoso, os denominados condicionantes geológicos da estabilidade, cujo comportamento é relativamente incerto.

Adotando-se este princípio e, em função dos conceitos de risco apresentados por vários autores (CERRI, 1993; GILBERT e McGRATH, 1996; CARVALHO, 1996; ISAKSSON *et al.*, 1999), pode-se definir risco geológico como sendo a consequência esperada de eventos aleatórios associados a processos de instabilização de maciços rochosos, deflagrados pela atuação dos condicionantes geológicos da estabilidade deste maciço.

A definição do quadro de risco compreende portanto, a identificação e a caracterização dos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço rochoso, a circunscrição das áreas do maciço mais susceptíveis à presença deste condicionantes, as relações dos condicionantes geológicos com a estrutura subterrânea a ser implantada, a relação desta estrutura com o meio diretamente afetado pela construção da obra (meio físico, biótico, social e econômico) e as consequências que podem advir,

caso algum processo de instabilização do maciço (processo gerador de risco) venha a ocorrer durante a construção da obra.

Os níveis de risco a que as áreas circunvizinhas estarão submetidas durante a construção do túnel podem ser definidos pela conjugação entre a susceptibilidade do maciço em manifestar as particularidades geológicas que condicionam a sua estabilidade e as conseqüências devido à deflagração dos processos geradores de risco.

A susceptibilidade do maciço em manifestar os condicionantes geológicos da estabilidade e, portanto, a susceptibilidade deste maciço em deflagrar processos geradores de risco, depende de vários fatores, dentre eles, da homogeneidade litológica e estrutural das variedades rochosas que compõem o maciço, da natureza dos condicionantes geológicos (se litológicos e/ou estrutural), da direção da foliação, da direção e das dimensões do túnel, da atuação da água, etc.

As conseqüências potenciais decorrentes da deflagração dos processos geradores de risco envolvem, além daquelas intrinsecamente associadas à construção da obra (perdas de equipamentos, necessidade de reconstrução parcial do túnel, atrasos no cronograma, etc.), aquelas causadas em superfície, nos entornos da rota de desenvolvimento do túnel. Estas são as mais visíveis, podendo implicar em prejuízos significativos para a população.

Incidentes de gravidade semelhante, independente do local ou do segmento do túnel onde o mesmo venha a ocorrer, tendem a ter, no interior do mesmo, conseqüências de magnitudes também semelhantes. Ao contrário, devido a diversidade do uso e da ocupação do solo, as conseqüências em superfície tendem a ser bastante diferenciadas, tornando-as mais adequadas para diferenciação dos níveis de risco ao longo da rota do túnel.

A definição dos níveis de risco envolve a conjugação de um elevado número de parâmetros, de natureza e caráter diferenciados, com características e distribuição espacial variada, cujo tratamento exige a utilização de ferramentas capazes de associar informações com características tão distintas.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são ferramentas que apresentam tais características. Segundo CELESTINO e DINIZ (1998), um SIG é um sistema computacional projetado para apoiar a captura, gerenciamento, manipulação, análise e apresentação de dados referenciados espacialmente. Permitem armazenar,

integrar e gerar novas informações a partir do processamento gráfico de informações espaciais, como mapas e imagens de satélite, e de informações alfanuméricas armazenadas em um banco de dados. Um SIG deve conter funções matemáticas de análise de dados (operações algébricas e/ou lógicas) utilizadas para ponderação de fatores nos cruzamentos de informações e mapas, permitindo a geração de cenários em análises de risco, susceptibilidades e potencialidades.

O cruzamento, a integração e o tratamento dos dados e informações, ou seja, a estruturação e a integração da base de dados para o desenvolvimento do SIG foi efetuado no software ARCHVIEW, versão educacional, onde foi criada uma topologia de polígonos para os temas objeto de análise. Os dados descritivos dos temas de análise, ou dos atributos do meio físico, do uso e ocupação do solo e dos procedimentos técnicos utilizados nas investigações geológicas, foram armazenados em um banco de dados ACCESS e conjugados conforme o fluxograma da FIGURA 3. A hierarquização e o zoneamento de risco foram alcançados a partir de mapas temáticos intermediários gerados pelo cruzamento dos atributos relativos a cada tema de análise.

A identificação e a caracterização dos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço rochoso e de todas as variáveis necessárias à definição do quadro de risco são apresentadas nos sub-ítem a seguir.

3.1 O Túnel da Linha 4 (Amarela) da Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRO) - Generalidades

O projeto da Linha 4 - Amarela - da Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metro, compreende a construção de um túnel que une a Estação Luz, no centro da cidade de São Paulo, ao bairro da Vila Sônia, na zona oeste.

No trecho compreendido entre as Estações Luz e Faria Lima, o túnel será implantado nos sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo. Após a Estação Faria Lima, em direção à Vila Sônia, o túnel será, em parte, construído em rochas do embasamento cristalino.

A área abrangida por este estudo corresponde ao trecho entre a Estação Faria Lima e o Pátio de Manobras, mais precisamente entre as ruas Padre Carvalho, em Pinheiros, e a Avenida Francisco Morato, nas proximidades da rua General Sena

FIGURA 3 – Procedimento metodológico adotado no tratamento e análise dos atributos para hierarquização e zoneamento de risco da área nos entornos do traçado do túnel

FIGURA 4 – Planta de localização do traçado do túnel (modificado de IPT, 1998a)

Vasconcelos, no bairro da Vila Sônia (FIGURA 4). Neste trecho, com cerca de 2800 m de extensão, o túnel que será construído em rochas pré cambrianas do embasamento cristalino, constituído por gnaisses migmatíticos. Nas demais áreas deste trecho, o túnel será implantado em solo de alteração do maciço gnáissico.

3.2 Características Litológicas e Estruturais do Maciço Rochoso

O maciço rochoso no trecho de interesse a este estudo, é constituído por rochas gnáissicas do Complexo Granítico-Migmatítico Ibiúna (HASUI, 1993), recoberto por solos de alteração e depósitos coluviais. Localmente, ao longo de algumas das principais drenagens, sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo e depósitos aluviais recentes sobrepõem-se às rochas do embasamento rochoso e/ou aos seus produtos de alteração.

Os dados relativos aos litotipos, metamorfismo e estruturas, indicam a ocorrência de dois grandes processos deformacionais dúcteis (HASUI, 1993). O primeiro envolveu uma tectônica de cavalgamento que impôs às rochas modificações generalizadas, com desenvolvimento de diversos tipos de foliação (xistosidades, foliação milonítica, bandamento composicional), paralelizados entre si e apresentando baixos ângulos de mergulho. O segundo processo resultou no desenvolvimento de grandes zonas de transcorrência dúctil, representadas na área de implantação do túnel, pela Zona de Cisalhamento Caucaia.

Os diferentes litotipos formam corpos lenticulares justapostos, de extensão e espessura variáveis, dispostos segundo a direção geral da foliação, ENE-SSW. Esta, nas regiões sob influência da Zona de Cisalhamento Caucaia, apresenta mergulhos verticais a subverticais. Lateralmente, à medida em que se distancia desta estrutura, a foliação passa a apresentar mergulhos médios a baixos, concordantes com a orientação regional.

Em alguns trechos, dentro da área de influência da Zona de Cisalhamento Caucaia, o maciço apresenta foliação subhorizontal. Tal fato foi interpretado como produto da heterogeneidade no processo deformacional, na transcorrência dúctil, que provavelmente preservou núcleos pouco ou não deformados, onde a foliação não foi verticalizada (IPT, 1998a).

Petrograficamente todos os litotipos presentes são classificados como biotita

gnaisses, fortemente milonitizados, com composições monzograníticas (% de plagioclásio $\cong$ % de microclínio) a tonalíticas (relação plagioclásio/microclínio > 90), com até 15% de biotita (IPT, 1998a).

Análise elaborada pelo IPT (1998a) individualizou, no interior do maciço, porções relativamente homogêneas, caracterizadas por relações mineralógicas, texturais e estruturais intrínsecas a cada um dos litotipos, permitindo a compartimentação do maciço em três tipos litológicos básicos (FOTO 1), denominados de “maciço gnáissico milonítico granítico”, “maciço gnáissico milonítico biotítico” e “maciço gnáissico milonítico bandado”.

O maciço denominado maciço gnáissico milonítico granítico (“gnaisse granítico”) é caracterizado como um maciço homogêneo, com características semelhantes ao longo de todo o traçado do túnel. Apresenta-se, de maneira geral, intensamente milonitizado, foliação com mergulhos verticais a subverticais, estrutura milonítica porfiroclástica, granulação fina a média, com quantidades equivalentes de quartzo e feldspato que perfazem de 80% a 90% da matriz rochosa. O quartzo encontra-se recristalizado em cordões ou bolsões. A biotita encontra-se dispersa em plaquetas recristalizadas, muito deformada e lenticularizada, ou formando fitas estreitas e contínuas. Exibe tons de cinza mais escuro ou mais claro, indicando variações nas porcentagens e granulação dos constituintes mineralógicos. Nas imediações da área de desenvolvimento da Zona de Cisalhamento Caucaia preponderam os litotipos mais deformados, homogêneos, de coloração cinza médio, granulação mais fina e quartzo recristalizado. Estas características conferem à matriz rochosa elevada resistência mecânica e ao maciço boas qualidades geotécnicas (FOTO 2). Nas regiões mais distantes da Zona de Cisalhamento Caucaia predominam os litotipos de granulação mais grossa e coloração mais clara, eventualmente com a foliação apresentando mergulhos mais baixos (FOTO 3).

Indistintamente, estes maciços são cortados por veios centimétricos a decimétricos de remobilizados de quartzo e feldspato, esparsos e dispostos segundo a direção da foliação.

De maneira geral, os litotipos graníticos encontram-se menos alterados e fraturados em profundidade. A alteração promove, preferencialmente, a abertura das fraturas subhorizontais, paralelas e oblíquas à foliação. Nas porções do maciço onde o processo deformacional provocou intensa recristalização do quartzo, verifica-se a

ocorrência localizada de corpos de dimensões variadas, resistentes à alteração e pequeno recobrimento de solo de alteração e/ou rocha alterada.

- CP-23 - Gnaiss milonítico granítico
- CP-48 - Gnaiss milonítico granítico
- CP-42 - Gnaiss milonítico granítico
- CP-40 - Gnaiss milonítico biotítico
- CP-33 - Gnaiss milonítico biotítico

FOTO 1 - Variedades litológicas típicas presentes no maciço rochoso (IPT, 1997)

FOTO 2 - Variedade litológica "gnaisse milonítico granítico", de coloração cinza médio, fortemente milonitizado, foliação subvertical (IPT, 1997).

FOTO 3 - Variedade litológica "gnaisse milonítico granítico", de coloração cinza claro, foliação difusa, inclinada (IPT, 1997)

Dos três tipos litológicos individualizados, é o que possui melhores qualidades geomecânicas (TABELAS 1 e 2).

O maciço gnáissico milonítico biotítico ("gnaisse biotítico") é caracterizado por conter maiores proporções de biotita (até 15 %), o que confere à rocha coloração cinza escuro a preta, quando são. É uma rocha rica em porfiroclastos de plagioclásio,

rodeados por massa fluxionada constituída de lâminas e/ou filmes contínuos de biotita e faixas de quartzo, milimétricas a centimétricas, fortemente deformadas. Apresenta-se homogêneo ao longo de todo o trecho analisado, podendo conter estreitas intercalações quartzo-feldspáticas cinza claras. Da mesma forma que no gnaiss granítico, nas áreas próximas à Zona de Cisalhamento Caucaia a foliação encontra-se na posição vertical a subvertical (FOTO 4) e, nas áreas mais distais, inclinada a subhorizontal (FOTO 5).

Devido à sua constituição mineralógica, encontra-se quase sempre mais alterado, mesmo a maiores profundidades, apresentando coloração marrom amarelado. O fraturamento neste litotipo também é mais acentuado, caracterizando-se, freqüentemente, como muito fraturado. Os principais sistemas de fraturas neste tipo de maciço são o subhorizontal, o paralelo e o oblíquo à foliação. Nas porções mais alteradas preponderam os sistemas subhorizontal e paralelo à foliação.

Os litotipos biotíticos são mais homogêneos que os demais, apresentando, em média, menor massa específica aparente, seca e saturada, maior porosidade, menor resistência a compressão uniaxial e maior deformabilidade (TABELAS 1 e 2). Por serem mais susceptíveis à alteração podem apresentar o topo rochoso a maiores profundidades, introduzindo importantes heterogeneidades no interior do maciço.

FOTO 4 - Variedade litológica “gnaisse milonítico biotítico”, de coloração cinza escuro a preto, foliação subvertical (IPT, 1997)

FOTO 5 - Variedade litológica "gnaisse milonítico biotítico", de coloração cinza escuro a preto, foliação inclinada (IPT, 1997)

O maciço gnáissico milonítico bandado ("gnaisse bandado") é constituído por porções alternadas, de espessuras variadas, dos litotipos gnaisse granítico e gnaisse biotítico, resultando num maciço bandado, irregularmente. As porções quartzo feldspáticas deste litotipo, denominadas de graníticas de transição para efeito de identificação nos ensaios mecânicos, apresentam espessuras variáveis, por vezes extremamente deformadas, com estrutura fluxionar (FOTO 6). Em outras, a estrutura é menos evidente, os minerais apresentam-se com granulação mais grossa e bastante fissurados.

O maciço gnaisse bandado apresenta heterogeneidades que refletem suas características geotécnicas, exibindo trechos contínuos praticamente sãos, intercalados a outros muito alterados. Em outros, pode exibir bandas pouco e muito fraturadas intercaladas. Nestes maciços, a presença de faixas biotíticas relativamente contínuas, constituem-se em importantes condicionantes da estabilidade.

Estruturalmente foram identificadas quatro famílias de juntas subverticais com direções gerais NNW-SSE, transversais à foliação; ENE-WSW, longitudinais à foliação; NW-SE e NNE-SSW, oblíquas à foliação; dois sistemas inclinados, com orientações oblíqua e ortogonal à foliação, de direção média NE-SW/52SE e NNW-SSE/38NE, além de fraturas subhorizontais (HASUI, 1993).

TABELA 1 - Índices físicos médios dos litotipos (modificado de IPT, 1998)

Variedade Litológica Gnaiss	Índices Físicos Médios				Velocidade de Onda P (m/s)
	δ aparente (kg/m ³)	δ aparente Seca (kg/m ³)	porosidade aparente (%)	umidade de saturação (%)	
Granítico cinza médio	2632	2619	1,35	0,52	4744
Granítico Cinza claro	2570	2528	4,21	1,67	2743
Granítico de Transição	2606	2623	1,78	0,68	3353
Biotítico (foliação Subvertical)	2581	2512	6,81	2,75	2695
Biotítico (foliação Subhorizontal)	2610	2534	7,61	3,03	1845

δ - densidade

TABELA 2 - Parâmetros geomecânicos médios dos litotipos (modificado de IPT, 1998)

Variedade Litológica Gnaiss	Parâmetros Geomecânicos Médios					
	Módulo de Deformabilidade (GPa)	Compressão uniaxial (MPa)	Compressão Diametral (MPa)		Coesão (MPa)	Ângulo de Atrito (ϕ)
			paralela	perp.		
Granítico Cinza Médio	65,1-27,2	182,3-79,7	10,3	15,4	8,07	60
Granítico Cinza Claro					4,5	56
Granítico De Transição	20,5-13,0	103,3-60,7			7,9	58
Biotítico	15,2	21,5	3,8		1,35-1,33	43-34

Das famílias de fraturas subverticais, as mais importantes são as de direção ENE-WSW, paralelas à foliação, originadas por decompressão volumétrica anisotrópica durante o soerguimento do maciço, e as de direção NNW-SSE, ortogonais à foliação, originadas por tração, resultado dos últimos esforços a que o maciço foi submetido (IPT, 1998). Destas, deve-se destacar as estruturas de direção NNW-SSE, que condicionam diversos aspectos de interesse ao projeto.

FOTO 6 - Variedade litológica "gnaisse milonítico granítico", de coloração cinza claro, foliação inclinada, fortemente milonitizado (IPT, 1997)

Das demais famílias de fraturas, as mais importantes, por serem mais freqüentes, são aquelas de mergulho médio (30° a 60°) e de direção ENE e NNW, respectivamente oblíquas e subortogonais à foliação, além das fraturas horizontais a subhorizontais (mergulho $< 20^\circ$).

3.2.1 Condicionantes Geológicos da Estabilidade do Maciço Rochoso

A resposta diferencial dos diversos litotipos aos processos intempéricos é traduzida pelo aprofundamento irregular da alteração para o interior do maciço rochoso e pela presença de matacões de dimensões variadas, que permanecem imersos nos solos de alteração. Estes, aparentemente, ocorrem com mais freqüência nos litotipos bandados.

Os processos intempéricos atuam também de forma bastante intensa no interior das juntas originadas por alívio de tensão, dando origem, às vezes, a espessas camadas alteradas, de andamento subparalelo ao topo rochoso, separadas de outras por estratos praticamente sãos. Estas, são mais comuns nos litotipos graníticos.

Neste contexto, acrescente-se a presença das estruturas com direção NNW-SSE, subortogonais à foliação. Estas estruturas são grandes lineamentos que condicionam toda a rede de drenagem da área, paralelizando os afluentes do Rio

Pirajussara com o Rio Pinheiros (FIGURA 4). A estas estruturas estão associados o aprofundamento expressivo do topo rochoso, o aumento do fraturamento do maciço e zonas de elevada permeabilidade.

Às irregularidades e particularidades do topo rochoso causadas pela alteração diferencial dos litotipos, interpõem-se aquelas devido a atuação dos lineamentos de direção NNW-SSE, resultando num quadro de grande complexidade estrutural do horizonte de transição solo-rocha (FIGURA 5).

O maciço rochoso encontra-se, indistintamente, mais alterado e mais fraturado nas porções mais superficiais. A alteração aprofunda-se para o interior do maciço, devido a atuação de estruturas geológicas ou em função da resistência diferencial dos litotipos ao intemperismo, controlando, juntamente com as zonas alteradas superficiais, o fluxo d'água no maciço.

O quadro acima exposto permite que se depreenda que o horizonte de transição solo-rocha é o principal condicionante da estabilidade do maciço, dada a probabilidade de um, ou uma combinação das particularidades geológicas que configuram este horizonte, ser interceptado, ou situar-se dentro da zona de influencia da escavação do túnel. A estas particularidades, aliam-se outras de natureza lito-estrutural, tais como as zonas biotíticas subhorizontais, que interessam de modo particular à estabilidade do teto do túnel.

As particularidades geológicas que se configuram em condicionantes discretos da estabilidade do maciço são apresentados de forma resumida a seguir:

- diferentes litotipos, com características geotécnicas e geomecânicas distintas, ocupando diferentes porções da seção de escavação do túnel;
- corpos rochosos contínuos, de composição predominantemente biotítica, alterados, espessura e continuidade variáveis, mergulho subvertical;
- corpos rochosos contínuos, de composição predominantemente biotítica, alterados, espessura e continuidade variáveis, mergulho subhorizontal;

FIGURA 5 - Contorno estrutural do topo rochoso

- matacões de rocha de dimensões variadas, imersos no solo de alteração;
- juntas de alívio de tensão subhorizontais intercaladas em maciços rochosos praticamente sãos, andamento subparalelo ao topo rochoso, continuidade e espessura variáveis, com “preenchimento” de rocha alterada;
- estruturas de direção NNW-SSE.

Ressalta-se que, embora não tenham sido executados ensaios de permeabilidade de forma sistemática, os corpos biotíticos, as juntas de alívio e as estruturas de direção NNW/SSE concentram grande parte do fluxo de água, funcionando como elementos armazenadores do maciço, eventualmente em ambiente confinado, como é o caso das juntas de alívio de tensão subhorizontais.

3.2.2 Incertezas Relacionadas aos Condicionantes Geológicos da Estabilidade do Maciço

A característica geológica mais importante do maciço estudado é o seu arcabouço lito-estrutural, caracterizado por corpos rochosos deformados e lenticularizados por processos tectônicos, onde se alternam diferentes litotipos, com dimensões e propriedades diferenciadas, cuja distribuição espacial é, efetivamente, pouco conhecida.

De fato, com exceção de uma única sondagem, executada com 45° de inclinação e direção paralela à da foliação, todas as demais foram executadas na posição vertical, subparalelamente ao mergulho da foliação. Esta geometria dificulta sobremaneira a correlação entre as sondagens, resultando numa baixa definição da extensão dos corpos rochosos, restringindo a análise do arranjo e da variabilidade espacial dos mesmos.

O maciço rochoso, ao longo do traçado do túnel, foi dividido em subtrechos (IPT, 1998), nos quais se alternam os três litotipos básicos descritos (FIGURAS 6 e 7), indicando que, nos trechos individualizados, há a predominância de um determinado litotipo em relação aos demais (FOTOS 7, 8 e 9).

Esta subdivisão, elaborada com base na descrição detalhada de 74 sondagens rotativas e na análise visual dos testemunhos das demais sondagens, foi aferida de

FIGURA 7 – Seção geológica longitudinal ao longo da rota do túnel (modificado de IPT, 1998a)

FOTO 7 – Aspecto típico do maciço gnáissico milonítico granítico (SM-6707)

FOTO 8 – Aspecto típico do maciço gnáissico milonítico biotítico (SM-6527)

FOTO 9 – Aspecto típico do maciço gnáissico milonítico bandado (SM-6529)

forma indireta por meio de análises estatísticas do índice Q (GRIMSTAD e BARTON, N., 1993), que demonstraram as diferenciações geomecânicas entre os maciços gnáissicos individualizados (IPT, 1998; CELLA, P. R. C., *et al.*, 1999), superando, em parte, a limitação relativa à geometria das sondagens.

No entanto, uma outra restrição em relação a esta compartimentação, diz respeito ao número e à posição relativa das sondagens utilizadas para definir a extensão dos corpos rochosos.

Nas porções do maciço onde a direção do túnel é subparalela à direção da foliação (FIGURA 8), as sondagens posicionadas subparalelamente à direção do túnel, favorecem a definição da extensão dos corpos rochosos pois estão dispostas subparalelamente à direção da foliação. Ao contrário, nas porções onde o eixo do túnel corta obliquamente a direção da foliação (FIGURA 9), as sondagens dispostas subparalelamente à direção do túnel, posicionam-se em linha oblíqua à direção da foliação, prejudicando a delimitação das diferentes faixas rochosas.

Se por um lado o número e a posição das sondagens limita a definição da variabilidade espacial dos corpos rochosos, por outro, a ocorrência de maciços rochosos com características litológicas e estruturais semelhantes, em sondagens

FIGURA 8 - Compartimentação geológica do maciço rochoso. Direção do túnel subparalela à direção da foliação

FIGURA 9 - Compartimentação geológica do maciço rochoso. Direção do túnel ortogonal a obliqua à direção da foliação

consecutivas e espaçadas dezenas de metros, fornece indicações importantes sobre a homogeneidade e continuidade espacial dos compartimentos lito-estruturais.

O desconhecimento da distribuição espacial dos corpos rochosos e, por consequência, dos condicionantes geológicos a eles associados, constitui-se na principal fonte de incerteza em relação à estabilidade do maciço.

A importância relativa dos diferentes corpos rochosos depende da espessura, da continuidade e qualidade geotécnica dos mesmos, das dimensões do túnel e da posição deste em relação à direção e ao mergulho da foliação.

A espessura dos diferentes tipos de maciço foi avaliada, corrigindo-se o comprimento amostrado nas sondagens, a partir do ângulo de mergulho da foliação medido em cada sondagem.

Nos gnaisses bandados, os valores calculados representam de forma mais fidedigna a espessura "real" das intercalações graníticas e biotíticas, devido a alternância contínua destes litotipos ao longo das sondagens nestes maciços.

Nos maciços de composição predominantemente granítica ou biotítica, os valores de espessura obtidos para estes corpos rochosos correspondem à máxima amostrada nas sondagens e não a espessura "real" dos mesmos. As sondagens não atravessaram totalmente estes corpos rochosos, embora tenham atingido profundidades da ordem de até 50 m.

Nos gnaisses de composição granítica, as maiores espessuras são observadas nas proximidades da área de desenvolvimento da Zona de Cisalhamento Caucaia. Nesta região, estes litotipos formam verdadeiros "pães de açúcar" no interior do maciço (FIGURA 10). Aqui as sondagens penetraram até 21,0 m neste tipo de maciço, sendo esta a maior espessura observada nos gnaisses graníticos. Espessuras maiores que 7,0 m correspondem a cerca de 60 % do comprimento total investigado, equivalente a 35 % das sondagens. As espessuras médias atingem valores da ordem de 5,5 m. A espessura mais freqüente situa-se entre 7,0 m e 10,0 m, com 43 % do total amostrado em cerca de 30 % das sondagens (FIGURA 11).

Nos gnaisses biotíticos, são verificadas menores espessuras, em comparação ao gnaiss granítico. Neste litotipo, 31 % das sondagens executadas investigaram não mais que 1,0 m de espessura, sendo que estas representam, no entanto, apenas 7 % do comprimento total amostrado. A espessura máxima amostrada foi da ordem de 7,0 m e a espessura média corresponde a cerca de 3,3 m. Neste maciço, as espessuras

FIGURA 10 – Seção geológica pela passagem subterrânea Eurycides de Jesus Zerbini (modificado de IPT, 1998b)

maiores que 3,0 m correspondem a cerca de 46 % das sondagens, o que corresponde a 78 % do comprimento amostrado.

FIGURA 11 - Gnaiss milonítico granítico. Histograma das espessuras dos corpos rochosos

Espessuras entre 5,0 m e 7,0 m são as mais freqüentes, ocorrendo em proporções equivalentes, correspondendo a 62 % do comprimento total amostrado (FIGURA 12). As pequenas espessuras amostradas são reflexo do aprofundamento do topo rochoso, devido ao estado de alteração mais pronunciado neste tipo de maciço.

Nos gnaisses bandados, as variedades graníticas e biotíticas atingem espessuras máximas entre 9 m e 10 m, e espessuras médias de 1,3 m e 1,1 m, respectivamente. As informações relativas às faixas biotíticas e graníticas (FIGURAS 13 e 14), mostram que 85 % destas intercalações são menores que 2,0 m, representando entre 43 % e 48 % do comprimento total amostrado enquanto que, as porções biotíticas e graníticas de maior porte, maiores que 2,0 m, representam de 52 % a 57 % do comprimento total amostrado.

Por outro lado, espessuras compreendidas entre 3,0 m e 7,0 m, correspondem a 44 % do comprimento amostrado nas zonas graníticas (cerca de 51 % das amostras), e nas porções biotíticas estas espessuras somam 23 % do comprimento amostrado e apenas 5 % das amostras. As espessuras mais freqüentes das faixas graníticas estão

compreendidas entre 3,0 m e 5,0 m, e das intercalações biotíticas situam-se entre 1,0 m e 2,0 m.

FIGURA 12 - Gnaiss milonítico biotítico. Histograma das espessuras dos corpos rochosos

FIGURA 13 - Gnaiss milonítico bandado. Histograma das espessuras das intercalações graníticas

FIGURA 14 - Gnaiss milonítico bandado. Histograma das espessuras das intercalações biotíticas

Estes dados indicam que o gnaiss bandado é constituído por um grande número de intercalações rochosas, de composição biotítica e granítica alternadas, com espessura submétrica a métrica, que compõem cerca de 50 % do maciço. Nas demais porções do maciço, intercalações métricas de composição biotítica e granítica se alternam, prevalecendo sobre as outras formas de ocorrência, onde porções métricas de composição granítica, encontram-se intercaladas a faixas submétricas a métricas de composição biotítica.

A análise das espessuras dos corpos rochosos ressalta a possibilidade de ocorrência no interior dos compartimentos lito-estruturais individualizados (FIGURA 6), de intercalações rochosas com qualidades geotécnicas diferenciadas visto que o espaçamento entre as sondagens e a dimensão destes compartimentos supera de forma significativa a espessura estimada dos corpos rochosos.

Dos tipos gnáissicos que compõem o maciço rochoso, os mais importantes são aqueles de constituição biotítica, devido ao estado de alteração que estes podem apresentar.

Nos gnaisses bandados, as intercalações rochosas de constituição biotítica exercem papel fundamental na estabilidade, devido às heterogeneidades que as

mesmas introduzem no interior do maciço. Se estas apresentarem mergulho vertical a subvertical e a direção da foliação for paralela ao eixo do túnel, estas intercalações podem ocorrer na zona de desenvolvimento do túnel e serem interceptadas pela escavação, o que coloca em risco a estabilidade do teto do túnel. Porém, se estas intercalações ocorrerem imediatamente ao lado da escavação, podem passar despercebidas e afetar a estabilidade das paredes do túnel, dada a possibilidade de desenvolvimento de empuxos laterais relativamente altos.

Se o mergulho da foliação for subhorizontal, independente da direção do túnel, este condicionante pode afetar a estabilidade do teto da escavação.

Outros condicionantes geológicos, tal como os matacões, presentes na zona de transição solo-rocha, ou as juntas de alívio, presentes em diferentes profundidades no interior do maciço, têm distribuição incerta ao longo da rota do túnel, sendo também controlados, em maior ou menor grau, pelo tipo de maciço gnáissico presente.

Algumas estruturas de direção NNW/SSE, ortogonais à foliação, inferidas a partir de observações indiretas (paralelização de córregos e rios, capturas de drenagem, etc.), foram confirmadas com as sondagens executadas, devido ao aumento do estado de alteração e do grau de fraturamento do maciço. Outras porém, inferidas pelos mesmos procedimentos, não foram identificadas nas sondagens. Aspectos como a dimensão efetiva da área alterada e fraturada sob influência destas estruturas, ou mesmo a direção real de uma determinada estrutura em um local específico na rota do túnel, portanto, são relativamente desconhecidos.

A descrição dos principais condicionantes geológicos, o papel destes na estabilidade do maciço e os possíveis processos geradores de risco associados é apresentada no QUADRO 1.

A probabilidade de atuação e importância de um determinado condicionante geológico, ou de um conjunto destes, é função do litotipo predominante em determinado subtrecho, da homogeneidade litológica e estrutural esperada do tipo litológico presente e da direção do túnel em relação à direção da foliação.

A conjugação dos fatores intervenientes na ocorrência de um determinado condicionante e a respectiva perspectiva de ocorrência em função do tipo de maciço, da direção da foliação e da direção do túnel é apresentada nos QUADROS 2 e 3.

QUADRO 1 - Condicionantes geológicos e possíveis processos geradores de risco associados

Condicionante geológico	Descrição do condicionante	Processos associados prováveis
1	Diferentes litotipos, com características geotécnicas e geomecânicas distintas, ocupando diferentes porções da seção de escavação	Deformação diferencial do maciço
2	Faixas rochosas contínuas, de composição biotítica, alteradas, espessura e continuidade variáveis, mergulho subvertical, subparalelas ao eixo do túnel, interceptadas ou não pela seção de escavação	Instabilização da frente/teto do túnel ou das paredes da escavação
3	Faixas rochosas contínuas, de composição biotítica, alteradas, espessura e continuidade variáveis, mergulho subvertical, subortogonais a inclinadas em relação ao eixo do túnel	Instabilização da frente/teto do túnel
4	Faixas rochosas contínuas, de composição biotítica, alteradas, espessura e continuidade variáveis, mergulho subhorizontal	Instabilização do teto do túnel
5	Matacões de rocha, de dimensões variadas, imersos no solo de alteração interceptados ou não na seção de escavação do túnel	Instabilização da frente/teto do túnel e/ou das paredes da escavação
6	Juntas de alívio subhorizontais, andamento subparalelo ao topo rochoso, continuidade e espessura variáveis, com "preenchimento" de rocha alterada, interceptadas ou não na seção de escavação do túnel	Instabilização do teto do túnel
7	Estruturas de direção NNW-SSE, subparalelas à direção do túnel, interceptadas ou não na seção de escavação	Instabilização da frente/teto do túnel ou das paredes da escavação
8	Estruturas de direção NNW-SSE, subortogonais à direção do túnel, interceptadas na seção de escavação	Instabilização da frente/teto do túnel

Condicionante Geológico	GNAISSE BIOTÍTICO					GNAISSE GRANÍTICO					GNAISSE BANDADO				
	Muito Alta	Alta	Média	Baixa	Muito Baixa	Muito Alta	Alta	Média	Baixa	Muito Baixa	Muito Alta	Alta	Média	Baixa	Muito Baixa
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															

QUADRO 3 – Probabilidade qualitativa relativa de ocorrência dos condicionantes geológicos em função do tipo de maciço. Foliação subortogonal a inclinada à direção de desenvolvimento do túnel.

[illegible]

3.3 Susceptibilidade do Maciço Rochoso em Deflagrar os Processos Geradores de Risco

A análise das informações contidas no QUADRO 1 permite verificar que, devido às características geológicas de alguns condicionantes, as formas de ocorrência e os processos geradores de risco a eles associados dependem apenas do litotipo. É o caso dos condicionantes denominados "faixas rochosas contínuas de composição biotítica e mergulhos subhorizontais", "matacões de rocha" e "juntas de alívio subhorizontais", referenciados no QUADRO 1, respectivamente, como condicionantes geológicos 4, 5 e 6, cuja área de ocorrência e importância relativa é função apenas das características intrínsecas aos diferentes litotipos.

Para outros condicionantes, no entanto, a inter-relação entre o tipo de maciço, a estruturação geológica e a posição espacial da estrutura subterrânea define não só a área de ocorrência como também a importância relativa dos mesmos. É o caso, por exemplo, dos condicionantes geológicos "diferentes litotipos em diferentes porções da seção de escavação", "faixas rochosas contínuas de composição biotítica, mergulhos subverticais, subparalelas à direção do túnel" e "faixas rochosas contínuas de composição biotítica subverticais, subortogonais à direção do túnel", discriminadas no QUADRO 1, respectivamente, como condicionantes geológicos 1, 2 e 3.

Os lineamentos de direção NNW/SSE, por sua vez, são estruturas rúpteis associadas às etapas finais de consolidação do maciço, cuja ocorrência independe das características litológicas e estruturais dos litotipos. Estas estruturas podem ser relacionadas apenas de forma indireta com a direção do túnel através da foliação (condicionantes 7 e 8, descritos no QUADRO 1).

Verifica-se assim que diversos são os fatores, ou os atributos do meio físico, que regem a distribuição espacial, a importância e a probabilidade relativa de ocorrência dos diferentes condicionantes geológicos de projeto.

A integração, ou a conjugação de todos estes atributos, permite delimitar as áreas do maciço onde a probabilidade de ocorrência conjunta do maior número de condicionantes geológicos da estabilidade do maciço é maior.

Quanto maior for a probabilidade do maciço em apresentar o maior número de condicionantes de projeto, maior será a susceptibilidade do mesmo em deflagrar os processos geradores de risco.

A conjugação dos atributos do meio físico foi efetuada segundo o fluxograma da FIGURA 3, já referenciada, com o auxílio de matrizes de correlação. Este procedimento permitiu definir, inicialmente, as áreas onde cada um dos condicionantes geológicos de projeto têm, individualmente, maior probabilidade de ocorrer.

Aos atributos do meio físico foram conferidos valores, utilizados na ponderação e/ou no cruzamento dos parâmetros. Os valores mais elevados correspondem sempre à condições mais desfavoráveis e/ou representam maior probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico da estabilidade do maciço, ou seja, maior pré disposição do maciço em apresentar determinado condicionante geológico de projeto.

A susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco foi definida pela conjugação dos atributos: “compartimentação geológico-estrutural do maciço”, “susceptibilidade dos litotipos em desenvolver os condicionantes geológicos da estabilidade do maciço”, “relação entre a direção da foliação e a direção do túnel” e “importância da atuação da água”.

A compartimentação geológico-estrutural do maciço é o elemento básico de análise, utilizada para elaborar todos os prognósticos a respeito do comportamento do maciço, uma vez que esta compartimentação retrata as heterogeneidades do meio e espelha as características geológicas, estruturais e geomecânicas intrínsecas a cada compartimento. As designações e os pesos conferidos às variáveis deste atributo (TABELA 3), ponderam aspectos relativos à homogeneidade/heterogeneidade geológica, estrutural e geomecânica dos compartimentos lito-estruturais, além da maior ou menor pré disposição dos tipos de maciço em desenvolver os diferentes condicionantes geológicos da estabilidade.

TABELA 3 – Atributo “compartimentação geológico-estrutural do maciço”. Pesos conferidos às variáveis do atributo

Maciço gnáissico milonítico	Homogeneidade relativa	Susceptibilidade do maciço aos condicionantes geológicos	Peso conferido
Biotítico	Alta	Baixa	1
Granítico	Média	Média	2
Bandado	Baixa	Alta	3

A susceptibilidade dos litotipos em desenvolver os condicionantes geológicos da estabilidade do maciço, é um atributo que reflete a conjugação entre os condicionantes

geológicos de projeto e a pré disposição dos tipos litológicos que constituem o maciço em apresentar estes condicionantes (TABELA 4). Esta pré disposição é baseada nas características litológicas e estruturais dos mesmos, nas informações obtidas nas investigações geológicas e na tendência natural dos maciços em desenvolverem os referidos condicionantes.

A direção da foliação e a direção do túnel definem um ângulo, cujo valor, ao longo da rota do túnel, varia entre 0° e 70°. Isto significa que a foliação encontra-se ora em posição paralela, ora em posição subortogonal em relação à direção do túnel. Esta é uma condição que interessa de forma muito especial a determinados condicionantes enquanto que, para outros, tem importância nula ou muito reduzida. Este é o caso dos condicionantes “matacões de rocha”, “juntas de alívio subhorizontais” e “faixas rochosas contínuas de composição biotítica, mergulhos subhorizontais”. A relação entre a direção da foliação e a direção do túnel é um atributo que conjuga o ângulo entre as direções da foliação e do túnel com os condicionantes geológicos de projeto (TABELA 5).

Admitiu-se que para os condicionantes determinados pela relação entre as direções da foliação e do túnel, as situações mais críticas ocorrem quando o condicionante situa-se em posição paralela a subparalela ao eixo do túnel, ou seja, quando o ângulo formado entre as direções da foliação e do túnel for menor que 20°.

TABELA 4 – Atributo “susceptibilidade dos litotipos em desenvolver os condicionantes geológicos da estabilidade do maciço”. Pesos conferidos às variáveis do atributo

Maciço gnáissico milonítico	Condicionantes geológicos da estabilidade do maciço				
	Diferentes litotipos em diferentes porções da seção do túnel	Corpos de composição biotítica, subverticais	Corpos de Composição biotítica, Subhorizontais	Matacões de rocha	Juntas de alívio de tensão
Biotítico	1	1	1	1	1
Granítico	2	2	2	2	3
Bandado	3	3	3	3	2

A água influencia de forma significativa a estabilidade da escavação e, por conseqüência, no desenvolvimento dos processos geradores de risco. Atua, porém, de forma diferenciada sobre os condicionantes geológicos da estabilidade do maciço. O atributo “importância da atuação da água” (TABELA 6), pondera a ação da pressão e das vazões potenciais de maneira conjunta, diferenciando os condicionantes onde esta

ação é mais efetiva (com peso 3), daqueles onde esta ação é muito pequena ou nula (com peso 1).

TABELA 5 – Atributo “relação entre a direção da foliação e a direção do túnel”. Pesos atribuído às variáveis do atributo.

Ângulo entre as direções da foliação e do túnel	Condicionantes geológicas da estabilidade do maciço				
	Diferentes litotipos em diferentes porções da seção do túnel	Faixas biotíticas subverticais, subparalelas à direção do túnel	Faixas biotíticas subverticais, subortogonais à direção do túnel	Estruturas de direção NNW/SSE subparalelas à direção do túnel	Estruturas de direção NNW/SSE subortogonais à direção do túnel
< 20°	4	4	1	1	4
20° a 40°	3	3	2	2	2
40° a 60°	2	2	3	3	2
> 60°	1	1	4	4	1

TABELA 6 – Atributo “importância da atuação da água”. Pesos atribuído às variáveis do atributo.

	Condicionantes geológicas da estabilidade do maciço					
	Diferentes litotipos em diferentes porções da seção do túnel	Faixas biotíticas subverticais	Estruturas de direção NNW/SSE	Faixas biotíticas subhorizontais	Matacões de rocha	Juntas de alívio de tensão
Importância da atuação da água	2	3	3	2	1	2

Os atributos do meio físico foram inicialmente conjugados de modo a definir as áreas onde os condicionantes geológicos de projeto têm, individualmente, maior probabilidade de ocorrer.

Desta forma, os condicionantes geológicos “diferentes litotipos em diferentes porções da seção de escavação do túnel”, “faixas rochosas biotíticas subverticais paralelas à direção do túnel” e “faixas rochosas biotíticas subverticais subortogonais à direção do túnel”, ou seja, os condicionantes geológicos denominados 1, 2 e 3, no QUADRO 1, têm sua importância, distribuição e probabilidade relativa de ocorrência (FIGURAS 15 e 16), refletidas através da conjugação dos atributos “compartimentação geológico-estrutural do maciço” e “susceptibilidade dos litotipos em desenvolver os

condicionantes geológicos da estabilidade do maciço”, ponderados pelo parâmetro “relação entre as direções da foliação e a direção do túnel”.

As FIGURAS 17 e 18 apresentam a planta de distribuição dos condicionantes geológicos denominados “faixas rochosas biotíticas contínuas de mergulho subhorizontal”, “matacões de rocha” e “juntas de alívio subhorizontais” (condicionantes geológicos 4, 5 e 6, do QUADRO 1). A presença destes condicionantes no maciço assim como a importância relativa dos mesmos é função apenas das características intrínsecas aos diferentes litotipos enquanto que a variação na probabilidade de ocorrência do condicionante é produto da conjugação do parâmetro que mede a homogeneidade e heterogeneidade do maciço, evidenciado pelo atributo “compartimentação geológico-estrutural do maciço” e a “susceptibilidade dos litotipos em desenvolver os condicionantes geológicos da estabilidade do maciço”.

A ocorrência dos lineamentos de direção NNW/SSE independe das características litológicas e estruturais dos litotipos. Dadas as características geotécnicas do maciço na região sob influência destas estruturas, estas tornam-se importantes condicionantes geológicos da estabilidade e podem ser relacionadas, de forma indireta com a direção do túnel, através da foliação. Desta forma, através da relação entre a direção da foliação e a direção do túnel, pode-se verificar, indiretamente, as áreas de maior probabilidade de ocorrência dos condicionantes 7 (estruturas de direção NNW/SSE subparalelas à direção do túnel) e 8 (estruturas de direção NNW/SSE subortogonais à direção do túnel), apresentado nas (FIGURAS 19 e 20).

Os mapas que indicam as áreas de maior probabilidade de ocorrência individual de cada um dos condicionantes geológicos de projeto configuram cenários que, se somados, conduzem a um novo cenário onde é possível delimitar as áreas do maciço onde é alta a probabilidade de ocorrer o maior número de condicionantes.

No entanto, a susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco depende, sobretudo, da atuação da água, cuja ação é fundamental. A água é um elemento extremamente importante no desenvolvimento dos processos geradores de risco. Porém, atua de forma bastante distinta sobre os diferentes condicionantes de projeto.

FIGURA 15 – Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência dos condicionantes geológicos denominados “diferentes litotipos em diferentes porções da seção do túnel” e “faixas rochosas biotíticas contínuas, subverticais, paralelas à direção do túnel”

FIGURA 16 – Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico denominado “faixas rochosas biotíticas contínuas, subverticais, subortogonais à direção do túnel”

FIGURA 17 – Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência dos condicionantes geológicos denominados “matacões de rocha” e “faixas rochosas biotíticas contínuas, subhorizontais”

FIGURA 19 – Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico denominado “estruturas de direção NNW/SSE, subparalelas à direção do túnel”

FIGURA 20 – Área de distribuição e probabilidade relativa de ocorrência do condicionante geológico denominado “estruturas de direção NNW/SSE, subortogonais à direção do túnel”

Nos condicionantes geológicos denominados “faixas rochosas biotíticas contínuas, mergulhos subverticais” e “estruturas de direção NNW/SSE”, por exemplo, a importância da água é significativa pois, além de se constituírem em elementos armazenadores e controlarem grande parte do fluxo, estes condicionantes tendem a induzir importantes empuxos d’água no interior do maciço. Por outro lado, a atuação da água é nula ou muito reduzida na instabilização de “matacões de rocha”.

Devido ao caráter relativamente descontínuo das estruturas “juntas de alívio de tensão” e “faixas rochosas biotíticas contínuas, mergulhos subhorizontais” em maciços muito heterogêneos, a atuação da água nestes condicionantes pode ser classificada como moderada.

As áreas do maciço onde a probabilidade de ocorrer o maior número de condicionantes é alta, ponderadas com a importância relativa da atuação da água, definem a susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco.

As áreas com alta susceptibilidade em deflagrar processos geradores de risco (FIGURA 21), correspondem àquelas de ocorrência dos maciços bandados e/ou graníticos, nas regiões onde a direção do túnel é subparalela à direção da foliação. Nestas áreas, há, efetivamente, maior pré disposição do maciço rochoso em desenvolver os condicionantes geológicos “diferentes litotipos em diferentes porções da seção de escavação do túnel”, “faixas rochosas biotíticas contínuas, subverticais, paralelas à direção do túnel”, “faixas rochosas biotíticas contínuas, subhorizontais”, “matacões de rocha”, “juntas de alívio de tensão subhorizontais”, “estruturas de direção NNW/SSE subortogonais à direção do túnel”, intrínsecos àqueles tipos de maciço e/ou à posição do túnel em relação à foliação.

Secundariamente, pode-se observar (FIGURA 21) áreas de susceptibilidade média, representadas por maciços constituídos predominantemente por gnaisses graníticos, onde a direção do túnel encontra-se subparalela ou subortogonal à direção da foliação. Nas áreas onde a direção do túnel é subortogonal à direção da foliação, os condicionantes geológicos com maior probabilidade de ocorrer correspondem a “estruturas de direção NNW/SSE subparalelas à direção do túnel”, “juntas de alívio de tensão subhorizontais” e “faixas rochosas biotíticas contínuas, subverticais, subortogonais à direção do túnel”. Nas regiões onde a direção do túnel é subparalela à direção da foliação, o maciço apresenta maior pré disposição aos condicionantes “estruturas de direção NNW/SSE subortogonais à direção do túnel”, “juntas de alívio de

FIGURA 21 – Susceptibilidade do maciço rochoso em deflagrar os processos geradores de risco

tensão subhorizontais” e “faixas rochosas biotíticas contínuas, subverticais, subparalelas à direção do túnel”.

As demais áreas, de susceptibilidade baixa a muito baixa, correspondem às áreas de ocorrência dos maciços biotíticos e/ou aquelas regiões onde o ângulo formado entre a direção do túnel e a direção da foliação situa-se entre 20° e 60°.

3.4 Caracterização da Ocupação Urbana em Superfície

A área da cidade de São Paulo sob a qual o túnel vai ser implantado é densamente urbanizada.

A ocupação urbana é caracterizada por uma seqüência de áreas residenciais e/ou comerciais, entrecortadas por ruas e avenidas com intensidades de trânsito diferenciadas, além de uma extensa rede de utilidades públicas subterrâneas (água, luz, telefone, esgoto, etc.).

Destaca-se neste cenário a presença do canal do rio Pinheiros e, em sua margem direita, a via férrea por onde circulam os trens da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM).

A intensa e descontrolada ocupação urbana não preservou nenhuma área ocupada por matas, parques, edifícios históricos, etc., ou mesmo edificações que se destacam por seu valor arquitetônico.

Analisando-se o traçado do túnel e a ocupação em superfície, verifica-se que, afora o rio Pinheiros e as suas margens onde correm os trens da CPTM, a ocupação predominante em alguns trechos, é caracterizada por imóveis residenciais e/ou comerciais, onde as ruas ocupam proporções restritas em relação à área ocupada pelas edificações.

Em outros trechos, o túnel esta sotoposto ou cruza algumas das mais importantes avenidas da cidade de São Paulo, tais como as avenidas Régis Bittencourt, Vital Brasil e Marginais do rio Pinheiros.

Estas avenidas são grandes corredores viários, com intenso fluxo de veículos, que fazem ligação entre diferentes regiões da cidade, entre diferentes cidades do estado e do país, ou mesmo ainda entre o Brasil e países vizinhos, notadamente do MERCOSUL. A ocupação residencial e/ou comercial restringe-se apenas às faixas lindeiras destas grandes avenidas.

Conforme o tipo de ocupação urbana, o trecho em análise pode ser subdividido em subtrechos, conforme apresentado no QUADRO 4.

Uma rápida avaliação da ocupação urbana permite inferir a magnitude das conseqüências, que podem ser consideradas muito diferenciadas conforme a área atingida por um eventual incidente no túnel, caso os reflexos do mesmo atinjam a superfície.

Se o incidente ocorrer em áreas residenciais e/ou comerciais, os prejuízos decorrentes serão basicamente de ordem social e monetária. Os reflexos no restante da cidade, além das imediações do incidente, são caracterizados principalmente por pequenos transtornos no trânsito, visto que estas áreas normalmente são cortadas por ruas de pequeno movimento, com características locais, apresentando, quase sempre, rotas alternativas de fluxo de veículos.

No entanto, se um incidente no túnel ocorrer sob uma das grandes avenidas, os reflexos se estenderão praticamente por toda a cidade, pois estas avenidas concentram grande parte do tráfego viário. Neste caso, as conseqüências são principalmente de ordem monetária e social. Os reflexos diretos em imóveis residenciais e/ou comerciais serão, em princípio, de pequena monta.

Portanto, caso ocorra um incidente no túnel, os prejuízos em superfície restringem-se basicamente a prejuízos econômicos e sociais derivados de eventuais perdas de imóveis residenciais e/ou comerciais, ou devido às perdas indiretas a que a população da cidade será submetida com o aumento dos congestionamentos de trânsito, decorrentes da eventual interrupção de alguma das principais vias de tráfego da cidade.

Ressalta-se que incidentes desta natureza podem ter como conseqüência a morte de pessoas, embora estas sejam mais raras.

Os prejuízos relacionados com as complicações de trânsito são decorrentes da eventual interrupção de alguma das principais vias de tráfego da cidade, podendo ser classificadas em diferentes níveis, segundo a magnitude esperada dos congestionamentos. Estes atingem indistintamente toda a população da cidade, gerando perdas econômicas e sociais significativas.

As conseqüências potenciais a que está sujeita a área sobre a qual o túnel vai ser implantado podem ser avaliadas através da conjugação dos atributos “uso e ocupação do solo em superfície” (TABELA 7) e “intensidade do trânsito” nas ruas e

QUADRO 4 - Caracterização da ocupação urbana na superfície nos entornos da área de desenvolvimento do túnel

Subtrecho	Ocupação em superfície	Trânsito nas ruas e avenidas
Inicia entre as ruas Padre Carvalho e Ferreira de Araújo. Termina na confluência com a Avenida Marginal do Rio Pinheiros (sentido bairro - centro)	Ocupação residencial e comercial intensa. Imóveis com 2 pavimentos perfazem a maioria das construções. Alguns imóveis com mais de 2 pavimentos. Ruas sobre o túnel na superfície, perpendiculares às principais, ocupam < 10% do comprimento do túnel no subtrecho	Fluxo de veículos e de pessoas que se dirigem para o comércio local ou o fazem como ligação com outras rotas de fluxo. Apresenta rotas alternativas de fluxo, mesmo para os ônibus que ali circulam
Compreende as pistas (expressa e local) da Avenida Marginal do Rio Pinheiros nos dois sentidos, inclusive a travessia do rio	Ocupação comercial apenas nas zonas limítrofes da avenida	Corredor de fluxo de veículos que fazem a ligação entre zonas da cidade e/ou do país e linha ferroviária da CPTM. Praticamente não há rotas alternativas ao fluxo
Inicia na confluência da Avenida Marginal do Rio Pinheiros (sentido bairro-centro). Termina na confluência da Avenida Waldemar Ferreira	Ocupação residencial e comercial pouco intensa. Poucos imóveis com 1 e 2 pavimentos perfazem a maioria das construções. Muitas áreas desocupadas. Não há imóveis com mais de 2 pavimentos. Ruas sobre o túnel ocupam cerca de 15 % do comprimento do túnel no subtrecho	Apresenta pequeno trânsito de veículos e de pessoas
Compreende o trecho sob a Avenida Waldemar Ferreira	Ocupação comercial apenas nas zonas limítrofes da avenida	Corredor de trânsito de intensidade média. Concentra maior fluxo de veículos apenas em horários de pico
Inicia na Avenida Waldemar Ferreira e termina na confluência com a Avenida Vital Brasil	Ocupação residencial, com poucas lojas comerciais. Imóveis com 1 e 2 pavimentos perfazem maioria das construções. Grandes áreas ocupadas por estacionamentos. Imóveis com mais de 2 pavimentos são raros. Ruas sobre o túnel correspondem a cerca de 10 % do comprimento do túnel no subtrecho	Pequeno fluxo de veículos, apenas para trânsito local e/ou com rota alternativa de fluxo. Apresenta pequeno fluxo de pessoas

QUADRO 4 - Caracterização da ocupação urbana na superfície nos entornos da área de desenvolvimento do túnel (continuação)

Subtrecho	Ocupação em superfície	Trânsito nas ruas e avenidas
Inicia na Avenida Vital Brasil e termina na confluência da rua Dráusio com a rua Reação	Ocupação comercial predominante. Imóveis com 1 e 2 pavimentos e instalações bancárias perfazem maior parte das construções. Grandes áreas ocupadas por estacionamentos Ruas sobre o túnel correspondem a cerca de 50 % do comprimento do túnel no subtrecho	Grande fluxo de veículos e de pessoas. Corredor de fluxo que une diferentes zonas da cidade. Apresenta algumas rotas alternativas de fluxo
Inicia na rua Reação e termina na Avenida Sapetuba.	Ocupação residencial, com pouco comércio. Imóveis com 1 ou 2 pavimentos perfazem maioria das construções. Ruas sobre o túnel correspondem a cerca de 20 % do comprimento do túnel no subtrecho	Apresenta pequeno fluxo de veículos e de pessoas
Compreende o trecho sob a Avenida Sapetuba	Não há ocupação residencial e comercial. Nas áreas limítrofes, poucos imóveis comerciais com 1 e 2 pavimentos	Corredor de fluxo de veículos que une diferentes cidades do estado e do país. Apresenta poucas rotas alternativas de fluxo
Inicia na Avenida Sapetuba e termina na Avenida Francisco Morato, na confluência desta com a Avenida dos Três Poderes	Ocupação residencial e pouca atividade comercial. Imóveis com 1 a 3 pavimentos (maioria com 2 pavimentos) perfazem maioria das construções. Apenas 1 imóvel com 4 pavimentos. Ruas sobre o túnel correspondem a cerca de 5 % do comprimento do mesmo no subtrecho	Trânsito com intensidade média de veículos e de pessoas. Apresenta rotas alternativas de fluxo
Corresponde ao trecho ao longo da Avenida Francisco Morato. Inicia na Avenida dos Três Poderes e termina na altura da rua General Sena de Vasconcelos	Ocupação residencial e comercial nas áreas limítrofes, com maioria dos imóveis com 1 e 2 pavimentos. Alguns imóveis com 3 e 4 pavimentos, de instalações bancárias e comerciais	Trânsito muito intenso, compreendendo corredor de tráfego que une diferentes regiões do estado, do país e outros países. Apresenta poucas rotas alternativas de tráfego

avenidas sob as quais o túnel vai ser construído (TABELA 8), conforme apresentado no fluxograma da FIGURA 3, já referenciado.

As áreas onde as consequências tendem a ser mais adversas (FIGURA 22), correspondem àquelas ocupadas pelo rio Pinheiros e linha férrea da CPTM, e/ou áreas

de elevada a média intensidade de trânsito de veículos, em zonas com grande atividade comercial. Ao contrário, nas áreas com pequena intensidade de tráfego, em zonas residenciais ou pouco ocupadas as consequências em superfície tendem a ser menos gravosas.

TABELA 7 – Atributo “uso e ocupação do solo em superfície”. Pesos conferidos às variáveis do atributo.

	Uso e ocupação do solo em superfície				
	Comercial predominante	Residencial predominante	Pouco ocupada	Rio Pinheiros	Linha férrea da CPTM
Peso atribuído	3	2	1	7	6

TABELA 8 – Atributo “Intensidade do trânsito”. Pesos conferidos às variáveis do atributo.

	Intensidade do trânsito				
	Muito intensa	Intensa	média	baixa	muito baixa
Peso atribuído	5	4	3	2	1

3.5 Zoneamento de Risco ao Longo da Rota do Túnel

Elaborar um zoneamento de risco compreende estabelecer uma diferenciação entre as diversas áreas expostas ao risco, hierarquizando-as em diferentes níveis de risco, segundo critérios pré definidos.

Os níveis de risco são usualmente determinados pela conjugação entre a susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco e as consequências potenciais advindas da deflagração desses processos. Áreas com grande susceptibilidade em deflagrar processos geradores de risco aliadas a severas consequências potenciais configuram zonas de alto risco. Em contraposição, as áreas de baixo risco são caracterizadas por maciços pouco susceptíveis a deflagrar processos geradores de risco associados a consequências potenciais pouco severas.

FIGURA 22 – Conseqüências potenciais em superfície

Os níveis de risco a que as áreas circunvizinhas à rota do túnel estarão submetidas durante a sua construção foram estabelecidos segundo este critério, ou seja, conjugando-se a susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco e as consequências potenciais em superfície, decorrentes da deflagração desses processos.

Os atributos do meio físico foram conjugados de modo a permitir identificar áreas onde o maciço apresentasse diferentes susceptibilidades à deflagração dos processos geradores de risco, conforme apresentado na FIGURA 21. Da mesma forma, os parâmetros relativos ao uso e ocupação do solo também foram conjugados de maneira a permitir classificar a região sotoposta ao túnel, em diferentes níveis de consequências potenciais (FIGURA 22).

A conjugação destes parâmetros, conforme fluxograma da FIGURA 3, conduz ao zoneamento e hierarquização do risco ao longo da rota do túnel, conforme apresentado na FIGURA 23.

Verifica-se que o trecho analisado pode ser caracterizado como de risco médio predominante, com regiões subordinadas de alto ou baixo risco.

As áreas de alto risco compreendem a passagem sob o rio Pinheiros, a região das marginais do rio Pinheiros e a passagem sob a via férrea da CPTM.

A única área de baixo risco que deve ser ressaltada é aquela que compreende o trecho entre a marginal do rio Pinheiros (sentido centro-bairro) e a avenida Waldemar Ferreira, caracterizada por baixa ocupação, praticamente sem construções (área com muitos terrenos baldios utilizados para estacionamentos), e ruas com baixíssima intensidade de trânsito.

FIGURA 23 – Zoneamento de risco ao longo da rota do túnel

4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO DE DECISÃO

A identificação, a caracterização e a hierarquização do nível de risco ao longo da rota do túnel, assunto discutido no item anterior, é parte do processo de gerenciamento de risco que deve permitir, ao final da sua implementação, elaborar uma estratégia para o projeto e a construção da obra, que reduza ou incorpore o risco.

Como estratégia para redução do risco, pode-se adotar uma das formas, ou ambas, de gerenciamento de risco: reduzir as incertezas através da obtenção de um maior número de informações ou limitar o impacto das incertezas no desempenho técnico e econômico do projeto (GILBERT e McGRATH, 1996).

Em geologia de engenharia, a redução de incertezas através da obtenção de mais informações significa o desenvolvimento de novas investigações, ou de investigações complementares, que possam conduzir a um detalhamento das propriedades e dos parâmetros dos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço. Técnicas de tratamento e de análise dos dados, tais como as análises estatísticas e probabilísticas, podem emprestar maior confiabilidade aos resultados obtidos com as investigações.

Limitar o impacto das incertezas no desempenho técnico-econômico do projeto indica a necessidade de atuação sobre as conseqüências decorrentes da deflagração dos processos geradores de risco. As conseqüências podem ser minimizadas por meio de medidas que procurem evitar a deflagração dos processos geradores de risco, adotando-se projetos que, em princípio, podem parecer mais conservadores ou de custos mais elevados.

A adoção de uma estratégia de decisão depende da verificação de um incremento nos benefícios. Este incremento pode ser alcançado pela redução do impacto das conseqüências no desempenho do projeto, por meio de medidas mitigadoras que minimizem tais impactos, ou reduzindo o custo do projeto, considerando-se neste o custo relativo das conseqüências adversas.

A estratégia a adotar é um problema de decisão onde os elementos, ou a conjugação dos elementos que participam da resolução do problema, têm comportamento incerto.

A ferramenta adequada para se efetuar escolhas lógicas em situações complexas e incertas é a Análise de Decisão (CARVALHO, 1996). O objetivo da

Análise de Decisão é prover racionalidade para a tomada de decisões sob condições de risco e incerteza (SLOVIC *et al.*, 1974). Para tanto, utiliza da lógica para reduzir um problema complexo à sua forma mais simples, através da construção de um modelo de decisão que captura a estrutura do problema, da teoria das probabilidades para incorporar todo o conhecimento disponível na quantificação das incertezas e da teoria das utilidades para comparar e hierarquizar conseqüências (MATHESON e HOWARD, 1977, apud CARVALHO, 1996). É normativa no seu intento, preocupando-se em descrever o curso das ações de forma a refletir da melhor maneira possível os objetivos, expectativas e valores do responsável pela tomada das decisões (SLOVIC *et al.*, 1974), permitindo medir e interpretar o impacto das incertezas na decisão, evitando que este impacto seja relegado à intuição do(s) responsável(is) pela decisão (CARVALHO, 1996).

A construção do modelo de decisão compreende a definição de vários parâmetros que possibilitam capturar perfeitamente a estrutura do problema, definindo-o e externando-o de maneira inequívoca, porém de forma simples e completa, refletindo claramente o objetivo a ser alcançado.

O objetivo a alcançar, ou a decisão a ser tomada, é o primeiro parâmetro a ser definido pois dele depende toda a estrutura do modelo de decisão.

Em engenharia de túneis a decisão básica se resume, em última análise, à escolha do método construtivo. Esta é a decisão a partir da qual é possível estabelecer todos os demais procedimentos e decisões relativas ao projeto, tais como, quantidades de serviços, avaliação dos demais riscos envolvidos na construção da obra, estabelecer as condições contratuais, etc.

Em continuidade à construção do modelo de decisão, e em consonância com as estratégias adotadas para redução do risco, é fundamental definir a necessidade, ou não, de investigações complementares, definir os métodos construtivos que serão submetidos à avaliação no modelo de decisão, especificar as conseqüências potenciais que serão consideradas assim como as unidades de medida que serão utilizadas para medir estas conseqüências.

Segundo CARVALHO (1996), a construção do modelo de decisão compreende a identificação de todas as variáveis intervenientes no problema, a caracterização das relações lógicas existentes entre essas variáveis e a expressão dessas relações em termos matemáticos formais.

4.1 Definição da Necessidade de Investigações Complementares

Em geologia de engenharia é extremamente difícil definir as técnicas e os métodos de investigação mais adequados a utilizar em um determinado projeto, assim como a avaliar as investigações realizadas e os resultados obtidos. Da mesma forma, é extremamente difícil avaliar a necessidade de novas investigações uma vez que, a rigor, não há garantias de que as condições geológicas, geotécnicas, hidráulicas e geomecânicas do maciço venham ser perfeitamente diagnosticadas e caracterizadas, independente dos procedimentos de investigação utilizados.

Não há regras e/ou padrões que estabeleçam qual a melhor técnica ou o melhor método de investigação a utilizar, o número de sondagens mais adequado, o espaçamento entre as sondagens, as profundidades a alcançar em relação à obra, quais ensaios executar, etc.

Os artigos “Just a few more tests and we’ll be sure” (BAECHER, 1984) e “Just one more boring, and we’ll know for sure” (LIAO *et al.*, 1996) ilustram de forma bastante clara os pontos de vista e as filosofias que cercam as investigações geológicas para fins de engenharia civil.

No entanto, uma avaliação cuidadosa das investigações realizadas e o julgamento da necessidade de investigações para complementar os estudos já realizados é parte da estratégia de redução de riscos. Esta avaliação é fundamental visto que, no contexto da estratégia de decisão, a obtenção de informações que possam conduzir a um detalhamento das propriedades e parâmetros do maciço rochoso e dos condicionantes geológicos da estabilidade significa redução de incertezas e, portanto, redução de riscos. Novas investigações devem ser realizadas sempre que o conhecimento do arcabouço litológico e estrutural do maciço for julgado insuficiente.

Estas novas investigações podem ser, simplesmente, a execução de sondagens mecânicas complementares ou, quando as necessidades de projeto assim o exigir, execução de investigações mais demoradas e dispendiosas como, por exemplo, a escavação de poços e/ou túneis pilotos para prospecção do maciço, ensaios especiais “in situ”, etc.

A avaliação da suficiência e, de certa forma, da qualidade das investigações em obras subterrâneas tem sido executada analisando-se basicamente dois parâmetros: o

comprimento de sondagens mecânicas executadas em relação ao comprimento total do túnel e o custo das investigações em relação ao custo da obra orçado em projeto.

Estudos conduzidos pelo USNC/TT em 1984 (apud PARKER, 1997), que reuniu dados coletados junto a concessionários, projetistas e construtores, relativos a 84 túneis construídos em regiões não montanhosas dos Estados Unidos, demonstraram que o espaçamento médio entre as sondagens praticado era da ordem de 86 m; o comprimento total das sondagens executadas em relação ao comprimento total do túnel era da ordem de 0,42 m/m de túnel; em média, o custo das investigações geotécnicas foi da ordem de 0,75 % do custo da construção; uma quantidade inadequada de sondagens resulta em acréscimos significativos nos custos dos projetos.

Com base nos resultados obtidos (FIGURAS 24 e 25) o USNC/TT (1984, apud PARKER, 1997) recomenda que o valor a ser dispendido em investigações deve situar-se em cerca de 3% do custo civil do empreendimento e estabelece como adequada uma metragem de sondagem mecânica equivalente a 1,5 vezes o comprimento do túnel a ser construído.

De maneira geral o meio técnico reconhece como válidas estas orientações, lembrando que valores muito inferiores ao recomendado podem conduzir a custos substancialmente diferentes daqueles previstos em projeto (PELIZZA, 1996).

Não há critérios formalmente estabelecidos para o desenvolvimento de investigações orientadas exclusivamente pelo contexto geológico (métodos e técnicas de investigação, quantidade de sondagens, geometria, etc.). Há apenas orientações vagas, sugerindo alteração nos critérios recomendados pelo USNC/TT, em função da complexidade geológica e/ou do projeto (PARKER, 1997; VAZ, 1999).

Para o desenvolvimento do projeto da Linha 4, do METRO, o comprimento das sondagens atingiu, em média, 1,5 vezes o comprimento do túnel. Em termos monetários foram dispendidos cerca de US\$ 1,2 milhões, correspondentes a cerca de 0,2 % do custo das obras civis orçadas em projeto básico (VAZ, 1999).

Para o presente estudo, as investigações relativas ao trecho em questão foram analisadas e, com base nestas análises, foi desenvolvida uma ferramenta para auxiliar a definir, no contexto da análise de decisão, a necessidade, ou não, de execução de novas investigações.

FIGURA 24 – Comprimento total de sondagens perfurado em relação ao comprimento do túnel, conforme levantamento do USNC/TT, 1984 (modificado de PARKER, 1997).

FIGURA 25 – Custo total das investigações em relação aos custos básicos da construção do túnel previsto em projeto, conforme levantamento efetuado pelo USNC/TT em 1984 (modificado de PARKER, 1997)

Foram definidos e avaliados os parâmetros, ou atributos, “densidade de investigação” e “geometria das sondagens”, calculados para cada compartimento lito-estrutural do maciço, e, posteriormente conjugados conforme o fluxograma apresentado na FIGURA 3.

Da mesma forma que nas análises anteriores, envolvendo os parâmetros do meio físico e os do uso e ocupação do solo, os pesos mais elevados conferidos aos atributos significam condições mais desfavoráveis e/ou indicam maior probabilidade de ocorrência dos mesmos.

O atributo “densidade de amostragem” relaciona a metragem de sondagem perfurada em relação ao comprimento do túnel. Este é o parâmetro quantitativo definido pelo USNCTT (1984) que, como visto, é freqüentemente utilizado na engenharia de túneis para avaliação da suficiência e qualidade das investigações. A densidade de amostragem foi calculada para cada compartimento lito-estrutural e foi considerada adequada quando o valor obtido foi superior a 1,0 m de sondagem por metro de túnel (TABELA 9).

TABELA 9 – Atributo “densidade de amostragem”. Pesos conferidos ao atributo

Densidade de amostragem (m de sondagem/m de túnel)	Classificação	Peso Atribuído
< 0,50	inadequada	3
0,50 – 1,00	Pouco adequada	2
>1,00	adequada	1

O atributo “geometria das sondagens” analisa a geometria espacial das sondagens, em vista da disposição destas em relação à direção da foliação e à direção do túnel e reflete o espaçamento médio entre as sondagens, medido em plano perpendicular à direção da foliação. As classes de espaçamento médio entre as sondagens (TABELA 10) foram estabelecidas em função das espessuras máximas dos corpos rochosos (avaliados no subitem 3.2.2), e do diâmetro do túnel (admitiu-se como adequado um espaçamento médio inferior a cerca de dois diâmetros do túnel). Admitiu-se que um espaçamento médio entre sondagens menor que 20,0 m, medido na direção perpendicular à direção da foliação, corresponde a um espaçamento adequado, capaz de identificar as variações lito-estruturais do arcabouço geológico do maciço.

TABELA 10 – Atributo “geometria das sondagens”. Pesos conferidos ao atributo

Espaçamento médio entre as sondagens (m)	Classificação	Peso atribuído
< 20,00	Adequado	1
20,00 – 50,00	Pouco adequado	2
> 50,00	Inadequado	3

A conjugação dos atributos “densidade de amostragem” e “geometria das sondagens” permite definir regiões do maciço onde a qualidade da investigação pode ser considerada adequada, por exemplo, quando a densidade de amostragem for maior que 1,0 m de sondagem/m de túnel e o espaçamento médio entre as sondagens, medido perpendicularmente à direção da foliação, for menor que 20,0 m, diferenciando-as daquelas onde a conjugação dos atributos indicou que a qualidade das investigações pode ser considerada inadequada, frente ao critério aqui estabelecido e frente também à heterogeneidade lito-estrutural do maciço.

De maneira geral, as áreas onde a direção do túnel é paralela à direção da foliação e/ou as áreas próximas das estações resultaram como investigadas de forma adequada (FIGURA 26), devido à maior densidade de investigação nas imediações das estações e/ou devido ao menor espaçamento entre as sondagens, produto da paralelização entre o túnel e a foliação.

As áreas onde a análise das investigações resultaram como inadequadas correspondem, de maneira geral, aos trechos onde o eixo do túnel encontra-se em posição inclinada a subortogonal em relação à direção da foliação.

Estas avaliações podem ser estendidas para outros aspectos de interesse ao projeto analisando-se, por exemplo, as investigações em relação à susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco (FIGURA 27), ou em relação ao zoneamento de risco (FIGURA 28). Estes produtos são obtidos pela conjugação dos mapas de susceptibilidade do maciço em desenvolver os processos geradores de risco e do mapa de risco com o mapa de qualidade das investigações.

Depreende-se da análise dos mapas das FIGURAS 27 e 28, que: nas áreas de média e alta susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco a qualidade das investigações pode ser considerada como pouco adequada a inadequada; em relação ao risco, as investigações podem ser consideradas como inadequadas em grande parte do trecho analisado.

FIGURA 26 – Qualidade das investigações. Relação entre densidade de amostragem e geometria das sondagens

FIGURA 27 – Qualidade das investigações em função da susceptibilidade do maciço rochoso em desenvolver os processos geradores de risco

FIGURA 28 – Qualidade das investigações em função do risco

Constitui exceção ao quadro geral, as investigações executadas nas áreas das estações. Em quaisquer dos critérios adotados, as análises resultam em investigações adequadas, pelos motivos já apresentados.

Nas áreas onde a análise das investigações resultaram como inadequadas, pode ser conveniente o desenvolvimento de novas campanhas de investigação, ou de investigações complementares, quesito que deve ser avaliado durante o processo de decisão. Estas áreas correspondem, de maneira geral, aos trechos de risco médio e, eventualmente alto, onde o eixo do túnel encontra-se em posição inclinada a subortogonal em relação à direção da foliação ou às áreas de alta a média susceptibilidade ao desenvolvimento dos processos geradores de risco.

Caso seja julgada necessária a execução de investigações adicionais e/ou complementares, estas podem ser conduzidas a partir da superfície do terreno, situação a que a engenharia nacional está mais familiarizada, ou a partir da frente de escavação, durante a construção do túnel.

A execução de investigações na frente da escavação é pouco comum na engenharia nacional. No entanto, esta é uma prática, constituindo uma orientação geral na engenharia de túneis na Noruega. Estas investigações consistem, usualmente, de uma a quatro perfurações a rotopercussão, com comprimento típico da ordem de 30 m, distribuídas em padrão regular (AAGAARD e BLINDHEIM, 1999). Em vários projetos, as investigações executadas a partir da frente de escavação superam de forma considerável o total de sondagens executadas nas etapas iniciais.

As investigações complementares conduzidas a partir da superfície do terreno devem incluir, necessariamente, a execução de sondagens rotativas inclinadas, cuja distribuição e orientação espacial privilegie a geometria do arcabouço litológico e estrutural do maciço, assim como a relação deste com a geometria da obra a ser implantada. Ensaio geofísicos, em particular ensaios de sísmica de reflexão podem complementar as investigações, pois permitem uma amostragem contínua ao longo da linha de ensaio, auxiliando a dirimir dúvidas quanto ao contorno estrutural e/ou aprofundamentos repentinos do topo rochoso, presença de matacões, etc.

É reconhecido que as investigações para obras subterrâneas devem ser dirigidas para atender os diferentes objetivos e complexidade dos projetos (obras viárias, metroviárias, estocagem subterrânea, instalações de centrais elétricas, instalações militares, etc.), ou as necessidades do método construtivo (escavações a

fogo, TBM, *shield*, etc.) ou ainda as dimensões da cavidade a ser aberta. No entanto, as investigações para atender aspectos e detalhes específicos de cada projeto (por exemplo, propriedades térmicas do maciço rochoso para estocagem de gás, dureza e abrasividade da rocha para escavação com máquinas do tipo TBM etc.), não devem se sobrepor às investigações para determinação dos condicionantes geológicos da estabilidade da escavação que, em última análise, podem definir o sucesso ou o insucesso da obra.

4.2 Definição dos Métodos Construtivos

Em engenharia de túneis a decisão básica se resume à escolha do método construtivo. Esta é a decisão a partir da qual é possível estabelecer todos os demais aspectos relativos ao projeto e a construção da obra.

Em áreas urbanas é necessário distinguir os túneis construídos a céu aberto daqueles construídos por escavação subterrânea.

Os túneis a céu aberto podem ser construídos de várias maneiras, através de métodos construtivos genericamente denominados de "cut and cover". Nestes processos é efetuada uma escavação a céu aberto (trincheira), com proteção contra desmoronamentos, ao longo da qual é construída a estrutura que abriga o túnel. Após o término da construção o terreno é recomposto até a superfície, resultando em uma estrutura subterrânea, também conhecida como túnel falso (MAZO, 2001). Uma variação deste, é o denominado método "cover and cut". Neste método, em uma trincheira é construída uma estrutura a céu aberto, dimensionada para suportar todas as solicitações de uma escavação subterrânea. Posteriormente, o terreno em superfície é recomposto, e o túnel é escavado na área interna, sotoposto à estrutura construída anteriormente.

Os métodos de escavação subterrânea podem ser, genericamente, divididos em dois grandes grupos: as escavações a fogo e as escavações mecanizadas (FRANCISS e ROCHA, 1998).

As escavações subterrâneas "a fogo" são amplamente utilizadas e, dependendo do tipo de maciço, da extensão do túnel ou das dimensões da cavidade, podem ser mais viáveis em termos técnicos e econômicos. No caso de túneis metroviários, onde são comuns seções da ordem de 80 m² a 100 m², utiliza-se, mais freqüentemente,

escavação parcializada, com escavação plena da abóbada, seguida da escavação da bancada (FRANCISS e ROCHA, 1998).

Os métodos mecanizados de escavação de túneis surgiram no início do século XIX. Em função da necessidade de escavação em terrenos instáveis, alcançaram grande impulso a partir da segunda metade do século XX devido, principalmente, à necessidade de desenvolver trabalhos em condições mais salubres e seguras. Estas necessidades provocaram avanços significativos na tecnologia dos equipamentos fazendo com que, atualmente, as escavações mecanizadas possam competir técnica e economicamente, com as escavações a fogo (FRANCISS e ROCHA, 1998).

Os equipamentos para escavação de túneis em rochas de alta resistência, denominados genericamente de TBM (sigla que deriva do termo "Tunnel Boring Machine"), são máquinas cujo avanço é obtido pela aplicação de empuxos longitudinais (a reação é aplicada na rocha através de sapatas extensíveis, os "grippers"), combinados a esforços rotativos na "cabeça de corte". Em geral são equipamentos de frente aberta, não protegidos por anéis de revestimento, projetados para escavar seções plenas com área superior a 100 m², em rochas com elevada resistência à compressão uniaxial (FRANCISS e ROCHA, 1998). Devido às necessidades e uso crescentes, os TBMs mais modernos incorporam elementos para proteção de partes da máquina, assim como equipamentos para promover a sustentação do maciço, caso haja alterações nas condições geológicas. Estes equipamentos são dotados ainda de recursos para promover o reconhecimento prévio do maciço à frente da escavação assim como sistemas e equipamentos para o tratamento e/ou aplicação de suporte primário no maciço (SAAVEDRA, 2001).

Os equipamentos para perfuração de rochas brandas e/ou solos, denominados de couraças ou "shields" são máquinas que incorporam um sistema de proteção integral do túnel, constituído por revestimentos contínuos, o que permite trabalhos em terrenos altamente instáveis. O sistema de avanço destes equipamentos é semelhante àquele utilizado para escavação de rochas duras, diferenciando-se destes pelo sistema de empuxo longitudinal, obtido por reação no próprio revestimento. As couraças de frente aberta, de tecnologia mais simples, são mais versáteis diante de eventuais mudanças nas características do maciço, porém avançam com menor velocidade. As couraças de face fechada são equipamentos que promovem escavações mais seguras, restringindo processos como afluxos de água significativos ou rupturas frontais da face.

Apresentam produtividade mais elevada que os equipamentos de face aberta. Os equipamentos de face fechada mais modernos, denominados de “Earth Pressure Balanced Shield” e “Slurry Shield” (FOTO 10), promovem a estabilização do túnel com a utilização de lamas, fabricadas ou produzidas com os detritos da própria escavação, e são capazes de avançar em maciços pouco coesivos, sob elevadas pressões piezométricas, sem a necessidade de pressurizar a câmara de trabalho (FRANCISS e ROCHA, 1998; MENDAÑA, 2001).

FOTO 10 – Equipamento EPB *shield*, de 9,67 m de diâmetro, utilizado na construção de túnel ferroviário na Holanda

A necessidade de se dispor de equipamentos com bom desempenho ao escavar rochas duras, mantendo desempenhos aceitáveis ao atravessar, por seus próprios meios, horizontes geológicos menos competentes, zonas de falha, zonas altamente fraturadas e/ou alteradas, maciços heterogêneos, etc., levou ao desenvolvimento de máquinas em que, aos elementos típicos das TBMs, foram adicionados elementos parciais ou conjuntos completos dos “shields”, razão pela qual são denominados de equipamentos mistos (FOTO 11). O projeto destes equipamentos originou-se a partir do esquema básico dos TBMs, e permite alternar o conjunto de perfuração conforme as características do maciço rochoso. Um dos tipos de equipamento deste grupo é o denominado “TBM de couraça dupla” (MENDAÑA, 2001), com seções telescópicas de revestimento, denominadas de couraça dianteira e couraça traseira. A couraça dianteira contém os elementos da “cabeça de corte” e à couraça traseira são

incorporados os elementos de reação. Este sistema assegura a sustentação contínua do maciço, permitindo, em terrenos estáveis, avançar e colocar simultaneamente o revestimento. Um outro tipo de equipamento avança sem a proteção contínua das couraças, o que o torna extremamente semelhante aos TBMs comuns. Estes equipamentos, de frente aberta, permitem a colocação de anéis de revestimento apenas onde requerido pelo maciço. Nestas condições o avanço é obtido por ciclos sucessivos de escavação/colocação dos anéis (MENDAÑA, 2001).

FOTO 11 – Equipamento EPB/TBM, de face mista, com 6,17 m de diâmetro, utilizado na abertura dos túneis do Metro de Singapura

Os métodos construtivos apresentados no breve relato acima servem como referência para a seleção dos métodos a serem submetidos à avaliação no processo de decisão. Optou-se, para efeito de análise, submeter ao processo de decisão o método convencional de escavação a fogo, em contraposição a um método mecanizado de escavação.

Dadas as características do meio (o arcabouço litológico e estrutural do maciço, as suas heterogeneidades geológicas, geotécnicas, geomecânicas e hidrogeotécnicas, os condicionantes geológicos da estabilidade, etc.), o método de escavação mecanizado mais indicado para avaliação no processo de decisão desenvolvido nesta tese consiste no denominado “TBM de couraça dupla”. Além dos aspectos mencionados, a flexibilidade do equipamento permite que, uma vez superado o trecho em rocha, o mesmo prossiga, como EPB, na construção do túnel nos trechos onde o mesmo vai ser implantado em sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo.

Em complementação, o método construtivo convencional por escavação a fogo é analisado, quando tratamentos para contenção do maciço podem ser requeridos, previamente ao avanço da escavação.

4.3 Processos Geradores de Risco e Conseqüências Potenciais

ANDERSON (1998), analisando o problema da previsão de riscos em obras subterrâneas, verifica que os incidentes/acidentes em túneis, cujas causas são referidas na literatura como predominantemente geológicas, estão sempre circunscritos a três situações: as movimentações do maciço cujos reflexos ficam restritos à área de construção do túnel; as movimentações do maciço cujos reflexos atingem áreas externas à da construção do túnel, resultando no desenvolvimento eventual de subsidências de grande porte em superfície; "rock bursts" ou movimentações do maciço devido a tensões regionais; e/ou uma combinação das três categorias acima. Além destes, são também apontados outros incidentes/acidentes originados por incêndios, explosões de gases e afluxos incontroláveis de água durante a construção do túnel.

Embora os incidentes/acidentes possam ter origem bem diversa, ou mesmo causa totalmente alheia à geologia do sítio de implantação da obra, os ambientes onde estão circunscritas as três categorias definidas por ANDERSON (1998), refletem, ou consubstanciam, o universo onde são materializados os mecanismos de instabilização do maciço, assim como as conseqüências decorrentes.

As movimentações do maciço que ficam restritas à área de construção do túnel, podem ser identificadas com os processos genericamente designados como rupturas. As rupturas, conforme definição proposta por RIBEIRO NETO (1999), indicam movimentação não generalizada do maciço, envolvendo pequenos volumes de material, sem propagação da instabilidade para superfície. As rupturas são processos que redundam em danos pouco extensos que, caso não controladas, podem evoluir para um colapso. Os colapsos, por sua vez, representam a ruptura global do maciço, significado de uma súbita e incontrolável movimentação do maciço, resultando na perda da maior parte ou de toda seção do túnel, ou na queda de um volume substancial de material para o interior do túnel. Dependendo da profundidade do túnel, pode haver o desenvolvimento de subsidências e/ou abertura de crateras de portes

variados em superfície. O colapso é um evento que provoca danos extensos e generalizados e pode ser associado à segunda categoria definida por ANDERSON (1998).

Embora incluídos em uma terceira categoria (ANDERSON, 1998), os “rock bursts” e/ou outras movimentações do maciço associadas a quaisquer outros mecanismos, são também materializados nos mesmos cenários e da mesma forma que os descritos acima.

Levantamentos efetuados e/ou divulgados por vários autores (PARKER, 1997; ISAKSON *et al.*, 1999; PELIZZA e GRASSO, 1999; RIBEIRO NETO, 1999), demonstram que esses processos, independente do método de construção, respondem pela grande maioria dos incidentes e/ou acidentes em túneis.

A TABELA 11 reúne os resultados do levantamento efetuado pelo USNC/TT em 1984 onde consta, dentre outras informações, o impacto relativo provável das conseqüências, avaliado em uma escala de 1 a 10 (*apud* PARKER, 1997).

Por sua vez, ISAKSON *et al.* (1999), apresentam os resultados de levantamento análogo efetuado na literatura específica (TABELA 12), baseados na análise de 15 túneis escavados mecanicamente.

As informações apresentadas nas TABELAS 11 e 12 evidenciam que, os principais processos geradores de risco deflagrados por causas fundamentalmente geológicas compreendem, a instabilização de blocos rochosos, desabamentos com formação de capelas (que podem ou não alcançar a superfície), afluxos incontrolláveis de água, obstruções causadas por matacões e/ou rochas extremamente duras, deformações severas do maciço, etc.

O desenvolvimento dos principais processos geradores de risco assinalados, independem do método construtivo. No entanto, há processos associados exclusivamente aos métodos mecanizados de abertura de túneis, como é o caso dos problemas relativos à abrasividade e dureza da rocha, remoção dos detritos da frente de escavação, etc. Outros problemas, também comuns a diversos métodos construtivos, como gases, fluidos tóxicos, “rock burst”, etc., representam apenas uma pequena parcela dos processos geradores de risco associados à construção de obras subterrâneas.

TABELA 11 – Processos que podem conduzir ao aumento significativo do custo de túneis, conforme levantamento do USNC/TT (modificado de PARKER, 1997)

Processos	Túneis com problemas (%)	Túneis com reivindicações (%)	Impacto* relativo das consequências no custo
Instabilidade de blocos rochosos, sobrecavação, desabamentos	38	16	4,2
Afluxos de água	33	6	1,8
Fluxos de solo/lama	27/6	9/4	3,3/8,0
Deformações severas da rocha	19	8	4,2
Instabilidade da face (túneis em solo)	11	5	2,0
Obstruções diversas (matações, estacas, rochas muito duras, arenitos cimentados)	12	11	9,2
Subsidências na superfície	9	2	2,2
Gás metano	7	2	2,8
Fluidos nocivos	6	4	6,6
"Rock burst"	6	4	6,6
Instabilidade da face (túneis em rocha)	5	1	2,0
Abrasividade da rocha	5	2	4,0
Remoção de detritos	5	2	4,0
Prisão do equipamento	4	4	10,0
Corte da rocha	4	1	2,5
Zonas brandas em rocha	4	2	5,0
Desvios no direcionamento	4	0	0
Ruptura da base do túnel	2	2	10,0
Descompressão	1	0	0
Interferência de utilidades	1	0	0

* - refere-se ao custo relativo provável das consequências, em uma escala até 10

Os processos geradores de risco passíveis de ocorrer durante a construção do túnel da Linha Amarela analisado neste estudo, são muito semelhantes aos apontados nas TABELAS 11 e 12, configurados como os mais freqüentes.

Os principais processos esperados compreendem a instabilização de blocos rochosos, desabamentos da frente de escavação e/ou do teto do túnel, devido à atuação dos condicionantes litológicos e estruturais do maciço, afluxos significativos de água proveniente das estruturas de direção NNW/SSE e/ou das zonas biotíticas, obstruções/desabamentos causados por matações, etc.

Dadas as características do maciço e do meio, não são esperados processos associados a gases, fluidos tóxicos, tensões naturais e/ou relaxamento de tensões.

TABELA 12 – Eventos inesperados associados à escavação com “SHIELD” (modificado de ISAKSON *et al.*, 1999)

Tipo de problema	Descrição do problema	Número de casos verificado	% do total		% do item	Classes de consequência *
		37	80,4		100	
Problemas na Face	Colapso da face	9	57,1	19,6	24,3	2 a 3
	Colapso na superfície	2		4,3	5,4	2 a 3
	Colapso e afluxo de água	2		4,3	5,4	3
	Prisão do equipamento	6		13,0	16,2	3
	Desevio do equipamento	3		6,5	8,1	3
	Cabeça de corte sem contato com a rocha	2		4,3	5,4	2
Outros	Presença de gás	1	2,4		2,7	2 a 3
Falhas funcionais	Sistema de transporte de detritos inadequado para o tipo de maciço	1	16,7	2,7	2,7	2 a 3
	Pastilhas de corte inadequadas para tipo de maciço	2		4,3	5,4	
	“Grippers” inadequados para o tipo de maciço	4		10,8	10,8	4
Problemas no perímetro	Prisão de segmentos	1	2,4	2,7	2,7	1
Problemas na superfície	Subsidências	2	9,5	4,3	5,4	1
	Outros	2		4,3	5,4	1 a 3

* - Classes de consequência baseadas em avaliações subjetivas, definidas na TABELA 13.

TABELA 13 – Classes de consequências definidas subjetivamente (ISAKSON *et al.*, 1999).

Classes de Consequências	Descrição das Consequências	Custo (% do custo previsto na proposta)	Exemplo
1	Danos pequenos	< 10	Falha em segmentos
2	Danos limitados	10 – 50	Falha na máquina
3	Danos consideráveis	50 – 100	Colapso da face
4	Danos extensos	> 100	Falha no método

As conseqüências decorrentes da deflagração dos processos geradores de risco dependem do método construtivo, do tipo de processo deflagrado, da magnitude dos volumes mobilizados, dos procedimentos necessários para estabilização do maciço, etc. Via de regra, estas conseqüências oneram de forma significativa o orçamento do projeto, conforme avaliações, ou estimativas, constantes nas TABELAS 11 e 12.

As conseqüências de um incidente/acidente durante a construção de um túnel podem ser estimadas, iniciando-se pela avaliação, para o maciço rochoso em foco, dos processos geradores de risco passíveis de ocorrer e dos eventuais volumes mobilizados. Os processo de ruptura e/ou de colapso do maciço mobilizam uma quantidade variável de material, cujo volume depende basicamente do diâmetro do túnel e da profundidade em que o mesmo se encontra. HSE (1996, apud RIBEIRO NETO, 1999) e PELIZZA e GRASSO (1999) relatam volumes que atingem até cerca de 8.000 m³ em túneis escavados por métodos convencionais ou NATM. Para estes métodos construtivos, os volumes mais freqüentes envolvidos nos colapsos situam-se entre 200 m³ e 500 m³. Nos processos mecanizados, quando são utilizados equipamentos do tipo TBM, os volumes envolvidos nestes processos são significativamente menores.

A ocorrência de um incidente/acidente no interior de um túnel em construção implica ainda na parada e conseqüente retardo da frente de escavação, eventuais danos em máquinas e equipamentos de produção no interior do túnel, eventuais danos em superfície, eventuais danos em utilidades públicas e equipamentos urbanos, procedimentos para a estabilização da ruptura/colapso, reconstrução do trecho rompido, etc.

A TABELA 14, compilada de HSE (1996, apud RIBEIRO NETO, 1999), evidencia que as conseqüências nos casos de rupturas/colapsos que alcançam a superfície promovem, via de regra, grandes transtornos urbanos, principalmente no trânsito, danos em equipamentos e redes de utilidades públicas além de danos em equipamentos e/ou instalações da obra. Em menor proporção, verificam-se danos em imóveis, a morte e o ferimento de pessoas.

Os incidentes/acidentes em túneis podem ter conseqüências ambientais significativas. Em áreas urbanas, as preocupações voltam-se principalmente para o patrimônio artístico e cultural, particularmente no caso de cidades históricas. Embora

não menos importantes, as consequências no meio físico, biótico e social também devem ser criteriosamente avaliadas e estimado o seu valor.

Acidentes e/ou incidentes em obras deste porte trazem, adicionalmente, prejuízos políticos. Estes prejuízos, em princípio, devem também ser contabilizados uma vez que afetam tanto a imagem da empresa concessionária como das demais empresas envolvidas no projeto.

TABELA 14 – Consequências na superfície decorrentes de acidentes em túneis construídos em NATM (modificado de HSE, 1996, apud RIBEIRO NETO, 1999)

Consequências na superfície	Número de casos	%
Não relatadas	17	43,6
Transtornos no trânsito / transtorno urbano	13	30,8
Danos em equipamentos e instalações da obra	4	10,3
Danos nas redes de utilidades públicas	3	7,7
Demolição de casas	2	5,1
Mortes	2	5,1
Danos generalizados	1	2,6
Feridos	1	2,6

4.3.1 Procedimentos para o cálculo das consequências potenciais

A área da cidade de São Paulo sob a qual o túnel vai ser implantado é densamente urbanizada. A ocupação intensa e descontrolada não preservou nenhuma área ocupada por matas, parques, etc., ou mesmo edificações com valor histórico e/ou arquitetônico. Por decorrência da intensa urbanização, os meios físico e biótico encontram-se quase que totalmente degradados.

Assim, as consequências potenciais, sejam elas decorrentes de impactos no interior do túnel ou na superfície, tendem a ficar restritas apenas aos impactos monetários, uma vez que, os impactos ambientais são praticamente nulos. Os impactos no âmbito social (aqui incluído o problema de perdas de vidas e/ou ferimento de pessoas) também tendem a ser praticamente nulos, visto que a perda de vidas decorrente de acidentes durante a construção de túneis, com raríssimas exceções, costumam ser nulas, conforme visto nos levantamentos citados anteriormente.

Desta forma, nesta pesquisa serão consideradas conseqüências potenciais apenas as perdas monetárias decorrentes da interrupção dos trabalhos no interior do túnel e dos impactos em superfície, não sendo consideradas, portanto, as demais conseqüências, tais como, as sociais, ambientais, políticas, etc.

Segundo LEITE (2002, informação pessoal), os trabalhos relacionados a incidentes/acidentes em túneis em ambiente urbano desenvolvem-se em várias etapas. Estas compreendem uma etapa inicial emergencial, uma etapa de equacionamento do problema, uma etapa de tratamento e estabilização do volume mobilizado e do maciço remanescente, a etapa de reconstrução do trecho rompido e finalmente, a retomada dos trabalhos. Esta, normalmente acontece com cuidados excessivos, acompanhada de um certo conservadorismo, como resultado do incidente/acidente.

Na etapa inicial é providenciada, em caráter de emergência, a rápida estabilização do processo, impedindo que o mesmo progrida e possa envolver volumes crescentes do maciço. Nesta etapa, caso haja o desenvolvimento de subsidências ou de crateras em superfície, é providenciado o preenchimento da mesma com concreto magro.

Na seqüência iniciam-se os trabalhos de equacionamento do problema, onde o mesmo vai ser analisado e providenciada a solução, que visa restabelecer as condições de segurança da obra e do projeto, podendo haver, inclusive, a revisão dos conceitos iniciais do projeto.

Os trabalhos de estabilização são executados com o objetivo de restabelecer o confinamento do maciço e podem envolver diversas técnicas de contenção. No entanto, conforme síntese apresentada por PELIZZA e GRASSO (1999), a maior parte dos trabalhos de consolidação envolvem diversas técnicas de injeção, acompanhadas ou não de drenagem. Outras técnicas como aplicação de chumbadores e/ou tirantes, aplicação de concreto projetado, etc. têm, nesta fase, aplicação mais restrita.

A reconstrução do trecho rompido pode envolver a aplicação de suportes e/ou tratamentos adicionais do maciço. Estes, segundo PELIZZA e GRASSO (1999), envolvem, normalmente, diversas técnicas de injeção do maciço. Nesta etapa pode estar incluída a necessidade de reconsolidação e de reintegração da face rompida do túnel.

Há casos onde é inviável a consecução destas etapas ou as mesmas são executadas em condições extremamente difíceis (PELIZZA e GRASSO, 1999).

As conseqüências resultantes da deflagração dos processos geradores de risco são, portanto, uma somatória das conseqüências verificadas no interior do túnel e daquelas em superfície, como apresentado pela expressão:

$$C = C_I + C_S \quad (1)$$

onde,

C - valor monetário das conseqüências advindas da deflagração dos processos geradores de risco;

C_I - valor monetário das conseqüências no interior do túnel;

C_S - valor monetário das conseqüências em superfície;

As conseqüências no interior do túnel correspondem aos prejuízos relativos ao período em que a frente permanece paralisada, causando atrasos no avanço do túnel, ao custo dos trabalhos necessários para estabilização do maciço e ao custo para reconstrução do trecho rompido até a retomada da escavação.

O valor destas conseqüências é dado por:

$$C_I = P + E + R \quad (2)$$

onde,

P - valor monetário decorrente da paralisação da frente de escavação;

E - valor monetário decorrente dos tratamentos de estabilização do maciço;

R - valor monetário relativo à reconstrução do túnel no trecho rompido;

Em superfície os prejuízos decorrem principalmente devido a danos em imóveis, transtornos no trânsito e danos em utilidades e/ou equipamentos públicos. Destes, para efeitos desta pesquisa, serão considerados apenas os possíveis danos em imóveis e os prejuízos causados pelos transtornos no trânsito.

Os prejuízos em superfície, relativos a danos em imóveis e a transtornos no trânsito são dados por:

$$C_S = I + T \quad (3)$$

onde,

I - valor monetário decorrente de danos em imóveis;

T- valor monetário decorrente dos prejuízos causados pela interrupção do tráfego;

Substituindo-se as equações (2) e (3), na equação (1), obtém-se a equação (4), onde se tem os elementos necessários para o cálculo dos prejuízos decorrentes de incidentes/acidentes deflagrados pelos processos geradores de risco. Para o cálculo destes prejuízos, foram admitidas algumas hipóteses simplificadoras, que serão explicitadas ao longo dos próximos parágrafos (os valores dos prejuízos, assim como todos os demais cálculos, serão efetuados em dólares americanos).

$$C = P + E + R + I + T \quad (4)$$

O prejuízo causado pela paralisação (P) da escavação do túnel corresponde aos custos com máquinas e equipamentos parados, aos custos com o pessoal não alocado, ou não produzindo na atividade fim (o que caracteriza uma certa ociosidade), aos prejuízos financeiros causados pela paralisação da escavação (perda de faturamento em decorrência da parada na produção), etc. Estes prejuízos guardam estreita relação com o volume mobilizado no incidente/acidente que, por sua vez, têm estreita relação com o número de dias que os trabalhos ficarão paralisados, até o início da reconstrução do túnel. Estes custos, para efeito deste trabalho, serão estimados utilizando-se a equação (8):

$$P = P_D \cdot n \cdot \text{US\$}_{\text{MÉTODO}} \quad (5)$$

onde,

P_D = produção diária do método construtivo;

n = número de dias de produção paralisada;

$\text{US\$}_{\text{MÉTODO}}$ = custo linear do método construtivo utilizado;

O custo da estabilização do maciço (E), envolve o custo dos tratamentos de emergência, o custo do tempo necessário para o equacionamento do problema e encaminhamento da solução de projeto e o custo dos trabalhos de tratamento para o restabelecimento das condições de confinamento do maciço. Estes custos guardam íntima relação com o volume do material mobilizado no processo de ruptura e podem ser estimados a partir da expressão:

$$E = E_E + E_P + E_M \quad (6)$$

onde,

E_E – custo relativo ao tratamento emergencial;

E_P – custo relativo ao tempo para equacionamento do problema e elaboração da solução de projeto;

E_M – custo relativo ao tratamento de recomposição do estado de confinamento do maciço;

O custo relativo ao tratamento emergencial (E_E) envolve duas situações. A primeira diz respeito aos processos cujos efeitos ficam restritos ao interior do túnel. A segunda refere-se aos processos que progridem, alcançando e gerando subsidências ou crateras em superfície. Desta forma,

$$E_E = E_{E1} + E_{E2} \quad (7)$$

onde,

E_{E1} = custo relativo ao tratamento emergencial, relativo aos processos que ficam restritos ao interior do túnel;

E_{E2} = custo relativo ao tratamento emergencial, relativo aos processos que geram subsidências e crateras em superfície;

No primeiro caso, o tratamento emergencial resume-se, por hipótese, à aplicação de concreto projetado na área afetada, cujo volume estimado é igual ao

volume da massa rompida. Desta forma, o custo relativo a este tratamento pode ser estimado pela equação (8):

$$E_{E1} = V \cdot \text{US\$}_{CP}/\text{m}^3 \quad (8)$$

onde,

V = volume da massa rompida, em m^3 ;

$\text{US\$}_{CP}/\text{m}^3$ = custo da aplicação do concreto projetado, por m^3 ;

No segundo caso, o tratamento emergencial compreende, por hipótese, ao preenchimento da cratera aberta em superfície com concreto magro e trabalhos de injeção de cimento para consolidação da massa rompida.

É admitido, para efeito de cálculo, que o volume máximo de concreto magro necessário para o preenchimento do vazio deixado pelo colapso é igual ao volume estimado da massa rompida.

Para consolidação da massa rompida admite-se que o volume mínimo de maciço a ser tratado corresponde ao volume estimado da massa rompida e que o raio de influência de um furo de injeção seja da ordem de, no máximo, 1,0 m. Portanto, cada metro de injeção executado corresponde a um volume de maciço tratado da ordem de $0,80 \text{ m}^3$. Desta forma, a metragem necessária para consolidação do maciço é da ordem de 1,25 vezes o volume estimado da massa rompida. Assim, o custo dos tratamentos emergenciais de consolidação da massa rompida podem ser estimados utilizando-se a expressão:

$$E_{E2} = V \cdot \text{US\$}_{CM}/\text{m}^3 + 1,25 V \cdot \text{US\$}_{IC}/\text{m} \quad (9)$$

onde,

V = volume da massa rompida, m^3 ;

$\text{US\$}_{CM}/\text{m}^3$ = custo da aplicação do concreto magro, por m^3 ;

$\text{US\$}_{IC}/\text{m}$ = custo da injeção de consolidação do maciço, por metro linear de perfuração;

O custo relativo ao tempo para equacionamento do problema e adoção das soluções de projeto (E_P) é extremamente variável e, para efeito das análises e cálculos aqui desenvolvidos, admite-se que este custo é parte dos prejuízos que estão relacionados ao tempo de paralisação dos trabalhos (P).

É admitido que os trabalhos para restabelecer as condições de confinamento (E_M), sejam executados no maciço circundante à massa rompida, e que o volume de maciço a ser tratado é igual ao volume mobilizado estimado no processo de ruptura. Admite-se, da mesma forma que no caso do tratamento para consolidar a massa rompida, que o raio de influência de um furo de injeção seja da ordem de, no máximo, 1,0 m e que, cada metro de injeção executado corresponde a um volume de maciço tratado da ordem de $0,80 \text{ m}^3$. Desta forma, a metragem necessária para execução dos tratamentos para restabelecer as condições de confinamento do maciço é da ordem de 1,25 vezes o volume do maciço tratado. Assim, o custo destes tratamentos podem ser estimados utilizando-se a expressão:

$$E_M = 1,25 V \cdot \text{US\$}_{IC}/\text{m} \quad (10)$$

onde,

V = volume da massa rompida, em m^3 ;

$\text{US\$}_{IC}/\text{m}$ = custo da injeção de consolidação do maciço, por metro linear de perfuração;

Para reconstrução do túnel no trecho rompido (R), admite-se que há necessidade de tratamentos adicionais do maciço, caracterizados por injeção de cimento no perímetro de toda abóbada do túnel (enfilagens sistemáticas) e que, devido aos cuidados a serem tomados, a velocidade de avanço da escavação seja inferior àquela verificada anteriormente. Nestas condições, admite-se para efeito de cálculo, que o custo da reconstrução seja 50 % superior, incluídos aqueles relativos ao tratamento do maciço. Para as análises aqui efetuadas, admite-se que para cada 1500 m^3 de maciço mobilizado na ruptura corresponda à necessidade de reconstrução de

um comprimento equivalente a um diâmetro do túnel. Os custos relativos à reconstrução podem ser estimados a partir da expressão:

$$R = V/1500 \cdot 1,5 \text{ US\$}_{\text{MÉTODO}} \quad (11)$$

O prejuízo causado em imóveis depende do número de imóveis afetados pelo acidente/incidente e do valor dos imóveis atingidos. Para efeito de cálculo, admite-se que, para simplificação, as situações que envolvem imóveis comerciais, tais como, valor do material estocado, lucros cessantes, etc., não serão consideradas. Desta forma, os prejuízos com os imóveis eventualmente afetados em um acidente/incidente no túnel podem ser estimados pela equação:

$$I = V_I \cdot n \quad (12)$$

onde,

V_I – valor monetário médio dos imóveis afetados;

n – número de imóveis danificados;

Dos danos decorrentes de incidentes/acidentes em túneis em áreas urbanas, merece destaque especial os prejuízos e os transtornos causados à cidade pela interrupção do trânsito. Estes prejuízos atingem, indistintamente, toda a população da cidade, causando prejuízos econômicos e sociais devido ao aumento generalizado dos congestionamentos, aumento da poluição, etc.

Estudos conduzidos pela Associação Nacional de Transportes Públicos (IPEA/ANTP, 1999), demonstram que, entre 1995 e 1996, os prejuízos (deseconomias) causados por congestionamentos de trânsito em dez cidades brasileiras somam valores superiores a 470 milhões de dólares americanos, conforme apresentado na TABELA 15.

TABELA 15 – Prejuízos (deseconomias) anuais causados por congestionamentos de trânsito em dez cidades brasileiras (modificado de IPEA/ANTP, 1999)

Discriminação das perdas (deseconomias)	Cidades brasileiras (US\$)	São Paulo	
		(US\$)	(%)
Tempo gasto nos congestionamentos	193.965.532,4	125.613.892,5	64,8
Aumento do consumo de combustíveis	146.591.467,0	115.056.701,2	78,5
Aumento da poluição (efeitos sobre a saúde da população)	37.097.631,7	28.814.770,6	77,7
Necessidade de aumento do sistema viário	96.454.289,4	76.610.648,3	79,4
Total Geral	474.108.920,5	346.096.012,6	73,0

- - Cidades incluídas no estudo – Belo Horizonte, Brasília, Campinas, Curitiba, João Pessoa, Juiz de Fora, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, São Paulo.

Os valores obtidos pelo estudo do IPEA/ANTP (1999), indicam prejuízos diários totais superiores a 1,4 milhões de dólares americanos por dia útil nas dez cidades brasileiras pesquisadas e valores da ordem de 1,0 milhão de dólares americanos por dia útil na cidade de São Paulo.

Caso um acidente/incidente provoque a interrupção do trânsito em alguma das grandes avenidas da cidade de São Paulo sotopostas ao túnel, aos custos diários dos congestionamentos somam-se aqueles decorrentes da eventual interrupção da(s) pista(s) de tráfego destas avenidas.

Para ilustrar a dimensão do problema, foi simulada a interrupção instantânea das pistas local e/ou expressa da marginal do rio Pinheiros. A simulação foi efetuada pela Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) da Secretaria Municipal de Transportes de São Paulo.

A rede de simulação utilizada pela CET abrange toda a região metropolitana de São Paulo, tendo como base de simulação a matriz de viagens origem/destino, da Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO, de 1997. O modelo de simulação utilizado foi o sistema computacional canadense denominado EMME/2. A simulação foi efetuada para o pico de tráfego entre 7:00 h e 8:00 h da manhã, considerando o trânsito entre a ponte João Dias, em Santo Amaro e o Cebolão, em Osasco.

No horário analisado, são efetuadas na cidade de São Paulo, em condições normais, cerca de 839.000 viagens, o que corresponde a cerca de 10 % do volume de tráfego diário.

Os resultados das simulações encontram-se na TABELA 16. Os valores apresentados correspondem à condição de equilíbrio, obtida 30 dias após ter sido imposta a interrupção do tráfego pelas pistas das Marginais do rio Pinheiros. Apenas o cenário 6 constitui exceção, pois corresponde à situação denominada “dia seguinte”, relativa à primeira interação obtida na simulação (cujo significado não corresponde, necessariamente, à situação verificada 24 horas após a interrupção do tráfego).

As alterações causadas no trânsito pela interrupção total das pistas da marginal, sentido centro-bairro, podem ser visualizadas nas FIGURAS 29 a 32. Nestas figuras, as cores e as espessuras das linhas são proporcionais ao volume ou à intensidade de tráfego.

De uma situação de caos, logo após a interrupção das vias (FIGURA 31), o trânsito se redistribui por toda a malha viária da cidade. Em 30 dias é alcançado o equilíbrio (FIGURA 32), ou seja, o tráfego se redistribui e os congestionamentos se estabilizam, em média 40 % acima dos valores verificados em condições normais.

Imediatamente após a interrupção das vias, há um período de caos no trânsito que se prolonga por um tempo relativamente indeterminado. Este caos é detectado pelo sistema de simulação, o que o impede de determinar alguns parâmetros, como por exemplo, o tempo de percurso das viagens entre a ponte João Dias e o Cebolão. Para efeito de cálculo, foi admitido que o volume de congestionamento imediatamente após a interrupção das vias é duas vezes superior ao volume diário de congestionamento.

TABELA 16 – Resultados da simulação relativa à interrupção do tráfego nas pistas da marginal do rio Pinheiros

Cenários/Pistas bloqueadas		Veículo x hora ⁽¹⁾	Veículo x Km ⁽²⁾	Tempo de percurso (min)	
				João Dias- Cebolão	Cebolão- João Dias
1	Normal	262.767	8.113.300	19	21
2	Local, bairro-centro	263.318	8.116.568	19	21
3	Expressa, bairro-centro	263.480	8.101.597	23	21
4	Local+expressa, bairro-centro	265.145	8.111.725	29	21
5	Expressa, centro-bairro	265.581	8.106.318	19	30
6	Local+expressa, bairro-centro ⁽³⁾	279.095	8.294.458	-	-

(1) – número total de horas gastas pelos veículos nas viagens

(2) – extensão total percorrida pelos veículos nas viagens

(3) – situação imediatamente após a interrupção do tráfego (dia seguinte)

Os custos decorrentes do excesso de congestionamento, ou seja, os custos decorrentes do volume de congestionamento adicional causado pela interrupção das vias de tráfego (T), devido a um eventual acidente no túnel é dado por (SZASZ, 2000):

$$CC = \frac{\Delta S \cdot TC^2}{2} \cdot CS \quad (13)$$

onde,

CC - valor monetário dos custos devido aos congestionamentos adicionais;

ΔS - capacidade da via, em veículo x hora;

n - número de dias de congestionamento (variando de 1 a 31);

TC - tempo adicional de congestionamento diário, dado pela expressão:

$$TC = 0,4 + 1,6^{-0,5(n-1)} \quad (14)$$

CS – custo social dos congestionamentos, dado pela expressão (SZASZ, 2000):

$$CS = SM + CG + OE \quad (15)$$

sendo,

SM – salário médio dos ocupantes dos veículos;

CG – custo adicional com combustível;

OE – custos operacionais equivalentes.

FIGURA 29 – Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pelo número de veículos/hora, em condições normais (os números indicam a quantidade de veículos/hora nas vias. As cores e as espessuras das linhas indicam o estado de criticidade da via)

FIGURA 30 – Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pela relação número de veículos/capacidade da via, em condições normais (os números indicam a relação veículos/capacidade da via. As cores e as espessuras das linhas indicam o estado de criticidade da via)

FIGURA 31 – Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pela relação número de veículos/capacidade da via, após interrupção total das duas pistas da marginal do rio Pinheiros, no sentido bairro-centro, condição “dia seguinte” (os números indicam a relação veículos/capacidade da via. As cores e as espessuras das linhas indicam o estado de criticidade da via)

FIGURA 32 – Tráfego na cidade de São Paulo, entre as 7:00 h e 8:00 h da manhã, dado pela relação número de veículos/capacidade da via, após interrupção total das duas pistas da marginal do rio Pinheiros, sentido bairro-centro, condição de equilíbrio (os números indicam a relação veículos/capacidade da via. As cores e as espessuras das linhas indicam o estado de criticidade da via)

A equação (13) deriva empiricamente do acompanhamento do volume diário dos congestionamentos, efetuado pela Companhia de Engenharia de Tráfego. A esta equação foi acrescentado um parâmetro de custo, denominado custo social, que permite calcular o prejuízo adicional causado pelos congestionamentos. Estes custos, que incluem o custo relativo ao tempo gasto pelos ocupantes dos veículos nos congestionamentos, o custo adicional com combustível além dos custos denominados de “custos operacionais equivalentes”, são calculados por SZASZ (2000) em US\$ 7,43/hora.

Para efeito de cálculo e, baseado nos levantamentos diários de tempo e extensão dos congestionamentos efetuados pela CET, o tempo diário normal gasto em congestionamentos foi estimado em 2,5 horas no período da manhã e 3,5 horas no período da tarde.

Os custos adicionais, diários e acumulados, para um período de 30 dias de congestionamentos são apresentados nas FIGURAS 33 a 35. Estas figuras mostram o efeito significativo dos congestionamentos nas diferentes vias da marginal do rio Pinheiros (pista local, na pista expressa e nas pistas local mais expressa, no sentido bairro-centro), acarretando prejuízos adicionais para toda a população.

O efeito dos congestionamentos na pista sentido centro-bairro, é análogo ao verificado para a interrupção das pistas local e expressa no sentido bairro-centro, uma vez que a capacidade de escoamento do tráfego destas vias é igual.

Adotando-se os mesmos critérios, é possível demonstrar também que nas outras grandes avenidas sotopostas, ou que cruzam o traçado do túnel (avenidas Waldemar Ferreira, Vital Brasil e Prof. Francisco Morato), os prejuízos decorrentes da interrupção do tráfego são também bastante significativos. A capacidade de escoamento de veículos destas vias é apresentada na TABELA 17.

FIGURA 33 – Prejuízos adicionais diários e acumulados devido à interrupção da pista local, sentido bairro-centro, da avenida marginal do rio Pinheiros.

FIGURA 34 - Prejuízos adicionais diários e acumulados devido à interrupção da pista expressa, sentido bairro-centro, da avenida marginal do rio Pinheiros.

FIGURA 35 - Prejuízos adicionais diários e acumulados devido à interrupção das pistas local e expressa, sentido bairro-centro, da avenida marginal do rio Pinheiros.

TABELA 17 – Capacidade das vias de tráfego das avenidas sobre a rota do túnel (ZSAZS, 2000)

Avenidas	Sentido de tráfego	Pista	Capacidade (veículo/hora)
Marginal do rio Pinheiros	Bairro-centro	local	5000
		expressa	8000
		local + expressa	13000
	Centro-bairro	expressa	13000
Waldemar Ferreira	ambos	ambas	1500/sentido
Vital Brasil	ambos	ambas	1400/sentido
Sapetuba	ambos	ambas	1500/sentido
Francisco Morato	ambos	ambas	2500/sentido

4.4 Árvore de Decisão

Com base na estratégia de decisão adotada, pode-se elaborar um diagrama de fluxo de decisões, ou uma árvore de decisão, como a apresentada na FIGURA 36.

Este diagrama consubstancia o modelo de decisão, estruturando e reduzindo o problema à sua forma mais simples. É apresentado um arranjo de eventos dispostos em ordem cronológica onde alguns destes eventos são decisões controladas por um decisor e outros, denominados eventos aleatórios, são controlados pelo acaso. A cada seqüência completa de ações de decisão e de eventos aleatórios corresponde uma conseqüência potencial (RAIFFA, 1977).

FIGURA 36 – Diagrama de Fluxo de Decisão

Os eventos, ou nós de decisão, correspondem às ações que estão à disposição do decisor, e são ações baseadas na estratégia adotada para redução do risco, ou seja, a árvore de decisão consubstancia as estratégias estabelecidas para redução do risco: a redução das incertezas através da execução de investigações complementares e/ou a escolha de um método construtivo capaz de evitar a deflagração dos processos geradores de risco, limitando, desta forma, o impacto das incertezas no desempenho técnico-econômico do projeto.

O diagrama de fluxo de decisão da FIGURA 36 apresenta o problema na sua forma mais simples, sendo portanto necessário que o mesmo seja explicitado para a sua aplicação. Em acordo com a estratégia adotada, as alternativas para redução do risco correspondem à aplicação de dois métodos construtivos, cujos desempenhos são

avaliados, em consonância com o nível de conhecimento que se tem do arcabouço geológico do maciço.

Os métodos construtivos submetidos a análise compreendem o método de escavação convencional a fogo (NATM) e um método de escavação mecanizado (TBM). Adicionalmente será analisada a aplicação do método de escavação convencional a fogo (NATM), quando são necessários tratamentos prévios do maciço, antes do avanço da escavação (denominado para efeito de identificação neste trabalho de NATM modificado).

Os métodos executivos serão analisados quando pressupõe-se que o conhecimento do arcabouço geológico do maciço é suficiente para a tomada de decisão, não sendo necessária, portanto, a execução de novas campanhas de investigação.

As demais condições de análise correspondem àquelas quando o conhecimento do arcabouço litológico e estrutural do maciço for julgado insuficiente, o que requer, portanto, a execução de investigações adicionais. Nestas condições, é necessário definir como serão conduzidas estas investigações: se a partir da superfície natural do terreno ou se a partir da frente de escavação.

Caso as investigações sejam conduzidas a partir da superfície natural do terreno, é difícil estabelecer se os resultados destas irão, efetivamente, minimizar as incertezas relativas ao arcabouço e aos condicionantes geológicos do projeto. Portanto, o resultado das investigações é um evento conduzido pelo acaso, uma vez que tais resultados são desconhecidos *a priori*.

Se as investigações forem conduzidas a partir da frente de escavação, a decisão relativa ao processo construtivo já foi tomada com base apenas no conhecimento geológico disponível. Os procedimentos de investigação, neste caso, visam apenas a definição dos tratamentos sistemáticos a serem aplicados, caso condições insatisfatórias para o avanço das escavações sejam detectadas, o que define o método de escavação, denominado de método C na árvore de decisão.

As condições geológicas sob as quais a escavação do túnel vai se desenvolver, se favoráveis ou desfavoráveis, determinam, em grande parte, o desempenho do método construtivo.

No processo de decisão aqui desenvolvido, condição favorável significa que durante a construção do túnel não há a manifestação de nenhum dos condicionantes

geológicos da estabilidade do maciço. A escavação do túnel se desenvolve dentro de condições absolutamente normais e os processos geradores de risco que porventura venham a ser deflagrados correspondem a eventos não relacionados com a estruturação geológica do maciço (aplicação inadequada do método construtivo, erros na condução e/ou no gerenciamento do projeto e/ou da construção, problemas – dimensionamento, falhas – nos equipamentos, etc.). As conseqüências resultantes da deflagração destes processos geradores de risco são, portanto, consideradas nulas para efeito desta pesquisa.

Ao contrário, condições desfavoráveis significam que durante a escavação do túnel há a manifestação de algum dos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço, o que determina o desempenho do método construtivo escolhido, situação que se enquadra exatamente dentro do escopo do trabalho.

Em vista disso, as árvores de decisão apresentadas neste trabalho podem ser utilizadas para análises que envolvam outras situações de risco na construção de túneis, além daquelas cujas causas sejam de natureza geológica.

Uma árvore de decisão compreende um conjunto de ações de decisão e de eventos do acaso, às quais seguem-se conseqüências, que são o resultado da deflagração dos processos geradores de risco e que, em última análise, medem o desempenho do método construtivo.

A construção de túneis induz, inevitavelmente, a uma série de processos geradores de risco. O mais comum deles são os recalques que, quando permanecem dentro dos valores previstos em projeto, indicam que não houve nenhum evento, ou processo, além daqueles considerados usuais na construção de túneis como, recalques devido à drenagem do maciço, deslocamento\queda de blocos devido à "batida de chocós" e/ou pequenos desmoronamentos, pequenos afluxos d'água para o interior da escavação, etc., que não interferem com o avanço normal da escavação. As conseqüências relativas a estes processos não são consideradas como tal na análise de decisão uma vez que, por limitarem-se a valores previstos, fazem parte do escopo do projeto e, portanto, têm o seu custo incluído no orçamento do mesmo. As demais manifestações, de pequenas rupturas a grandes colapsos, denunciam a deflagração de algum dos processos geradores de risco, correspondendo a movimentações de dimensões variadas do maciço.

Os volumes que materializam os processos geradores de risco nas árvores de decisão foram determinados a partir das estimativas efetuadas pelo avaliador.

Desta forma, para os métodos de escavação convencionais (NATM e NATM modificado), as rupturas que mobilizam volumes máximos da ordem de 30 m^3 , têm conseqüências que, em princípio, ficam restritas ao interior do túnel, não provocando nenhuma alteração em superfície. Por sua vez, admite-se que mobilizações cujos volumes estejam compreendidos entre 30 m^3 e 300 m^3 , podem provocar recalques de dimensões variadas em superfície (em princípio, não geram subsidências de grande porte ou crateras), além dos impactos no interior do túnel. O desenvolvimento de grandes subsidências e crateras em superfície ocorre, segundo estimativa do avaliador, somente quando volumes acima de 300 m^3 são mobilizados no processo de ruptura. Estas são entendidas como de proporções catastróficas quando alcançam valores acima de 1000 m^3 .

Para o método que utiliza escavação mecanizada (TBM), os volumes decorrentes da deflagração dos processos geradores de risco envolvem valores significativamente menores. Nestes, valores mobilizados acima de 25 m^3 , podem ser considerados catastróficos, segundo estimativa do avaliador.

As estratégias para redução do risco estão conjugadas nas árvores de decisão, que são designadas segundo a conduta em relação aos procedimentos de investigação, ou seja, executar investigações adicionais ou não, de que forma, etc.

Desta forma, a alternativa “Não Executar Investigações Adicionais”, cujo diagrama de fluxo de decisão é apresentado na FIGURA 37, resume-se à avaliação dos métodos construtivos, representando, de forma explícita, o ramo superior da árvore de decisão da FIGURA 36. Uma vez escolhido o método executivo, todos os demais passos são representados na árvore de decisão por nós de acaso, o que reflete as incertezas relativas às efetivas condições sob as quais o túnel vai ser escavado e o desempenho do método construtivo.

A decisão “Executar Investigações Adicionais”, como contraponto à decisão “Não Executar Investigações Adicionais”, encontra-se contemplada no modelo de decisão. O fluxograma da FIGURA 38 apresenta, de forma explícita, o desenvolvimento do ramo inferior da árvore de decisão apresentada na FIGURA 36, sobre a forma de condução das investigações: se a partir da superfície natural do terreno ou se a partir da frente de escavação, caracterizada por um nó de decisão. A esta seguem-se nós

de acaso que refletem o resultado das investigações. A explicitação dos ramos do fluxograma da FIGURA 38, é apresentada nas árvores de decisão das FIGURAS 39 a 41.

Destaca-se que, para efeito de tomada de decisão, a condição relativa à indefinição nos resultados das investigações corresponde exatamente à condição "Não Executar Investigações Adicionais".

A seguir são explicitadas as notações e as designações utilizadas nos ramos e nós das árvores de decisão. Visto que a hipótese de condução das escavações sob condições favoráveis não faz parte do escopo desta pesquisa, as notações e designações relativas a esta condição serão apresentadas somente onde estas forem necessárias para o entendimento dos fluxogramas de decisão.

- **Designação das Alternativas para Redução do Risco:**

- Designação dos Métodos Construtivos:

- Método de escavação convencional a fogo (NATM), designado como Método Construtivo A;
- Método de escavação mecanizado (TBM), designado como Método Construtivo B;
- Método de escavação convencional a fogo, com tratamentos sistemáticos prévios do maciço, antes do avanço da escavação (NATM "modificado"), designado como Método Construtivo C;

- Designação das Alternativas de Investigação:

- Não executar investigações adicionais, designada como Condição 1;
- Executar investigações a partir da superfície. Resultados indicam maciço rochoso mais homogêneo que o esperado, designada como Condição 2;
- Executar investigações a partir da superfície. Resultados indicam maciço rochoso mais heterogêneo que o esperado, designada como Condição 3;
- Executar investigações a partir da frente de escavação, designada como Condição 4;

- **Designação das condições geológicas sob as quais a escavação vai ser realizada:**

- Escavação conduzida sob condições favoráveis, indicando que não ocorre a manifestação dos condicionantes geológicos de projeto, designada como Condição F;
- Escavação conduzida sob condições desfavoráveis, indicando que ocorre a manifestação dos condicionantes geológicos de projeto, designada como Condição D;

- **Designação dos processos geradores de risco:**

- Processos associados aos métodos de escavação convencionais a fogo (NATM e NATM “modificado”):

- Rupturas envolvendo volumes mobilizados menores ou iguais a 30 m^3 , designados como Processo P_1 ;
- Rupturas envolvendo volumes mobilizados maiores que 30 m^3 e menores ou iguais a 300 m^3 , designados como Processo P_2 ;
- Rupturas envolvendo volumes mobilizados maiores que 300 m^3 e menores ou iguais a 1000 m^3 , designados como Processo P_3 ;
- Rupturas envolvendo volumes mobilizados maiores que 1000 m^3 , designados como Processo P_4 ;

- Processos associados ao método de escavação mecanizado (TBM):

- Rupturas envolvendo volumes mobilizados menores ou iguais a 15 m^3 , designados como Processo P_5 ;
- Rupturas envolvendo volumes mobilizados maiores que 15 m^3 e menores ou iguais a 25 m^3 , designados como Processo P_6 ;
- Rupturas envolvendo volumes mobilizados maiores que 25 m^3 , designados como Processo P_7 ;

- **Designação das probabilidades de ocorrência dos eventos aleatórios:**

- $p(A_i D)$ - Probabilidade da escavação ocorrer sob condições desfavoráveis, método construtivo A_i ou, alternativamente, método construtivo B_i ou C_i , i -ésima condição de análise;
- $p(A_i F)$ - Probabilidade da escavação ocorrer sob condições favoráveis, método construtivo A_i ou, alternativamente, método construtivo B_i ou C_i , i -ésima condição de análise;
- $p(P_n A_i D)$ - Probabilidade de desenvolvimento do n -ésimo processo gerador de risco P_n , método construtivo A_i ou, alternativamente método construtivo B_i ou C_i , i -ésima condição de análise, sob condições desfavoráveis;

- **Designação das conseqüências associadas a cada conjunto completo de ações de decisão e de eventos aleatórios:**

- $c(P_n A_i D)$ - Conseqüência associada ao n -ésimo processo gerador de risco, método construtivo A_i ou, alternativamente método construtivo B_i ou C_i , na i -ésima condição de análise, sob condições desfavoráveis;

- **Designação do valor monetário esperado da decisão:**

- $E(A_i)$ - Valor monetário esperado associado à aplicação do método construtivo A_i ou, alternativamente método construtivo B_i ou C_i , na i -ésima condição de análise;
- $E(A_i D)$ - Valor monetário esperado das conseqüências associadas à aplicação do método construtivo A_i ou, alternativamente método construtivo B_i ou C_i , na i -ésima condição de análise, sob condições desfavoráveis;
- $E(A_i F)$ - Valor monetário esperado das conseqüências associadas à aplicação do método construtivo A_i ou, alternativamente método construtivo B_i ou C_i , na i -ésima condição de análise, sob condições favoráveis. Considerado igual a zero para efeito desta pesquisa.

FIGURA 37 – Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 1 - “Não executar investigações adicionais”

FIGURA 38 - Diagrama de fluxo de decisão quando a decisão é "Executar investigações adicionais"

FIGURA 39 – Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 2 - “Investigações executadas a partir da superfície. Maciço mais homogêneo que o esperado”

FIGURA 40 – Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 3 – “Investigações executadas a partir da superfície. Maciço mais heterogêneo que o esperado”

FIGURA 41 – Diagrama de fluxo de decisão para a Condição de Análise 4 – “Investigações executadas a partir da frente de escavação”

4.5 Critério de Decisão

O objetivo da Análise de Decisão é prover racionalidade para a tomada de decisão sob condições de risco e incerteza, permitindo medir e interpretar o impacto das incertezas na decisão.

O critério de decisão é o meio que permite a escolha da melhor alternativa para redução do risco, ou seja, qual a melhor seqüência de ações que culmine com a escolha do método construtivo a ser aplicado na construção do túnel. Visto que as conseqüências são apenas monetárias, o critério de minimização do custo esperado é adequado para a tomada de decisão.

A decisão é obtida comparando-se o custo esperado da alternativa analisada. Este valor corresponde ao custo de construção do túnel (custo de construção do metro linear do túnel), acrescido do custo esperado das conseqüências, convertido em custo por metro linear do túnel. Quando a estratégia de redução do risco analisada envolve custos decorrentes da execução de campanhas de investigação, estes devem ser somados aos custos da alternativa.

O cálculo da conseqüência esperada relativa a cada alternativa é executada por ponderação e regressão (RAIFFA, 1976). Conforme CARVALHO (1996), o cálculo relativo a cada nó de acaso é realizado fazendo-se a somatória, ao longo do conjunto de eventos aleatórios associados ao nó, do produto da probabilidade de ocorrência de cada evento pela respectiva conseqüência esperada (processo de ponderação). Essa operação, realizada seqüencialmente nos ramos associados a cada alternativa, no sentido dos ramos finais para os iniciais (processo de regressão), permite estabelecer a conseqüência esperada da alternativa.

A aplicação deste procedimento para todas as situações expressas nas árvores de decisão, permite calcular o custo de cada alternativa que, quando comparados, permite definir qual a melhor alternativa para redução do risco na construção do túnel. Esta alternativa é obtida pela conjugação das duas estratégias definidas anteriormente para redução do risco: executando investigações adicionais que visam reduzir as incertezas através da obtenção de um maior número de informações e/ou limitar o impacto das incertezas no desempenho técnico e econômico do projeto adotando medidas que procurem evitar a deflagração dos processos geradores de risco, ou seja, projetos que podem parecer mais conservadores ou de custos mais elevados.

Como a escavação do túnel sob condições favoráveis significa que não há a manifestação dos condicionantes geológicos de projeto, as consequências associadas a esta condição são iguais a zero, conforme explicitado anteriormente. A definição dos termos das equações encontra-se no subitem 4.4.

4.5.1 Condição de Análise 1 - “Não Executar Investigações Adicionais”

Para esta condição de análise, representada pela árvore de decisão da FIGURA 37, o custo esperado das consequências associadas aos métodos construtivos analisados é calculado pelas seguintes expressões:

- **Método construtivo A – Escavação convencional a fogo (NATM)**

$$E(A_1) = p(A_1D).E(A_1D) \quad (16)$$

utilizando-se a equação (17), abaixo,

$$E(A_1D) = \{p(P_1A_1D).c(P_1A_1D)\} + \{p(P_2A_1D).c(P_2A_1D)\} + \{p(P_3A_1D).c(P_3A_1D)\} + \{p(P_4A_1D).c(P_4A_1D)\} \quad (17)$$

e, substituindo-se a equação (17) em (16), tem-se a equação (18), abaixo:

$$E(A_1) = p(A_1D).[\{p(P_1A_1D).c(P_1A_1D)\} + \{p(P_2A_1D).c(P_2A_1D)\} + \{p(P_3A_1D).c(P_3A_1D)\} + \{p(P_4A_1D).c(P_4A_1D)\}] \quad (18)$$

O valor $E(A_1)$ corresponde ao custo esperado das consequências, quando o túnel é escavado com o método convencional (NATM), relativo à alternativa “Não Executar Investigações Adicionais”, correspondente à condição de análise 1. A este deve ser adicionado o custo relativo à implantação do túnel, utilizando-se o método de escavação convencional (NATM).

- **Método construtivo B – Método de escavação mecanizado (TBM)**

$$E(B_1) = p(B_1D).E(B_1D) \quad (19)$$

utilizando-se a equação (20), abaixo,

$$E(B_1D) = \{p(P_5B_1D).c(P_5B_1D)\} + \{p(P_6B_1D).c(P_6B_1D)\} + \{p(P_7B_1D).c(P_7B_1D)\} \quad (20)$$

e, substituindo-se a equação (20) em (19), tem-se a equação (21), abaixo:

$$E(B_1) = p(B_1D).[\{p(P_5B_1D).c(P_5B_1D)\} + \{p(P_6B_1D).c(P_6B_1D)\} + \{p(P_7B_1D).c(P_7B_1D)\}] \quad (21)$$

O valor $E(B_1)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, quando o túnel é escavado por meios mecanizados (TBM), e a alternativa escolhida é “Não Executar Investigações Adicionais”, denominada condição de análise 1. A este deve ser adicionado o custo relativo à implantação do túnel com TBM no trecho analisado.

4.5.2 Condição de Análise 2 - “Investigações Executadas a Partir da Superfície . Maciço mais Homogêneo que o Esperado”

Esta condição de análise é representada pela árvore de decisão da FIGURA 39, e o custo esperado das conseqüências associadas aos métodos construtivos analisados é calculado pelas seguintes expressões:

- **Método construtivo A – Escavação convencional a fogo (NATM)**

$$E(A_2) = p(A_2D).E(A_2D) \quad (22)$$

utilizando-se a equação (23), abaixo,

$$E(A_2D) = \{p(P_1A_2D).c(P_1A_2D)\} + \{p(P_2A_2D).c(P_2A_2D)\} + \{p(P_3A_2D).c(P_3A_2D)\} + \{p(P_4A_2D).c(P_4A_2D)\} \quad (23)$$

e, substituindo-se a equação (23) em (22), tem-se a equação (24), abaixo:

$$E(A_2)=p(A_2D).[\{p(P_1A_2D).c(P_1A_2D)\}+\{p(P_2A_2D).c(P_2A_2D)\}+\{p(P_3A_2D).c(P_3A_2D)\}+\{p(P_4A_2D).c(P_4A_2D)\}] \quad (24)$$

O valor $E(A_2)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, quando o túnel é escavado utilizando-se o método convencional (NATM), após execução de investigações a partir da superfície e os resultados obtidos evidenciarem um maciço mais homogêneo que o esperado (condição de análise 2 - "Investigações Executadas a Partir da Superfície – Maciço mais Homogêneo que o Esperado"). A este custo deve ser adicionado o relativo à implantação do túnel e aqueles gastos com as investigações realizadas. No valor total gasto com as investigações deve constar, além dos gastos diretos com a execução das investigações em si, aqueles relativos ao tratamento das informações, eventuais revisões de projeto, etc.

- **Método construtivo B – Método de escavação mecanizado (TBM)**

$$E(B_2) = p(B_2D).E(B_2D) \quad (25)$$

utilizando-se a equação (26), abaixo,

$$E(B_2D)=\{p(P_5B_2D).c(P_5B_2D)\}+\{p(P_6B_2D).c(P_6B_2D)\}+\{p(P_7B_2D).c(P_7B_2D)\} \quad (26)$$

e, substituindo-se a equação (26) em (25), tem-se a equação (27), abaixo:

$$E(B_2)=p(B_2D).[\{p(P_5B_2D).c(P_5B_2D)\}+\{p(P_6B_2D).c(P_6B_2D)\}+\{p(P_7B_2D).c(P_7B_2D)\}] \quad (27)$$

O valor $E(B_2)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, quando o túnel é escavado mecanicamente, após terem sido executadas investigações a partir da superfície e os resultados evidenciarem que o maciço é mais homogêneo que o esperado (análise na condição 2 "Investigações Executadas a Partir da Superfície – Maciço mais Homogêneo que o Esperado"). A este custo deve ser adicionado o de implantação do túnel. No valor total gasto nas investigações deve constar, além dos

gastos diretos com as investigações em si, aqueles com o tratamento das informações, eventuais revisões de projeto, etc.

4.5.3 Condição de Análise 3 - “Investigações Executadas a Partir da Superfície . Maciço mais Heterogêneo que o Esperado”

A condição de análise 3, corresponde àquela expressa pela árvore de decisão apresentada na FIGURA 40 e o custo esperado das conseqüências associadas aos métodos construtivos analisados é calculado pelas seguintes expressões:

- Método construtivo A – Escavação convencional a fogo (NATM)

$$E(A_3) = p(A_3D).E(A_3D) \quad (28)$$

utilizando-se a equação (29), abaixo,

$$E(A_3D) = \{p(P_1A_3D).c(P_1A_3D)\} + \{p(P_2A_3D).c(P_2A_3D)\} + \{p(P_3A_3D).c(P_3A_3D)\} + \{p(P_4A_3D).c(P_4A_3D)\} \quad (29)$$

e, substituindo-se a equação (29) em (28), tem-se a equação (30), abaixo:

$$E(A_3) = p(A_3D).[\{p(P_1A_3D).c(P_1A_3D)\} + \{p(P_2A_3D).c(P_2A_3D)\} + \{p(P_3A_3D).c(P_3A_3D)\} + \{p(P_4A_3D).c(P_4A_3D)\}] \quad (30)$$

O valor $E(A_3)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, utilizando-se o método convencional (NATM), após execução de investigações a partir da superfície, e os resultados evidenciarem que o maciço é mais heterogêneo que o esperado, denominada de condição de análise 3 (“Investigações Executadas a Partir da Superfície – Maciço mais Heterogêneo que o Esperado”). A este deve ser adicionado o custo relativo à implantação do túnel e o total gasto com as investigações, onde deve constar, além dos gastos diretos com as investigações em si, aqueles com o tratamento das informações, eventuais revisões de projeto, etc.

- **Método construtivo B – Método de escavação mecanizado (TBM)**

$$E(B_3) = (B_3D).E(B_3D) \quad (31)$$

utilizando-se a equação (32), abaixo,

$$E(B_3D) = \{p(P_5B_3D).c(P_5B_3D)\} + \{p(P_6B_3D).c(P_6B_3D)\} + \{p(P_7B_3D).c(P_7B_3D)\} \quad (32)$$

e, substituindo-se a equação (32) em (31), tem-se a equação (33), abaixo:

$$E(B_3) = (B_3D).[\{p(P_5B_3D).c(P_5B_3D)\} + \{p(P_6B_3D).c(P_6B_3D)\} + \{p(P_7B_3D).c(P_7B_3D)\}] \quad (33)$$

O valor $E(B_3)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, após terem sido executadas investigações a partir da superfície e os resultados evidenciarem que o maciço é mais heterogêneo que o esperado (denominada condição 2 de análise “Investigações Executadas a Partir da Superfície – Maciço mais Heterogêneo que o Esperado”). A este custo deve ser adicionado o custo de implantação do túnel no trecho em análise, utilizando-se TBM. No valor total gasto nas investigações deve constar, além dos gastos diretos com as investigações em si, aqueles com o tratamento das informações, eventuais revisões de projeto, etc.

- **Método construtivo C - Escavação convencional a fogo, com aplicação de tratamentos sistemáticos prévios do maciço, antes do avanço da escavação (NATM modificado)**

$$E(C_3) = p(C_3D).E(C_3D) \quad (34)$$

utilizando-se a equação (35), abaixo,

$$E(C_3D) = \{p(P_1C_3D).c(P_1C_3D)\} + \{p(P_2C_3D).c(P_2C_3D)\} + \{p(P_3C_3D).c(P_3C_3D)\} + \{p(P_4C_3D).c(P_4C_3D)\} \quad (35)$$

e, substituindo-se a equação (35) em (34), tem-se a equação (36), abaixo:

$$E(C_3) = p(C_3D) \cdot [\{p(P_1C_3D) \cdot c(P_1C_3D)\} + \{p(P_2C_3D) \cdot c(P_2C_3D)\} + \{p(P_3C_3D) \cdot c(P_3C_3D)\} + \{p(P_4C_3D) \cdot c(P_4C_3D)\}] \quad (36)$$

O valor $E(C_3)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, quando é utilizado o método convencional de escavação com tratamentos prévios do maciço na frente antes do avanço, denominado de "NATM modificado". Este custo é relativo à condição de análise quando são executadas investigações a partir da superfície e os resultados obtidos evidenciam que o maciço é mais heterogêneo que o esperado, denominada de condição de análise 3 ("Investigações Executadas a Partir da Superfície – Maciço mais Heterogêneo que o Esperado"). A este custo deve ser adicionado o custo relativo ao custo de implantação do túnel. No valor total gasto nas investigações deve constar, além dos gastos diretos com as investigações em si, aqueles com o tratamento das informações, eventuais revisões de projeto, etc.

4.5.4 Condição de Análise 4 - "Investigações Executadas a Partir da Frente de Escavação"

Esta condição corresponde àquela expressa pela árvore de decisão apresentada na FIGURA 41, cujos custos esperados das conseqüências associadas aos métodos construtivos analisados podem ser calculados pelas seguintes expressões:

- Método construtivo A – Escavação convencional a fogo (NATM)

$$E(A_4) = p(A_4D) \cdot E(A_4D) \quad (37)$$

utilizando-se a equação (38), abaixo,

$$E(A_4D) = \{p(P_1A_4D) \cdot c(P_1A_4D)\} + \{p(P_2A_4D) \cdot c(P_2A_4D)\} + \{p(P_3A_4D) \cdot c(P_3A_4D)\} + \{p(P_4A_4D) \cdot c(P_4A_4D)\} \quad (38)$$

e, substituindo-se a equação (38) em (37), tem-se a equação (39), abaixo:

$$E(A_4)=p(A_4D).[\{p(P_1A_4D).c(P_1A_4D)\}+\{p(P_2A_4D).c(P_2A_4D)\}+\{p(P_3A_4D).c(P_3A_4D)\}+\{p(P_4A_4D).c(P_4A_4D)\}] \quad (39)$$

O valor $E(A_4)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, utilizando-se o método convencional (NATM), após a execução de investigações na frente de escavação e os resultados obtidos evidenciarem condições favoráveis para escavação (condição de análise 4, denominada "Investigações Executadas a Partir da Frente de Escavação). A este custo deve ser adicionado o custo, denominado de A_4 , relativo ao custo de implantação do túnel. No valor total, deve ser incluído o gasto com as investigações, além do custo relativo ao tempo em que a escavação permaneceu parada para execução das perfurações no túnel e do tempo para tratamento das informações.

- **Método construtivo C - Escavação convencional a fogo, com aplicação de tratamentos sistemáticos prévios do maciço, antes do avanço da escavação (NATM modificado)**

$$E(C_4) = p(C_4D).E(C_4D) \quad (40)$$

utilizando-se a equação (41), abaixo,

$$E(C_4D)=\{p(P_1C_4D).c(P_1C_4D)\}+\{p(P_2C_4D).c(P_2C_4D)\}+\{p(P_3C_4D).c(P_3C_4D)\}+\{p(P_4C_4D).c(P_4C_4D)\} \quad (41)$$

e, substituindo-se a equação (41) em (40), tem-se a equação (42), abaixo:

$$E(C_4)=p(C_4D).[\{p(P_1C_4D).c(P_1C_4D)\}+\{p(P_2C_4D).c(P_2C_4D)\}+\{p(P_3C_4D).c(P_3C_4D)\}+\{p(P_4C_4D).c(P_4C_4D)\}] \quad (42)$$

O valor $E(C_4)$ corresponde ao custo esperado das conseqüências, utilizando-se o método denominado neste trabalho de convencional modificado (NATM modificado), após execução de investigações na frente de escavação e os resultados obtidos evidenciarem condições favoráveis para escavação (condição de análise 4,

denominada "Investigações Executadas a Partir da Frente de Escavação). A este custo deve ser adicionado aquele relativo ao custo de implantação do túnel. No valor total, deve ser incluído o gasto com as investigações, além do custo relativo ao tempo em que a escavação permaneceu parada para execução das perfurações no túnel e do tempo para tratamento das informações.

As equações apresentadas neste subitem e no subitem 4.3.1 permitem que o valor esperado das conseqüências seja calculado e incorporado ao custo de implantação do túnel, segundo o método de escavação analisado.

Deve-se ressaltar que, o custo de construção do túnel para um determinado método de escavação, é sempre o mesmo, independente da condição de análise, ou seja, para as condições de análise 1, 2, 3, ou 4, o custo básico dos métodos construtivos A, B ou C não se altera (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 representam condições de análise distintas, mas o custo básico de implantação do túnel não se altera. Esta consideração também é válida para os métodos construtivos B e C).

5 TEORIA DA DECISÃO E PROBABILIDADE SUBJETIVA

Análises de risco e/ou sistemas de gerenciamento de risco são desenvolvidos utilizando-se técnicas específicas ou uma combinação de diferentes técnicas de análise, dentre as quais destaca-se a análise de decisão, cujo objetivo é prover racionalidade para a tomada de decisão sob condições de risco e incerteza.

A aplicação da análise da decisão requer a avaliação de parâmetros, cuja determinação envolve incertezas, pois seus valores dependem da ocorrência de eventos aleatórios (CARVALHO, 1996). Segundo SLOVIC *et al.* (1974), trata-se de se efetuar escolhas lógicas em situações complexas e incertas que, como em um jogo, corresponde à efetuar a “melhor aposta”.

É debitada a Bernoulli (1738, apud SLOVIC *et al.*, 1974), a definição do conceito de “melhor aposta”, como sendo aquela que maximiza a “utilidade esperada” de uma decisão, ou seja, maximiza a relação:

$$UE(A) = \sum_{i=1}^n P(E_i) \cdot U(X_i) \quad (43)$$

onde,

UE (A) – é a utilidade esperada de um curso de ações, cujas conseqüências $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, dependem dos eventos $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$;
 P (E_i) – probabilidade da i-ésima conseqüência da ação;
 U (X_i) – valor subjetivo ou utilidade da conseqüência;

Ou seja, um indivíduo é capaz de escolher entre as alternativas disponíveis, de tal forma que a satisfação proveniente da sua escolha seja a maior possível.

Segundo SLOVIC *et al.* (1974), deve-se a VON NEUMANN e MORGENTERN (1947), os avanços mais significativos na teoria da decisão, devido à formalização da justificativa para o critério de “utilidade esperada”. Foi demonstrado que se as preferencias de um indivíduo satisfizerem certos axiomas básicos, então sua decisão pode ser descrita como a “maximização da utilidade esperada”. Uma generalização desta teoria, elaborada por SAVAGE (1954, apud SLOVIC *et al.*, 1974), admitiu que o parâmetro P (E_i), da equação (43), representa uma probabilidade subjetiva.

A maximização da utilidade esperada é um guia do comportamento, visto que deriva de princípios axiomáticos básicos que, presume-se, são aceitos por qualquer indivíduo racional (SLOVIC *et al.*, 1974). Segundo BARNETT (1973, apud CARVALHO, 1996), a maximização da utilidade esperada garante a precisão matemática necessária à qual as pessoas devem se ater ao determinar valores de probabilidade. Se os axiomas básicos forem aceitos, pode-se obter a função utilidade de um indivíduo, que é a representação formal, matemática, da sua estrutura de preferências, em uma escala por ele determinada (GALVES, 1995)

O indivíduo deve ser coerente em suas apostas, ou seja, se o indivíduo atribui a probabilidade p ao evento E , ao evento E_1 , complementar ao evento E , deve ser atribuída a probabilidade $(1 - p)$. Segundo CARVALHO (1996), se assim não fosse, seria possível estabelecer uma combinação de apostas que levariam o indivíduo a perder em qualquer situação (o evento E ocorrendo ou não).

Alem de ser coerente em suas apostas o indivíduo deve atender a dois outros princípios axiomáticos. O primeiro deles é o princípio da transitividade, ou consistência. Este princípio, usualmente utilizado para conseqüências mas também aplicado para ações ou probabilidades (SLOVIC *et al.*, 1974) estabelece que, se o evento E_1 é mais provável que o evento E_2 e este evento é mais provável que o evento E_3 , então o evento E_1 deve ser mais provável que E_3 . Segundo RAIFFA (1977), o princípio da transitividade pode ser enunciado da seguinte forma: seja A , B , e C , quaisquer três alternativas. Se um decisor tiver preferências entre essas alternativas, então essas preferências devem ser compatíveis no seguinte sentido: se é indiferente entre A e B , e entre B e C , então é indiferente entre A e C ; se há preferência entre A a B , e prefere B a C , então também prefere A a C ; se há preferência entre A a B , e é indiferente entre B e C , então prefere A a C .

Um outro importante princípio da racionalidade, conhecido como princípio da substituíbilidade (RAIFFA, 1977), estabelece que se a conseqüência X_i é a mesma para duas ações que envolvem risco, então o valor de X_i deve ser indiferente na escolha entre duas opções ou, de outra forma, a conseqüência que não é afetada pela sua escolha não deve influenciar a sua decisão de probabilidades (SLOVIC *et al.*, 1974).

A aplicação da teoria admite que um indivíduo racional seleciona ações que são logicamente consistentes com as suas preferências básicas em relação às

conseqüências e de seus sentimentos sobre a probabilidade dos eventos dos quais aquelas conseqüências dependem.

Se o julgamento do indivíduo for quantificado segundo os princípios acima estabelecidos, atende aos axiomas da teoria das probabilidades, podendo-se, desta forma, aplicar todas as regras usuais do cálculo probabilístico à manipulação dessa quantidades (CARVALHO, 1996).

Segundo SLOVIC *et al.* (1974), estabelecidos e respeitados os princípios, o problema prático torna-se uma lista de alternativas e na determinação das valores subjetivos das conseqüências e de suas probabilidades de maneira que a utilidade esperada de cada alternativa possa ser calculada. Uma dificuldade que deriva da aplicação desta teoria advém do fato de que o leque de alternativas teoricamente possíveis é, freqüentemente, muito grande.

No entanto, segundo HOGARD (1975, apud CARVALHO, 1996), a maior dificuldade na aplicação desta teoria esta no fato de que o ser humano dispõe de uma capacidade limitada para processar informações. Sua percepção da informação não é compreensiva, mas seletiva. As expectativas a respeito do que deve perceber determina, em larga escala, o que os indivíduos realmente percebem. Além disso, como não consegue integrar simultaneamente um grande número de informações, estas são processadas de maneira seqüencial. Sendo incapaz de elaborar operações mentais complexas, vale-se de mecanismos cognitivos de simplificação.

Segundo TVERSKY e KAHNEMAN (1973, apud SLOVIC *et al.*, 1974), o ser humano estima freqüências e probabilidades a partir de um pequeno número de estratégias mentais, ou heurísticas, o que permite reduzir as dificuldades colocadas em julgamentos mais simples. Estas estratégias, apesar de mostrarem-se eficazes, podem produzir erros sistemáticos importantes (TVERSKY, 1974, apud CARVALHO, 1996).

É fato que os indivíduos em seus julgamentos, ou na avaliação de probabilidade de eventos incertos, não seguem os princípios da teoria da probabilidade. Na verdade, as distorções nas avaliações de probabilidades subjetivas são freqüentemente consistentes e difíceis de eliminar (SLOVIC *et al.*, 1974).

Portanto, o julgamento subjetivo individual envolve uma série de problemas, associados aos erros e desvios a que estão sujeitos os indivíduos envolvidos nas análises.

Os problemas potenciais referem-se principalmente à: a) não quantificação da incerteza; b) definição insuficiente do problema; c) pressupostos não identificados; d) à imprecisão; e) análises tendenciosas de natureza motivacional; f) análises tendenciosas de natureza cognitiva e; g) problemas associados à falta de credibilidade (ROBERDS, 1990).

A não quantificação, ou a quantificação de forma errada ou insuficiente da incerteza, advém quando pessoas não treinadas em análises estatísticas expressam a incerteza de algum parâmetro de modo inconsistente, ou têm dificuldade em quantificar as incertezas de forma acurada.

A definição do problema, ou de algum parâmetro, de forma errada ou insuficiente, reflete situações onde o valor a ser avaliado, que deve ser definido de forma consistente, é definido de forma ambígua, fazendo com que as bases das avaliações sejam inconsistentes.

Por vezes, os pressupostos subjacentes que balizam as avaliações podem não estar perfeitamente identificados e, desta forma, encobrir a natureza condicional da avaliação. Por exemplo, assumir a hipótese de ruptura circular em maciço rochoso, onde a ruptura em cunha através do sistema de fraturas é claramente preferencial, na avaliação do valor do ângulo de atrito quando se está analisando a estabilidade de um determinado talude.

A imprecisão na avaliação decorre da indiferença em relação ao range de variação do valor de um parâmetro, de forma que pode haver variações significativas nas avaliações. Estas poderiam ser refinadas com análises e/ou considerações adicionais.

As análises tendenciosas, de origem motivacional ou cognitiva, decorrem de desvios que permanecem subjacentes às avaliações. Estes desvios impedem que o real conhecimento dos indivíduos esteja refletido de forma acurada nas análises (ROBERDS, 1990).

Os desvios de ordem motivacional podem ocorrer devido a vários problemas, tal como, o desvio na condução de um problema. Este tipo de desvio pode ocorrer quando o indivíduo procura atingir um objetivo específico ao invés de avaliar a incerteza de um determinado parâmetro, por exemplo, superestimar o valor do ângulo de atrito objetivando obter um alto fator de segurança na análise de estabilidade de um talude, se este for o real objetivo da avaliação.

Há desvios que refletem a reação de indivíduos que, por acreditarem que “experts” devem estar seguros quanto às suas análises, tendem a subestimar as incertezas.

Os desvios devido a conflito de interesses referem-se a indivíduos que podem se sentir encorajados a fazer estimativas tendenciosas, podendo até visar, em alguns casos, recompensas monetárias e/ou resguardar interesses de terceiros.

As análises conservadoras referem-se a situações onde o indivíduo “deseja se enganar”, tendendo para o “lado da segurança”. Se um evento tem impactos adversos, o indivíduo pode querer “evitá-lo”, subestimando a probabilidade de ocorrência do evento.

Os desvios cognitivos estão associados aos processos mentais para avaliação de incertezas e são identificados como ajuste e ancoragem, disponibilidade, falta de moderação, coerência e distorção associativa, representatividade e excesso de confiança (ROBERDS, 1990).

O ajuste e ancoragem refere-se a uma tendência dos indivíduos em efetuar estimativas a partir de um valor inicial, eventualmente sugerido pela formulação do problema, e ajustá-lo sucessivamente para produzir o resultado final. Este processo produz ajustes insuficientes e imprecisos (SLOVIC *et al.*, 1974), cujo resultado final apresenta desvios em direção ao valor inicial (TVERSKY, 1974, apud CARVALHO, 1996)

A disponibilidade reflete a tendência que as pessoas têm de avaliar probabilidade de ocorrência de um evento pela facilidade com que eventos daquela natureza lhe vêm à memória. A noção de disponibilidade é uma das mais importantes para auxiliar no entendimento das distorções que ocorrem em nossas percepções, principalmente dos riscos naturais, pois, segundo KATES (1962, apud SLOVIC *et al.*, 1974), é grande a dificuldade dos indivíduos de imaginar e conceituar eventos que nunca ocorreram. Há, no entanto, outros fatores que afetam a disponibilidade. Segundo ROBERDS (1990), há uma tendência do indivíduo sobrevalorizar experiências passadas e que tenham um alto significado pessoal e que podem ser assinaladas como de alta probabilidade de ocorrência devido ao alto impacto emocional causado.

A falta de moderação, ou a lei dos pequenos números, refere-se à tendência dos indivíduos valorizarem somente informações específicas, dando pouca importância a informações gerais. Segundo ROBERDS (1990), evidências empíricas indicam que os

indivíduos tendem, freqüentemente, a associar informações menos importantes às informações gerais.

A coerência e distorção de associação refere-se à tendência que os indivíduos têm de não considerar e não combinar de forma apropriada todos os componentes do problema. Em situações onde vários parâmetros têm que ser avaliados e tratados de forma conjunta, como por exemplo na avaliação da estabilidade de um talude. Há uma tendência dos indivíduos superestimarem a estabilidade do referido talude (ROBERDS, 1990).

A representatividade segundo ROBERDS (1990), é a tendência do indivíduo tratar todas as informações da mesma forma, mesmo que algumas não tenham representatividade estatística. Para TVERSKY (1974, apud CARVALHO, 1996), a representatividade também se manifesta em situações em que se busca avaliar a probabilidade de um determinado processo A gerar um evento B, quando os aspectos essenciais de A e B são comparados e, por representatividade ou similaridade entre os mesmos, é correlacionada similaridade e probabilidade.

O excesso de confiança advém da tendência dos indivíduos de subestimar a incerteza sobre o valor do parâmetro.

Finalmente, há uma limitação relativa à credibilidade do indivíduo responsável pelas avaliações, ou seja, se o analista não é considerado um "expert" no seu campo de atuação, independente de outras limitações, pode faltar credibilidade e os resultados não serem defensáveis frente a outros "experts", ou para a opinião pública (ROBERDS, 1990).

As técnicas disponíveis para eliminar, ou reduzir, os problemas associados com o julgamento subjetivo individual são resumidas no QUADRO 5 e, segundo ROBERDS (1990), incluem:

- avaliação individual – é considerada a técnica mais simples, onde o analista interpreta as informações disponíveis e quantifica os valores mais prováveis e a incerteza associada. Esta forma necessita ser bem documentada, incluindo a descrição e a avaliação das informações disponíveis de forma a conceder maior credibilidade ao processo. Embora seja bastante atrativa pela sua simplicidade este método apresenta limitações significativas, traduzidas pela não quantificação ou limitação na quantificação das incertezas, desvios motivacionais ou cognitivos não corrigidos, pressupostos não especificados, imprecisão e falta de credibilidade;

• solicitação informal da opinião de especialista - é um dos métodos mais utilizados, onde o analista solicita a um "expert" que este interprete as informações disponíveis e quantifique o valor mais provável e a incerteza associada a um parâmetro. Necessita ser bem documentada, incluindo a descrição e a avaliação das informações disponíveis e as avaliações elaboradas pelo "expert". Apresenta como vantagem em relação a auto avaliação o aumento da credibilidade. Tem, no entanto, praticamente as mesmas limitações, em particular, a definição insuficiente do problema;

QUADRO 5 - Técnicas de Avaliação Subjetiva Individual (modificado de ROBERDS, 1990)

TÉCNICAS DE ANÁLISE	PROBLEMAS					
	Não Quantificação da Incerteza	Quantificação Insuficiente do Problema	Desvios não Corrigidos/ Pressupostos Não Especificados	Imprecisão	Falta de Credibilidade	Custo
Avaliação Individual	1	3	1	1	1	3
Opinião Informal de Especialista	1	1	1	1	2	2
Avaliação Calibrada	2	1	2	1	2	2
Codificação de Probabilidades	3	3	3	2	2	2

1 - Técnica não minimiza o problema de forma significativa

2 - Técnica minimiza parcialmente o problema

3 - Técnica minimiza efetivamente o problema potencial

• avaliação calibrada - é uma técnica onde os desvios de avaliação do especialista são identificados e calibrados de forma a ajustar e corrigir estes desvios, requerendo, portanto, duas avaliações: do avaliador e dos desvios deste. A avaliação do avaliador pode ser efetuada de forma subjetiva ou objetivamente através de uma série de experimentos ou questionários. A forma objetiva de avaliação do avaliador consiste na formulação de uma série de questões sobre o valor de determinado parâmetro, cuja resposta é disponível porém desconhecida do avaliador. O assessor deve avaliar o valor do parâmetro utilizando as informações disponíveis, que quando comparado ao

valor real permite determinar um fator que deve ser utilizado para corrigir as avaliações por ele elaboradas. Devido as dificuldades de calibração, esta técnica apresenta limitações similares às anteriores;

- codificação de probabilidades – é a técnica mais apropriada para o desenvolvimento de um processo de avaliação e probabilidades subjetivas. Na codificação de probabilidades, é elaborada, de maneira própria e consistente, uma função que expressa a incerteza de um avaliador sobre o valor de um determinado parâmetro, em termos quantitativos. Segundo ROBERDS (1990), esta técnica é a mais recomendada e que apresenta melhores resultados na avaliação de probabilidades subjetivas.

5.1 Avaliação de Probabilidades Subjetivas - Codificação de Probabilidades

O processo de codificação de probabilidades consiste na elaboração, por um analista, de uma função densidade de probabilidade do valor de um parâmetro. Esta função exprime a incerteza de um avaliador no valor do parâmetro, expressa em termos quantitativos.

Este procedimento é desenvolvido formalmente em cinco estágios, durante os quais deve-se: definir o parâmetro a ser avaliado de forma consistente; conduzir o processo para quantificar as incertezas de forma apropriada, identificando e minimizando as tendências e os desvios; documentar todo o processo de avaliação e todas as informações disponíveis; desenvolver, utilizando métodos diretos ou indiretos, e documentar o processo de avaliação quantitativa das incertezas; verificar a consistência das avaliações e, se necessário, repetir todo o processo (ROBERDS, 1990).

As etapas de motivação, estruturação, condicionamento, codificação e verificação correspondem aos cinco estágios relativos ao processo para a codificação de probabilidades (SPLETZLER e HOLSTEIN, 1977, apud ROBERDS, 1990; CARVALHO, 1996).

As etapas de motivação, estruturação e condicionamento correspondem às etapas prévias, que antecedem a etapa de codificação de probabilidades propriamente dita. Nestas etapas é que são estabelecidas as bases e o entendimento para que as avaliações e as probabilidades obtidas na fase de codificação reflitam, de fato, a

opinião do avaliador. Segundo CARVALHO (1996), os desvios motivacionais devem ser superados na fase de motivação, quando o analista apresenta ao avaliador o processo de análise de decisão, o assunto que será objeto de análise, os conceitos e os pressupostos do sistema de gerenciamento de risco adotado. À fase de estruturação é reservada a oportunidade de definir e discutir a estrutura do modelo de decisão e de gerenciamento de risco, incluindo os eventos e as variáveis aleatórias cujas probabilidades serão estimadas, a seqüência cronológica dos eventos, etc. A etapa de condicionamento completa as fases iniciais. Esta constitui uma fase preparatória para a estimativa de probabilidades, onde o avaliador especifica os pontos que servem de base para o seu julgamento, e é utilizada, basicamente, para neutralizar os desvios de natureza cognitiva e outras possíveis fontes de erros.

A fase de codificação corresponde à etapa onde o julgamento do avaliador é quantificado em termos probabilísticos, seja em valores de probabilidade de ocorrência, no caso de avaliação de eventos singulares, ou através de uma curva de distribuição acumulada, no caso de avaliação de variáveis aleatórias (CARVALHO, 1996).

As técnicas para obtenção e quantificação de probabilidades subjetivas são instrumentos que, quando aplicados pelo analista, auxiliam o avaliador a emitir avaliações coerente e consistentes. Segundo SPETZLER e HOLSTEIN (1975, *apud* GALVES, 1995) estas técnicas são divididas nos seguintes grupos:

- técnicas em que o avaliador é solicitado a estimar valores de uma variável aleatória, para determinados valores de probabilidade;
- técnicas em que o avaliador é solicitado a estimar probabilidades, para determinados valores de uma variável aleatória; e
- técnicas em que o avaliador fornece pontos da curva de distribuição acumulada de uma variável aleatória (valores da variável aleatória e suas respectivas probabilidades).

A aplicação de quaisquer destas técnicas implica em uma série de questões que são formuladas pelo analista e propostas ao avaliador, às quais este responde de modo direto ou indireto.

Segundo CARVALHO (1996), nos métodos diretos, as questões são respondidas ao analista por meio de respostas numéricas diretas. Dependendo da técnica utilizada e da forma como a questão foi formulada, o avaliador pode fornecer o

valor da variável aleatória para vários níveis de probabilidade acumulada, fornecer a probabilidade acumulada associada a vários valores da variável aleatória, ou então, fornecer o valor de ambos conjuntamente, ou seja, o valor da variável e suas respectivas probabilidades acumuladas.

Nos métodos indiretos de resposta, o avaliador escolhe entre situações de incerteza, representadas por duas ou mais loterias. As loterias são ajustadas até que o avaliador seja indiferente entre elas. Essa indiferença pode ser traduzida por uma estimativa de probabilidade ou valor. Um procedimento utilizado consiste em relacionar uma loteria ao evento incerto e a outra refere-se a um evento conhecido.

A aplicação destes métodos pode valer-se de processos de referência externos ou internos.

Os métodos com processo externo de referências utilizam instrumentos capazes de gerar eventos aleatórios com probabilidade de ocorrência conhecida, como base para as comparações com o evento analisado. A referência externa pode ser qualquer instrumento, desde que apresente significado para o avaliador. A roda de probabilidades é um instrumento bastante útil e muito utilizado na obtenção da distribuição acumulada de probabilidades.

Neste procedimento é utilizado um disco com dois setores ajustáveis, com cores diferentes, cujo tamanho relativo pode ser alterado. A roda de probabilidades dispõe em seu centro de um ponteiro fixo e, quando girado o disco, o mesmo acaba parando em um dos setores indicados pelo ponteiro fixo. Dado que o tamanho relativo dos dois setores pode ser alterado, a probabilidade relativa associada a cada setor também é alterada.

A aplicação deste processo compreende solicitar ao avaliador que este escolha entre duas alternativas, a ocorrência do evento incerto ou o ponteiro da roda indicar um determinado setor, que correspondem a duas apostas. Por exemplo, o avaliador ganha se o disco parar em um determinado setor ou ganha se a variável analisada exceder a um determinado valor. Durante o processo de avaliação, o tamanho relativo dos setores da roda de probabilidades é alterado até que o avaliador considere as duas alternativas igualmente prováveis, ou seja, o avaliador é indiferente às duas apostas. Nesta condição, o tamanho relativo do setor considerado corresponde à probabilidade subjetiva da variável exceder o valor fixado. A aplicação do método para os diferentes

valores que a variável aleatória pode assumir permite estabelecer a curva de distribuição acumulada de probabilidades.

Os métodos com processo interno de referência constituem outro procedimento para estimar probabilidades subjetivas de eventos incertos. Neste métodos, também denominados de métodos de eventos internos, o avaliador compara proposições que envolvem resultados da própria variável aleatória que esta sendo analisada.

Uma das técnicas de avaliação de probabilidades subjetivas que utilizam o método de eventos internos é a técnica do intervalo. Nesta técnica, o intervalo abrangendo todos os resultados possíveis que a variável pode assumir é dividido em duas partes e o avaliador é solicitado a escolher a parte que o mesmo julga ser mais provável. A posição do ponto de divisão é ajustado até que o avaliador seja indiferente entre os dois subintervalos, ou seja, dois intervalos de mesma probabilidade de ocorrência. Este ponto de divisão corresponde ao valor da variável, cuja probabilidade acumulada de ocorrência corresponde a 50 %. Este procedimento é repetido para os intervalos correspondentes às probabilidades acumuladas de 25 % e 75 %, obtendo-se, desta forma, três pares de valores relativos aos valores da variável aleatória e as respectivas probabilidades acumuladas. Os pontos obtidos permitem estabelecer um esboço da curva de distribuição acumulada de probabilidades.

Uma outra técnica de avaliação de probabilidades subjetivas que utiliza o método de eventos internos é o método das apostas. Neste método, o avaliador é estimulado a estabelecer se o mais provável é a variável aleatória assumir um valor maior ou igual a "x", ou menor que "x". Na sequência, o avaliador deve estabelecer quão mais provável é a proposição escolhida, apostando em sua resposta. Se para o avaliador é mais provável que a variável aleatória (V) seja menor ou igual a "x" e a sua aposta nesta hipótese é a : b, a probabilidade do valor da variável ser menor ou igual a "x" fica determinada pela expressão:

$$P(V \leq x) = \frac{a}{(a+b)} \quad (44)$$

Aplicando-se o método para diferentes valores de "x", dentro do intervalo de variação da variável aleatória, é possível estabelecer a curva de distribuição acumulada de probabilidades para a variável analisada.

6 APLICAÇÃO DO MODELO DE DECISÃO

O túnel da Linha 4 - Amarela, a ser construído em São Paulo, vem sendo estudado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO desde 1990, quando foram executadas as primeiras sondagens para investigação do maciço no trecho compreendido entre a Luz e a avenida Paulista. A partir de 1994 foi desenvolvido o projeto básico do trecho compreendido entre a avenida Paulista e a Vila Sônia, com um grau de detalhamento de projeto compatível com as exigências dos organismos internacionais de financiamento. O projeto inicial previa a construção dos túneis em NATM, conceito revisado em 1998 para o trecho Paulista - Luz, quando foi adotada como solução de projeto, a escavação mecanizada de grande diâmetro, para via dupla, para o trecho em sedimentos terciários (ROCHA *et al.*, 2002).

Em 2001 todo o projeto do túnel foi revisado, destacando-se as alterações relativas ao trecho compreendido entre as estações Faria Lima e Caxinguí, que foi revisto, visando adequar o projeto do trecho em rocha, e também do trecho “misto” de solo e rocha, para ser escavado com equipamentos TBM de grande diâmetro (ROCHA *et al.*, 2002; ROCHA e LEITE, 2002).

Embora as alterações no projeto tenham resultado de decisões tomadas durante o transcorrer desta pesquisa, todas as análises efetuadas neste trabalho têm por base as condições e características do projeto anteriores a tais alterações.

Assim, o trecho de interesse direto a este estudo compreende o segmento de túnel de aproximadamente 2800 m a ser escavado em rocha, cujo projeto inicial previa escavação executada totalmente em NATM.

Neste trecho, o teto do túnel situa-se entre as cotas 697 m e 710 m, correspondendo a profundidades da ordem de 25 m a 30 m, em média (profundidades máximas e mínimas variando entre 41 m e 18 m, respectivamente), com recobrimento de rocha, acima do teto do túnel, variando entre 0 m e 17 m.

Em contraposição à escavação pelo método convencional, o estudo propõe, dentro do modelo de decisão adotado, a escavação do túnel por máquinas tuneladoras TBM, mantendo as mesmas condições geométricas previstas para a escavação em NATM, ou seja, a proposta alternativa de escavação em TBM não contempla as alterações implementadas em 2001, após estudos e revisões de projeto efetuados pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO.

Da mesma forma, o método denominado neste estudo de NATM modificado, qual seja, o método de escavação convencional em NATM, com tratamentos prévios sistemáticos na frente, antes do avanço da escavação, também compreende análises efetuadas nas mesmas condições que aquelas executadas para os dois outros métodos construtivos.

6.1 Definição e Caracterização da Área para Aplicação do Modelo de Decisão

As análises efetuadas no Capítulo 3 conduziram ao zoneamento de risco nos entornos da área ao longo da qual o túnel vai ser implantado. Nestas análises verificou-se que os trechos correspondentes à área sob as marginais do rio Pinheiros (compreendendo todas as pistas daquela avenida, a passagem sob o rio Pinheiros e a linha férrea da CPTM) e um pequeno trecho sob a avenida Francisco Morato, compreendem as áreas de maior risco, como resultado da conjugação da susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco e da magnitude esperada das conseqüências decorrentes da deflagração desses processos. Em vista do objetivo inicialmente estabelecido para esta pesquisa, qual seja, desenvolver metodologia de análise de risco, na qual as incertezas de natureza geológica são incorporadas ao projeto e construção de túneis em áreas urbanas, este estudo aborda um aspecto muito particular do problema, que são os prejuízos causados à população da cidade, pela interrupção do trânsito em grandes avenidas sob as quais os túneis são normalmente implantados.

É certo que este é um aspecto pouco abordado pelo meio técnico nacional e internacional, uma vez que os prejuízos causados integram os denominados interesses difusos da população. Estes interesses, via de regra, não estão contemplados nas análises e/ou programas de gerenciamento de risco das grandes obras de engenharia, fato que justifica a aplicação da metodologia proposta na área das avenidas marginais do rio Pinheiros.

A título de exemplo, a metodologia proposta será aplicada na região onde o túnel, com cerca de 80 m de extensão, cruza sob a pista expressa da avenida marginal do rio Pinheiros, sentido centro-bairro. Esta pista concentra uma das mais altas, se não a mais alta intensidade de tráfego da cidade de São Paulo, em via com capacidade de escoamento do trânsito da ordem de 13.000 veículos/hora.

O maciço na área de análise é constituído por gnaiss predominantemente bandado, cujo índice Q (GRIMSTAD e BARTON, 1993), nas sondagens, varia entre 0,2 e 5,0. Os valor típico do índice Q para este tipo de maciço e que pode ser adotado em projeto varia de 1,0 a 2,0 (IPT, 1998a). O projeto prevê escavação parcializada com avanço máximo de 1,0 m e, segundo as sugestões apresentadas por GRIMSTAD e BARTON (1993), para o diâmetro de 9,3 m do túnel, o suporte primário previsto é constituído por concreto projetado com fibras de aço, com até 0,15 m de espessura, associado a ancoragem sistemática (malha com cerca de 1,5 m e profundidade de ancoragem da ordem de 2,0 m).

Segundo os critérios estabelecidos nesta pesquisa, as sondagens neste trecho foram executadas com uma densidade e segundo uma geometria considerada adequada, frente à heterogeneidade do arcabouço geológico-estrutural do maciço. Em relação ao risco as investigações também foram consideradas adequadas. Frente à susceptibilidade do maciço em deflagrar os processos geradores de risco, as investigações executadas neste trecho foram classificadas como pouco adequadas.

6.2 Caracterização do Avaliador

A aplicação do modelo de decisão proposto pressupõe que a avaliação das probabilidades, por envolver a ocorrência de eventos incertos, incorporam, necessariamente, interpretações e julgamentos que são subjetivos e, via de regra, não únicos (ROBERDS, 1990). As avaliações e estimativas efetuadas nas análises de risco baseiam-se em métodos probabilísticos, onde o julgamento profissional desempenha um papel importante.

Desta forma, como destacado por CARVALHO (1996), ao se optar pela utilização de probabilidades subjetivas, defronta-se, inevitavelmente, com o problema da escolha do profissional responsável pela avaliação de probabilidades.

Em princípio, o ideal seria reunir todos os atores que possam interferir no projeto, tais como, o proprietário da obra, o projetista, o construtor, fornecedores, consultores autônomos, etc., constituindo uma comissão análoga àquela proposta por ANDERSON (1998), que visa enfrentar o problema de previsão e gerenciamento de riscos na construção de túneis em ambiente de incerteza.

No entanto, a avaliação de probabilidades subjetivas efetuada em grupos, envolve outras técnicas de análise (ROBERDS, 1990), constituindo matéria fora do escopo da presente pesquisa.

Portanto, no presente trabalho, a avaliação individual de probabilidades subjetivas envolve a participação de apenas um técnico encarregado pela tomada de decisões, denominado "decisor". Em grandes projetos de engenharia civil, a figura do decisor é assumida pelo gerente do projeto que, dependendo da estrutura da empresa ou da magnitude da decisão, pode ser assumida pelo gerente de engenharia ou pelo diretor de engenharia.

A estimativa de probabilidades envolve, necessariamente, conhecimentos específicos sobre os eventos aleatórios que serão avaliados. Desta forma, o decisor pode designar outra pessoa, delegando a tarefa de avaliar probabilidades a um indivíduo, denominado avaliador, que conheça com mais propriedade o arcabouço geológico e os condicionantes da estabilidade do maciço. No caso de túneis, além dos conhecimentos sobre as propriedades geológico-geotécnicas do maciço, o avaliador deve ter experiência em engenharia de túneis, em particular sobre os métodos construtivos e dos processos de instabilização e de contenção de maciços.

Segundo WINKLER (1967, apud CARVALHO, 1996), um bom avaliador deve, por princípio, obedecer aos axiomas básicos da teoria da decisão, ou seja, obedecer aos princípios da coerência, consistência e da substituíbilidade, além de ter conhecimento sobre os processos que estão sendo analisados. O "bom" avaliador, nas palavras de CARVALHO (1996), é aquele cujo julgamento corresponde a algo que acontece na realidade.

Nos estudos desenvolvidos nesta pesquisa, a Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRO - designou como avaliador o geólogo da Divisão de Projeto Civil daquela companhia.

O geólogo indicado é o responsável pela área de geologia de engenharia, da equipe de Coordenadoria de Dados Básicos e Geotecnia do METRO, tendo acompanhado todos os trabalhos relativos ao projeto da Linha 4, inclusive dos estudos mais recentes visando adequar a geometria do traçado ao uso de TBM.

6.3 Procedimento de Análise

Os primeiros contatos e entrevistas com o avaliador ocorreram logo após a Companhia do Metropolitano de São Paulo tê-lo indicado para exercer esta função, tendo em vista o desenvolvimento desta pesquisa. Nesta, o autor deste trabalho atuou como analista, figura que tem por tarefa auxiliar o avaliador a estimar a probabilidade de ocorrência dos eventos aleatórios.

Nas primeiras entrevistas foi discutido com o avaliador o papel das incertezas que cercavam o modelo geológico-geotécnico (apresentadas no Capítulo 3), bem como o papel desempenhado pelos condicionantes geológicos na estabilidade do maciço.

Uma vez estabelecida as bases comuns para o entendimento do comportamento do maciço, ou seja, as bases que tornam possível tecer prognósticos acerca das respostas do maciço quando da imposição das solicitações advindas pela implantação do túnel, passou-se à construção do modelo de decisão, traduzidos nos diagramas de fluxo de decisão ou, árvores de decisão.

Visto que uma árvore de decisão não representa um problema de maneira absoluta, mas sim, representa a forma como o decisor vê esse problema ou a forma como ele considera possível que o mesmo seja analisado, a anatomia da árvore de decisão é reflexo da opinião do decisor a respeito dos vários parâmetros que a compõe (CARVALHO, 1996), tais como, seqüência de eventos e ações, alternativas para redução do risco, conseqüências, etc.

Após a conformação das árvores de decisão em acordo com as preferências do avaliador, passou-se às primeiras estimativas de probabilidade.

6.3.1 Avaliação das probabilidades dos eventos aleatórios utilizando o método direto

As primeiras estimativas de probabilidade foram efetuadas de forma direta e objetivaram familiarizar o avaliador com as operações e procedimentos que seriam utilizados nas análises.

Nas primeiras entrevistas os processos geradores de risco encontravam-se descritos de forma a contemplar apenas as conseqüências potenciais em superfície, independente dos eventuais impactos no interior do túnel. Posteriormente, após os

procedimentos para estabelecer as curvas de distribuição de probabilidade de ocorrência dos processos geradores de risco, estes foram traduzidos em termos de volumes mobilizados em eventuais movimentações do maciço, conforme apresentado nas árvores de decisão.

Para o trecho em questão, foram avaliadas, para cada condição de análise, a probabilidade da escavação ocorrer sob condições favoráveis (situação onde não haveria manifestação dos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço) ou desfavoráveis (quando ocorre no mínimo uma das particularidades que condicionam a estabilidade do maciço). Posteriormente, passou-se às estimativas relativas à probabilidade de ocorrência dos processos geradores de risco.

A estratégia utilizada pelo avaliador para estimar as condições sob as quais a escavação iria se desenvolver, se favoráveis ou desfavoráveis, baseou-se, inicialmente, na admissão de que haveria igual probabilidade de ocorrer quaisquer dos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço. Por decorrência, foi também admitida que a probabilidade da escavação ocorrer sob condições favoráveis ou desfavoráveis era de 50 %. Posteriormente, o avaliador ponderou a probabilidade de ocorrência de cada condicionante, em função da distribuição dos diferentes litotipos nas sondagens (subitem 3.2.2 – FIGURAS 11 a 14), concluindo que a probabilidade de ocorrência dos condicionantes, nas condições desfavoráveis era de 49 %.

Desta forma, a probabilidade da escavação se desenvolver em condições desfavoráveis foi estimada pelo avaliador em 25 % (TABELA 18). A partir deste valor, o avaliador passou a fazer as estimativas relativas às demais condições de análise.

Observa-se que, para qualquer condição de análise, os valores estimados para a situação onde a escavação é conduzida sob condições desfavoráveis, são sempre muito próximos de 25 %, apresentando apenas uma pequena variação, inferior a 5 %.

Estes valores, ou melhor, a pequena variação no valor da probabilidade de ocorrência dos eventos indica que, provavelmente, o avaliador encontrava-se fortemente ancorado no valor inicialmente estabelecido, o que explicaria a pequena variação observada.

TABELA 18 – Probabilidades de ocorrência dos eventos aleatórios, estimadas de forma subjetiva com a utilização do método direto

Intervenções para redução do risco - Investigações/métodos construtivos		Probabilidade da escavação ocorrer sob condições desfavoráveis		Desempenho do método construtivo, executado sob condições desfavoráveis	Probabilidade de deflagração dos processos geradores de risco	
Não executar investigações adicionais - (Condição 1)	NATM	$p(A_1D)$	0,25	$V < 30 \text{ m}^3$	$p(P_1A_1D)$	0,40
				$30 \text{ m}^3 < V < 300 \text{ m}^3$	$p(P_2A_1D)$	0,50
				$V > 300 \text{ m}^3$	$p(P_3A_1D)$	0,10
	TBM	$p(B_1D)$	0,25	$V < 15 \text{ m}^3$	$p(P_4B_1D)$	0,45
				$15 \text{ m}^3 < V < 25 \text{ m}^3$	$p(P_5B_1D)$	0,50
				$V > 25 \text{ m}^3$	$p(P_6B_1D)$	0,005
Investigações a partir da superfície – maciço mais homogêneo - (Condição 2)	NATM	$p(A_2D)$	0,22	$V < 30 \text{ m}^3$	$p(P_1A_2D)$	0,45
				$30 \text{ m}^3 < V < 300 \text{ m}^3$	$p(P_2A_2D)$	0,45
				$V > 300 \text{ m}^3$	$p(P_3A_2D)$	0,10
	TBM	$p(B_2D)$	0,22	$V < 15 \text{ m}^3$	$p(P_4B_2D)$	0,50
				$15 \text{ m}^3 < V < 25 \text{ m}^3$	$p(P_5B_2D)$	0,45
				$V > 25 \text{ m}^3$	$p(P_6B_2D)$	0,005
Investigações a partir da superfície – maciço mais heterogêneo - (Condição 3)	NATM	$p(A_3D)$	0,28	$V < 30 \text{ m}^3$	$p(P_1A_3D)$	0,45
				$30 \text{ m}^3 < V < 300 \text{ m}^3$	$p(P_2A_3D)$	0,45
				$V > 300 \text{ m}^3$	$p(P_3A_3D)$	0,10
	TBM	$p(B_3D)$	0,28	$V < 15 \text{ m}^3$	$p(P_4B_3D)$	0,50
				$15 \text{ m}^3 < V < 25 \text{ m}^3$	$p(P_5B_3D)$	0,45
				$V > 25 \text{ m}^3$	$p(P_6B_3D)$	0,005
	NATM (mod.)	$p(C_3D)$	0,28	$V < 30 \text{ m}^3$	$p(P_1C_3D)$	0,47
				$30 \text{ m}^3 < V < 300 \text{ m}^3$	$p(P_2C_3D)$	0,43
				$V > 300 \text{ m}^3$	$p(P_3C_3D)$	0,10
Investigações a partir da frente de escavação - (Condição 4)	NATM	$p(A_4D)$	0,21	$V < 30 \text{ m}^3$	$p(P_1D)$	0,45
				$30 \text{ m}^3 < V < 300 \text{ m}^3$	$p(P_2A_4D)$	0,45
				$V > 300 \text{ m}^3$	$p(P_3A_4D)$	0,10
	NATM (mod.)	$p(C_4D)$	0,21	$V < 30 \text{ m}^3$	$p(P_1C_4D)$	0,40
				$30 \text{ m}^3 < V < 300 \text{ m}^3$	$p(P_2C_4D)$	0,45
				$V > 300 \text{ m}^3$	$p(P_3C_4D)$	0,15

No entanto, as discussões efetuadas ao longo do processo de avaliação de probabilidades, permitiram constatar que o avaliador tinha plena convicção de que as investigações geológico-geotécnicas executadas representavam de forma apropriada o arcabouço do maciço e que, para qualquer condição de análise, ou seja, executando-se, ou não, investigações adicionais, independente se estas seriam conduzidas a partir da superfície natural do terreno ou na frente de escavação, não haveria alteração no grau de conhecimento geológico do maciço e de suas propriedades geotécnicas. Sob o ponto de vista do avaliador, a realização de campanhas adicionais de investigação

geológico-geotécnica não constituiria, para o trecho em análise, estratégia adequada para redução do risco. Esta convicção manifestada nas avaliações diretas efetuadas, orientou as estimativas de probabilidade conduzidas nas etapas seguintes.

Para avaliação das probabilidades de deflagração dos processos geradores de risco, o avaliador utilizou o conceito frequencialista para estimar as probabilidades de ocorrência destes eventos. Neste caso, o avaliador utilizou a experiência do METRO em abertura de túneis em NATM em solo, cujo índice, representado pelo número de “acidentes” por extensão linear de túnel, foi extrapolado para as condições do túnel em análise.

Da mesma forma que para as avaliações anteriores, observam-se apenas pequenas variações em torno dos valores inicialmente estabelecidos (TABELA 18), havendo, inclusive, variações muito pequenas nas probabilidades, mesmo quando a avaliação envolve métodos tão distintos quanto NATM e TBM. Estes dados também indicariam que o avaliador poderia estar fortemente ancorado nos valores inicialmente estimados.

Durante o processo de avaliação, verificou-se que os valores obtidos nesta ocasião refletiam fortemente a inexperiência e relativo desconhecimento do avaliador, e da engenharia geotécnica brasileira, do processo de escavação por equipamentos TBM.

6.3.2 Avaliação de probabilidades pelo método de “codificação de probabilidades”

O processo de codificação de probabilidades consiste na obtenção de curvas de distribuição de probabilidade (densidade de probabilidade ou probabilidade acumulada) de eventos aleatórios. Estas curvas, obtidas com a ajuda de um analista, exprimem a incerteza de um avaliador acerca do valor de um determinado parâmetro, ou da probabilidade de ocorrência de um evento aleatório, expressas em termos quantitativos (ROBERDS, 1990).

Estas curvas são obtidas por meio de um processo de entrevistas com o avaliador, conduzidas pelo analista, obedecendo-se os princípios e procedimentos apresentados no Capítulo 5.

O roteiro de entrevistas foi elaborado com base na proposta apresentada por CARVALHO (1996), com as adaptações necessárias para a aplicação no presente

trabalho.

Roteiro de entrevistas:

- apresentação e esclarecimentos iniciais acerca das variáveis aleatórias que serão estimadas;

- as variáveis aleatórias cujos valores e distribuição de probabilidades serão avaliadas são: probabilidade de deflagração dos processos geradores de risco; volume de material mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco; número de dias em que os trabalhos de escavação deverão ficar parados no interior do túnel; - número de dias de interrupção do trânsito em superfície;

- informação do trecho do túnel que vai ser analisado, o tipo de maciço presente na área, quais as condições de análise (relativas às árvores de decisão), apresentação de todos os dados disponíveis e verificar se o avaliador tem necessidade de informações adicionais;

- atendidas as condições consideradas básicas tem início o processo de entrevista;

- a primeira etapa da entrevista corresponde à fase de condicionamento. As etapas iniciais de motivação e estruturação foram alcançadas nas primeiras fases do processo:

- 1 - você consegue visualizar e descrever os principais condicionantes da estabilidade do maciço rochoso e os processos que possam leva-lo à ruptura? Você dispõe de informação suficiente para analisar estes aspectos? Estas informações estão claras para você fazer suas análises? Você é capaz de avaliar o volume de maciço mobilizado em um eventual processo gerador de risco?

- 2 - qual é, em sua opinião, a probabilidade de ocorrência dos processos geradores de risco durante a escavação do túnel, antes da instalação do suporte primário? Você já fez uma avaliação destas probabilidades em uma etapa preliminar das análises. Caso você julgue necessário, faça as alterações que achar importante e que reflitam melhor a sua avaliação;

- a segunda etapa da entrevista corresponde à fase onde são levantados os dados necessários para a elaboração das curvas de distribuição das variáveis aleatórias;

3 - qual o volume máximo de material mobilizado, caso ocorra o desenvolvimento de um processo gerador de risco? Para esta situação qual o número máximo de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel (alternativamente, qual o número mínimo de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel)? Nesta situação, quais seriam os reflexos na superfície? Você pode avaliar, para esta situação, o número máximo de dias necessários para recuperação dos efeitos em superfície (alternativamente, qual o número mínimo de dias necessários para recuperação dos efeitos em superfície)?

4 - qual o menor volume de material mobilizado, caso ocorra a deflagração de algum processo gerados de risco? Para esta situação qual o número máximo de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel (alternativamente, qual o número mínimo de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel)? Nesta situação, qual seriam os reflexos na superfície? Você pode avaliar, para esta situação, o número máximo de dias necessários para recuperação dos efeitos em superfície (alternativamente, qual o número mínimo de dias necessários para recuperação dos efeitos em superfície)?

5 - é possível uma situação, considerada catastrófica, onde o volume de material mobilizado, o número de dias de interrupção dos trabalhos no interior túnel e o número de dias para reparo dos efeitos em superfície seriam maiores do que aqueles avaliados anteriormente? Caso positivo, quais seriam estes novos valores?

6 - ocorrendo o processo de instabilização, qual a probabilidade do processo evoluir e atingir a superfície? Alternativamente, qual a probabilidade do processo não alcançar a superfície?

7 - uma vez ocorrendo a deflagração de um processo gerador de risco, o cenário mais provável corresponde a: (método das apostas)

- mobilização de um volume de material maior que ____ m³ ou a mobilização de um volume menor ou igual a ____ m³?
- quão mais provável (em proporção, por exemplo, 2:1, 5:1, etc.) é o cenário escolhido no item acima?

(estas questões devem ser formuladas para diversos valores da variável, de modo a cobrir todo o intervalo de variação da mesma).

8 - considere o intervalo total de variação do volume de material mobilizado pela deflagração de um processo gerador de risco. É mais provável que o volume mobilizado situe-se entre ____ m³ e ____ m³ ou entre ____ m³ e ____ m³? (método dos intervalos)

- qual o volume mobilizado que divide todo o intervalo de variação da variável em dois subintervalos igualmente prováveis (50 %)?
- qual o volume mobilizado que divide o intervalo 0 – 50% em dois subintervalos igualmente prováveis?
- qual o volume mobilizado que divide o intervalo 50 – 100% em dois subintervalos igualmente prováveis?

9 - ocorrendo a deflagração do processo gerador de risco, indique o volume a partir do qual a ruptura pode atingir a superfície? Alternativamente, indique o volume a partir do qual a ruptura não deve atingir a superfície?

10 - uma vez ocorrendo a deflagração de um processo gerador de risco, o cenário mais provável corresponde a uma interrupção dos trabalhos no interior do túnel, ou, alternativamente, interrupção do trânsito em superfície: (método das apostas)

- maior que ____ dias, ou menor ou igual a ____ dias?
- quão mais provável (em proporção, por exemplo, 2:1, 5:1, etc.) é o cenário escolhido no item acima?

(estas questões devem ser formuladas para vários valores da variável, de modo a cobrir todo o intervalo de variação da mesma).

12 – Considere o intervalo total de variação do número de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel. (método dos intervalos)

É mais provável que o número de dias situe-se entre ____ dias e ____ dias ou entre ____ dias e ____ dias?

- qual o número de dias que divide o intervalo considerado em dois subintervalos igualmente prováveis?

- qual o número de dias que divide o intervalo 0 – 50% em dois subintervalos igualmente prováveis
- qual o número de dias que divide o intervalo 50 – 100% em dois subintervalos igualmente prováveis?

13 - qual o volume de material mobilizado a partir do qual devem ocorrer deformações em superfície, acima dos valores admitidos em projeto? Para o volume assim definido, qual o número de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel (necessários até a retomada normal das escavações)? Qual o número de dias de interrupção do tráfego em superfície?

14 - alternativamente, qual o volume de material mobilizado que não deve provocar deformações em superfície, acima das estabelecidas em projeto? Nestas condições, qual o número de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel?

A aplicação das entrevistas com o avaliador permitiu a determinação das curvas de distribuição de probabilidades (FIGURAS 42 a 49), a partir das quais obtém-se os valores esperados das variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco”, “número de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel” e “número de dias de interrupção do trânsito em superfície”, assim como a probabilidade de ocorrência destes eventos aleatórios (TABELA 19).

Apenas os valores atribuídos à probabilidade de ocorrência de condições favoráveis e/ou desfavoráveis durante a escavação do túnel, foram efetuados por meio de estimativas diretas, realizadas nas primeiras etapas dos trabalhos, conforme explicitado no subitem 6.3.1 (Avaliação das probabilidades dos eventos aleatórios utilizando o método direto).

As informações contida na TABELA 19, relativa aos valores estimados das diversas variáveis que compõem o problema, ou seja, a probabilidade da escavação ocorrer sob condições desfavoráveis, da probabilidade de deflagração dos processos geradores de risco, do volume esperado de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco, e do número máximo de dias de interrupção dos trabalhos no túnel e em superfície, permitem, com o uso das equações (1) a (42) apresentadas nos subítem 4.3.1 e 4.5, que relatam os procedimentos para o cálculo

das consequências potenciais e os critérios de decisão, o cálculo do valor monetário esperado das consequências.

FIGURA 42 - Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória "volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco". Processo construtivo - NATM

FIGURA 43 - Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória "número de dias de interrupção das escavações no interior do túnel". Processo construtivo - NATM

FIGURA 44 - Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória "número de dias de interrupção do trânsito em superfície". Processo construtivo – NATM

FIGURA 45 - Curva de correlação entre as variáveis aleatórias "volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco" e o "número de dias de interrupção das escavações no interior do túnel". Processo construtivo – NATM

FIGURA 46 – Curva de correlação entre as variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco” e o “número de dias de interrupção do trânsito em superfície”. Processo construtivo – NATM

FIGURA 47 – Distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco”. Processo construtivo – TBM

FIGURA 48 – Curva de correlação entre as variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco” e o “número de dias de interrupção das escavações no interior do túnel”. Processo construtivo – TBM

FIGURA 49 – Curva de correlação entre as variáveis aleatórias “volume de maciço mobilizado com a deflagração dos processos geradores de risco” e o “número de dias de interrupção dos trabalhos no interior do túnel e do trânsito em superfície”. Processo construtivo – TBM

TABELA 19 – Valores esperados das variáveis aleatórias e probabilidade de ocorrência dos eventos aleatórios, estimados de forma subjetiva, para o trecho em análise

Intervenções para redução do risco - Investigações e métodos construtivos		Probabilidade da escavação ocorrer sob condições desfavoráveis		Volume de maciço mobilizado estimado (m³)	Probabilidade de deflagração dos processos geradores de risco		Número máximo de dias de interrupção dos trabalhos	
							No túnel	Em superfície
Não executar investigações adicionais - (Condição 1)	NATM	p(A ₁ D)	0,25	24,9	p(P ₁ A ₁ D)	0,11	3	0
				217,5	p(P ₂ A ₁ D)	0,43	10	5,5
				622,5	p(P ₃ A ₁ D)	0,32	25	9
				1563,7	p(P ₄ A ₁ D)	0,021	67	10
	TBM	p(B ₁ D)	0,25	9,8	p(P ₅ B ₁ D)	0,68	3	0,5
				20,6	p(P ₆ B ₁ D)	0,26	4,5	1,5
				27,5	p(P ₇ B ₁ D)	0,015	6,5	3
Investigações a partir da superfície – maciço mais homogêneo - (Condição 2)	NATM	p(A ₂ D)	0,22	24,9	p(P ₁ A ₂ D)	0,11	3	0
				217,5	p(P ₂ A ₂ D)	0,43	10	5,5
				622,5	p(P ₃ A ₂ D)	0,32	25	9
				1563,7	p(P ₄ A ₂ D)	0,021	67	10
	TBM	p(B ₂ D)	0,22	9,8	p(P ₅ B ₂ D)	0,68	3	0,5
				20,6	p(P ₆ B ₂ D)	0,26	4,5	1,5
				27,5	p(P ₇ B ₂ D)	0,015	6,5	3
Investigações a partir da superfície – maciço mais heterogêneo - (Condição 3)	NATM	p(A ₃ D)	0,28	24,9	p(P ₁ A ₃ D)	0,11	3	0
				217,5	p(P ₂ A ₃ D)	0,43	10	5,5
				622,5	p(P ₃ A ₃ D)	0,32	25	9
				1563,7	p(P ₄ A ₃ D)	0,021	67	10
	TBM	p(B ₃ D)	0,28	9,8	p(P ₅ B ₃ D)	0,68	3	0,5
				20,6	p(P ₆ B ₃ D)	0,26	4,5	1,5
				27,5	p(P ₇ B ₃ D)	0,015	6,5	3
	NATM (mod.)	p(C ₃ D)	0,28	24,9	p(P ₁ C ₃ D)	0,11	3	0
				217,5	p(P ₂ C ₃ D)	0,43	10	5,5
				622,5	p(P ₃ C ₃ D)	0,32	25	9
Investigações a partir da frente de escavação – (Condição 4)	NATM	p(A ₄ D)	0,21	1563,7	p(P ₄ C ₃ D)	0,021	67	10
				24,9	p(P ₁ A ₄ D)	0,11	3	0
				217,5	p(P ₂ A ₄ D)	0,43	10	5,5
				622,5	p(P ₃ A ₄ D)	0,32	25	9
	NATM (mod.)	p(C ₄ D)	0,21	1563,7	p(P ₄ A ₄ D)	0,021	67	10
				24,9	p(P ₁ C ₄ D)	0,11	3	0
				217,5	p(P ₂ C ₄ D)	0,43	10	5,5
				622,5	p(P ₃ C ₄ D)	0,32	25	9
				1563,7	p(P ₄ C ₄ D)	0,021	67	10

6.3.3 Cálculo do valor monetário esperado das consequências

O valor monetário das consequências, conforme relatado, é obtido pela aplicação das equações (1) a (42), obedecendo-se o processo de ponderação e regressão ao longo dos ramos das árvores de decisão, conforme recomendado por RAIFFA (1977). No entanto, para obtenção destes valores e no contexto deste trabalho, foi necessário admitir algumas hipóteses simplificadoras e estimar valores relativos a produtos e serviços utilizados na construção de túneis. Os valores apresentados neste trabalho (TABELA 20), são fruto de pesquisa informal de preços entre fornecedores, profissionais da área, projetistas, revista Construção, etc.

TABELA 20 – Valores de produtos e serviços utilizados para o cálculo do valor esperado das consequências

Descrição dos serviços	Unidade de medição	Preço unitário (US\$)
- Sondagens rotativas mistas, em granitos e gnaisses, diâmetro HWM, incluindo material e mão de obra, taxas de mobilização e instalação, relatórios, etc.	m	140,00
- Sísmica de reflexão, incluindo análises e relatório	km	1500,00
- fornecimento de concreto magro, incluindo materiais, equipamentos e mão de obra, etc.	m ³	80,00
- concreto projetado, fck = 20 Mpa, incluindo materiais, mão de obra e equipamentos	m ³	160,00
- injeção de cimento para consolidação do maciço, incluindo mão de obra e equipamentos	m	300,00

A Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO, gentilmente analisou informalmente os valores estimados, verificando a sua pertinência e se os mesmos guardavam relação com os preços praticados no mercado, de modo que as análises tivessem proximidade com a realidade. Os valores estimados foram convertidos em dólares americanos, à taxa de conversão do período em que os preços foram cotados.

Da mesma forma, os valores do metro de construção do túnel foram estimados e encontram-se apresentados na TABELA 21.

TABELA 21 – Valores estimados do metro de escavação do túnel, segundo os diferentes métodos construtivos

Método construtivo	US\$/m linear de escavação
NATM	8000,00
TBM	13875,00
NATM modificado	12000,00

Uma vez estimado o custo da escavação do túnel em NATM, o valor da construção em TBM foi estimado considerando-se que o custo de escavação deste método fosse da ordem de 1,5 vezes o custo da escavação em NATM, acrescido do custo para a amortização do investimento feito na aquisição do equipamento. Este valor foi calculado a partir do preço estimado do equipamento TBM (US\$ 15.000.000,00), amortizado nos 10,4 km de linha a ser construída. Dadas as peculiaridades do maciço rochoso a ser escavado, o que implica na necessidade de um equipamento com maior flexibilidade, admitiu-se que a amortização no trecho em rocha deva ser 30 % maior do que a amortização no trecho em solo, resultando em um valor de US\$ 1875,00, a ser acrescentado no metro de escavação com TBM.

O denominado método NATM modificado, compreende a necessidade de execução de tratamentos sistemáticos prévios antes do avanço da escavação, caso o maciço apresente as heterogeneidades associadas aos condicionantes geológicos de projeto, especialmente as zonas de composição biotítica subverticais e as estruturas de direção NNW, que impõem irregularidades extremas à zona de transição solo-rocha.

Admite-se que o método de tratamento consista na enfilagem sistemática da abobada do túnel, injetando-se entre 40 % e 50 % do perímetro do mesmo, com objetivo de consolidar o maciço previamente à escavação. Tendo em vista o diâmetro do túnel (9,3 m) e o custo do metro linear da injeção de consolidação (US\$ 300,00/m), estima-se que o custo do metro escavado, aplicando-se o método NATM modificado, seja 50 % superior ao método NATM.

Além do aspecto custo, é necessário admitir valores de produtividade para os métodos construtivos, pois estes também afetam o cálculo do valor esperado das consequências.

Os valores de produção média diária para os métodos NATM e NATM modificado foram estimados em 1,0 m/dia, conforme experiência da Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO na construção de túneis utilizando estes métodos. Para a construção do túnel utilizando equipamento TBM, o valor de produção média diária foi estimado em 4,5 m/dia, conforme valores de produtividade obtidos em maciços análogos ao da Linha 4 (Metro de Singapura, por exemplo) e segundo estimativas de produtividade dos fabricantes deste tipo de equipamento (ROCHA, 2002, informação pessoal).

Com base nestes dados e informações, foi calculado o valor esperado das consequências, conforme apresentado nas TABELAS 22 e 23.

TABELA 22 – Valor monetário estimado das consequências, para o trecho analisado

Método construtivo	Processo gerador de risco	Valor monetário esperado das consequências (10 ³ US\$)						
		No interior do túnel					Em superfície	Total
		P	E			R	T	
			E _E		E _M			
			E _{E1}	E _{E2}				
N	P1	24,00	5,18	-	-	-	-	29,18
A	P2	80,00	-	98,96	81,56	16,18	3.971,00	4.247,70
T	P3	200,00	-	283,24	233,44	46,31	5.046,00	5.808,99
M	P4	536,00	-	711,48	586,39	116,34	5.322,00	7.272,21
T	P5	187,31	2,04	-	-	-	1.324,00	1.515,35
B	P6	280,97	4,28	9,34	7,73	-	2.231,00	2.533,32
M	P7	405,84	5,72	12,51	10,31	-	2.886,00	3.320,38

P - valor monetário decorrente da paralização da frente de escavação;

E - valor monetário decorrente dos tratamentos de estabilização do maciço;

E_E - valor monetário decorrente dos tratamentos emergenciais de estabilização do maciço;

E_{E1} - valor monetário decorrente dos tratamentos emergenciais de estabilização do maciço - processos restritos ao interior do túnel;

E_{E2} - valor monetário decorrente dos tratamentos emergenciais de estabilização do maciço - processos que geram subsidências e crateras em superfície;

E_M - valor monetário decorrente dos tratamentos de estabilização do maciço;

R - valor monetário decorrente da reconstrução do trecho rompido do túnel;

T - valor monetário decorrente dos transtornos causados no trânsito;

6.3.4 Cálculo do valor monetário esperado do metro linear de construção

O valor monetário esperado do metro linear de construção é obtido somando-se o valor monetário esperado das conseqüências, ao custo básico de implantação do túnel. Quando são conduzidas investigações para aumentar o grau de conhecimento da geologia do maciço, os custos relativos a estes trabalhos devem ser incorporados ao custo básico de construção.

A opção “Executar investigações adicionais”, que corresponde à condição de análise 2 e 3, implica, conforme sugestão do avaliador, na execução de duas sondagens rotativas inclinadas (45°), uma em cada lado do rio Pinheiros, com direção perpendicular à orientação da foliação. Estes trabalhos podem ser complementados por ensaios de sísmica de reflexão, em linhas perpendiculares à direção da foliação.

Os custos destes trabalhos são estimados em US\$ 19.700,00 (relativas à execução de 130 m de sondagem rotativa e 1000 m de ensaios de sísmica de reflexão).

Estes trabalhos complementariam as investigações do trecho correspondente às marginais do rio Pinheiros, constituído pelos gnaisses bandados presentes na região. Visto que o trecho de maciço bandado tem cerca de 410,0 m (vai das proximidades da rua Capri até a rua Agostinho Cantú), o investimento nestas investigações corresponde a um custo estimado da ordem de US\$ 48,05/m ou, um investimento total da ordem de US\$ 3.844,00 para o trecho da marginal do rio Pinheiros que esta sendo analisado, com uma extensão da ordem de 80 m lineares.

No caso da realização de investigações na frente do túnel antes do avanço da escavação, que corresponde à condição de análise 4 (“Investigações executadas a partir da frente de escavação”), admite-se a execução de 4 perfurações a rotapercussão, com extensão aproximada de 30,0 m, o que garante a continuidade da escavação do túnel por 30 dias, antes da realização de novas investigações. O custo das perfurações (cerca de US\$ 20,00/m) e o tempo necessário para execução dos trabalhos (cerca de 4,0 h) implicam em um custo adicional da ordem de US\$ 213,00/m para o caso do avanço em NATM e em US\$ 280,00/m, no caso do avanço em NATM modificado. Estes custos significam valores da ordem de US\$ 17.040,00 e US\$ 22.400,00 a serem acrescidos aos custos totais de escavação quando se utiliza, neste trecho, os métodos NATM e NATM modificado, respectivamente.

TABELA 23 – Valor monetário esperado das consequências para o trecho analisado, segundo os diferentes processos geradores de risco, para as diferentes condições de análise

Intervenções para redução do risco - Investigações e métodos construtivos		Probabilidade da escavação ocorrer sob condições desfavoráveis		Probabilidade de deflagração dos processos geradores de risco		Valor monetário esperado das consequências potenciais
Não executar investigações adicionais - (Condição 1)	NATM	$p(A_1D)$	0,25	$p(P_1A_1D)$	0,11	28,18
				$p(P_2A_1D)$	0,43	4.247,70
				$p(P_3A_1D)$	0,32	5.808,99
				$p(P_4A_1D)$	0,021	7.272,21
	TBM	$p(B_1D)$	0,25	$p(P_5B_1D)$	0,68	1.515,35
				$p(P_6B_1D)$	0,26	2.533,32
				$p(P_7B_1D)$	0,015	3.320,38
Investigações a partir da superfície – maciço mais homogêneo - (Condição 2)	NATM	$p(A_2D)$	0,22	$p(P_1A_2D)$	0,11	28,18
				$p(P_2A_2D)$	0,43	4.247,70
				$p(P_3A_2D)$	0,32	5.808,99
				$p(P_4A_2D)$	0,021	7.272,21
	TBM	$p(B_2D)$	0,22	$p(P_5B_2D)$	0,68	1.515,35
				$p(P_6B_2D)$	0,26	2.533,32
				$p(P_7B_2D)$	0,015	3.320,38
Investigações a partir da superfície – maciço mais heterogêneo – (Condição 3)	NATM	$p(A_3D)$	0,28	$p(P_1A_3D)$	0,11	28,18
				$p(P_2A_3D)$	0,43	4.247,70
				$p(P_3A_3D)$	0,32	5.808,99
				$p(P_4A_3D)$	0,021	7.272,21
	TBM	$p(B_3D)$	0,28	$p(P_5B_3D)$	0,68	1.515,35
				$p(P_6B_3D)$	0,26	2.533,32
				$p(P_7B_3D)$	0,015	3.320,38
	NATM (mod.)	$p(C_3D)$	0,28	$p(P_1C_3D)$	0,11	28,18
				$p(P_2C_3D)$	0,43	4.247,70
				$p(P_3C_3D)$	0,32	5.808,99
Investigações a partir da frente de escavação – (Condição 4)	NATM	$p(A_4D)$	0,21	$p(P_1A_4D)$	0,11	28,18
				$p(P_2A_4D)$	0,43	4.247,70
				$p(P_3A_4D)$	0,32	5.808,99
				$p(P_4A_4D)$	0,021	7.272,21
	NATM (mod.)	$p(C_4D)$	0,21	$p(P_1C_4D)$	0,11	28,18
				$p(P_2C_4D)$	0,43	4.247,70
				$p(P_3C_4D)$	0,32	5.808,99
				$p(P_4C_4D)$	0,021	7.272,21

O valor monetário esperado da construção do túnel no trecho em análise, segundo as diferentes estratégias para redução do risco, é apresentado na TABELA 24. Nesta tabela, além dos valores esperados para construção do trecho em análise, são apresentados o valor monetário esperado das consequências (EA_D e EA_i), o valor básico necessário para implantação do trecho do túnel e o valor investido nas investigações.

TABELA 24 – Valor monetário total esperado da construção do túnel no trecho analisado, segundo as diferentes alternativas para redução do risco

Intervenções para redução do risco - Investigações e métodos construtivos		Valor monetário esperado das consequências (10^3 US\$)		Valor básico para implantação do túnel (10^3 US\$)	Valor total gasto nas investigações (10^3 US\$)	Valor monetário total esperado da alternativa (10^3 US\$)
		$E(A_D)$	$E(A_i)$			
Não executar investigações adicionais - (Condição 1)	NATM	3.841,35	960,34	640,00	-	1.600,34
	TBM	1.738,91	434,73	1.110,00	-	1.544,73
Investigações a partir da superfície – maciço mais homogêneo - (Condição 2)	NATM	3.841,35	845,10	640,00	3,84	1.488,94
	TBM	1.738,91	382,56	1.110,00	3,84	1.496,40
Investigações a partir da superfície – maciço mais heterogêneo - (Condição 3)	NATM	3.841,35	1.075,58	640,00	3,84	1.719,42
	TBM	1.738,91	486,89	1.110,00	3,84	1.600,73
	NATM (mod.)	3.841,35	1.075,58	960,00	3,84	2.039,42
Investigações a partir da frente de escavação - (Condição 4)	NATM	3.841,35	806,68	640,00	17,04	1.463,72
	NATM (mod.)	3.841,35	806,68	960,00	22,40	1.789,08

Na TABELA 25, os valores monetários totais para implantação do túnel são convertidos em custo por metro linear de escavação e são apresentadas as relações de custo entre os métodos de escavação submetidos à análise, segundo as diferentes alternativas de intervenção para redução do risco.

TABELA 25 – Valor monetário esperado do metro linear de construção do túnel, segundo as diferentes alternativas para redução do risco

Intervenções para redução do risco - Investigações e métodos construtivos		Valor monetário total esperado da alternativa (10 ³ US\$)	Valor esperado do metro linear da alternativa de construção do túnel (10 ³ US\$/m)	Condições de análise 2,3 e 4 em relação à condição 1
Não executar investigações adicionais - (Condição 1)	NATM	1.600,34	20,00	-
	TBM	1.544,73	19,31	-
Investigações a partir da superfície – maciço mais homogêneo - (Condição 2)	NATM	1.488,94	18,61	0,93
	TBM	1.496,40	18,71	0,97
Investigações a partir da superfície – maciço mais heterogêneo – (Condição 3)	NATM	1.719,42	21,49	1,07
	TBM	1.600,73	20,00	1,04
	NATM (mod.)	2.039,42	25,49	1,27
Investigações a partir da frente de escavação – (Condição 4)	NATM	1.463,72	18,29	0,91
	NATM (mod.)	1.789,08	22,36	1,12

7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O modelo de decisão desenvolvido no âmbito desta tese foi aplicado no trecho do túnel sob a avenida marginal do rio Pinheiros, na pista sentido centro-bairro.

Comparando-se os custos de implantação do túnel, segundo os diferentes métodos construtivos analisados, verifica-se que estes, no geral, apresentam variação da ordem de até 40%. O método construtivo NATM modificado, na condição de análise 3, apresenta o maior custo enquanto que o método NATM, na condição de análise 4, apresenta o menor custo em relação às demais condições de análise.

O método NATM apresenta nas diferentes condições de análise, variações de custo da ordem de até 17 %. A menor diferença é verificada entre as condições de análise 2 e 4, da ordem de apenas 1,7 %. Em ambas, as condições geológicas prognosticadas pelas investigações indicam maciços melhores que os inicialmente previstos. A maior diferença, observada entre as condições 3 e 4, mostram que estas se devem às diferentes condições geológicas presentes nas situações analisadas. Ressalta-se que a condição de análise 4 representa uma condição muito especial pois, uma vez executadas as perfurações na frente de escavação e verificada condições favoráveis, é admitida a hipótese, embora remota, da ocorrência dos condicionantes geológicos de projeto.

A maior diferença de custo entre as alternativas de escavação, quando de analisa a construção do túnel utilizando-se o método TBM, é observada entre as condições de análise 2 e 3, da ordem de 7 %. Estas situações correspondem a condições geológicas diametralmente opostas: o menor custo de escavação é relacionado ao maciço onde as investigações evidenciaram maior homogeneidade que as inicialmente previstas enquanto que o maior custo se correlaciona à maior heterogeneidade do maciço. Destaca-se que a diferença de custo entre a condição 1 e 2 para esta alternativa é da ordem de 3 % (menor custo na condição de análise 2), decorrente da maior homogeneidade do maciço em relação às anteriormente previstas.

O método de escavação denominado NATM modificado foi introduzido nas análises tendo em vista a possibilidade de ocorrência de maciços bastante heterogêneos, caracterizados por alternâncias sucessivas de faixas biotíticas e graníticas, de espessuras variadas e distintas características geomecânicas, bem como zonas intercaladas, alteradas e fraturadas, associadas às estruturas de direção NNW.

Este método apresenta custo mais elevado quando comparado às outras alternativas na condição de análise 3 (27,4 % e 18,6 % maior que o NATM e TBM, respectivamente), e na condição de análise 4, apresenta custo 12,2 % menor que na condição de análise 3. Quando comparado ao método NATM, é de 4 % (condição de análise 3) a 20 % (condição de análise 2) mais caro.

Comparando-se individualmente cada condição de análise e apenas os métodos NATM e TBM, destaca-se a pequena vantagem do método de escavação mecanizado (TBM) nas condições 1 (custo 3,5 % menor) e 3 (custo 6,9 % menor), e custos praticamente iguais na condição 2 (custo 0,5 % maior). Estes valores evidenciam que as condições geológicas interferem de forma direta no custo da alternativa de construção. Quando o maciço rochoso, após execução de investigações adicionais, evidencia condições geológicas mais favoráveis que as inicialmente previstas (condição de análise 2), os custos das alternativas de construção de equiparam. Ao contrário, se as investigações adicionais mostram que o maciço é mais heterogêneo que o previsto, o método mecanizado de escavação (TBM) apresenta custos da ordem de 7 % menores. Nas condições atuais, mantendo-se o mesmo nível de conhecimento do arcabouço geológico, ou seja, não se executando investigações adicionais, o método de escavação mecanizado (TBM) apresenta vantagem no custo da ordem de 3,5 %.

Os gastos em campanhas de investigação, com objetivo de complementar o conhecimento do arcabouço geológico do maciço, representam investimentos extremamente baixos quando comparados aos custos de implantação do túnel (entre 0,2 % e 1,2 %) ou mesmo frente aos ganhos obtidos com a escolha de métodos construtivos mais adequados. No caso específico da condição de análise 3, quando o arcabouço geológico do maciço (determinado por investigações adicionais) é mais heterogêneo que o esperado (o que configura um cenário propício para a ocorrência de "surpresas geológicas" ou de "imprevistos geológicos"), a diferença do custo esperado das alternativas de escavação é da ordem de 7 % (NATM em relação ao TBM) e 27 % (NATM modificado em relação ao TBM). Em números absolutos estas diferenças significam, no custo total esperado de implantação do túnel no trecho analisado, valores da ordem de US\$ 118.700,00 (NATM em relação ao TBM) e US\$ 438.000,00 (NATM modificado em relação ao TBM). Estes valores representam 10 % e 36 %,

respectivamente, do investimento efetivo de US\$ 1.200.000,00 efetuado com todas as investigações geológicas da Linha 4.

As investigações geológicas executadas para o projeto do túnel no trecho em análise neste trabalho, foram consideradas adequadas, conforme critérios aqui desenvolvidos. Esta avaliação, concordante com a demonstrada pelo avaliador no transcorrer dos trabalhos, implicou em avaliações de probabilidades que refletem esta visão, ou seja, resultaram em variações muito pequenas na probabilidade de ocorrência dos eventos aleatórios dos quais depende o desempenho dos diferentes métodos construtivos. Em vista disto, o avaliador não alterou as estimativas de probabilidade de deflagração dos processos geradores de risco, para as diferentes condições de análise, ou seja, executar ou não investigações não alterou os valores estimados pelo avaliador, das probabilidades de ocorrência dos processos geradores de risco. Estes permaneceram iguais nas diferentes condições de análise, apresentando diferenças apenas quanto aos métodos construtivos (métodos convencionais e métodos mecanizados). Mesmo sob estas condições o modelo de decisão se mostrou sensível às diferentes condições de análise, diferenciando o custo das alternativas de redução de risco submetidas a avaliação.

As análises evidenciaram ainda que, quando são consideradas as conseqüências potenciais em superfície, o método de escavação em NATM perde a sua vantagem competitiva, representada pelo menor custo de implantação. De fato, quando são consideradas apenas os custos das conseqüências no interior do túnel, relativas à estabilização do maciço e reconstrução do trecho comprometido do túnel, o custo dos demais métodos construtivos analisados é substancialmente maior (TABELA 26).

7.1 Procedimentos para a Tomada de Decisão

O trecho submetido a análise, e utilizado como exemplo de aplicação da metodologia desenvolvida neste estudo, corresponde a apenas cerca de 2,8 % do comprimento do túnel a ser implantado em rocha. Embora represente uma situação extremamente importante dentro do contexto da análise de risco e na tomada de decisão, tem pequena representatividade em relação ao comprimento total da obra.

TABELA 26 – Valor monetário total esperado da construção do túnel no trecho analisado, segundo as diferentes alternativas para redução do risco, considerando-se apenas as consequências no interior do túnel

Intervenções para redução do risco - Investigações e métodos construtivos		Valor monetário esperado das consequências (10^3 US\$)		Valor básico para implantação do túnel (10^3 US\$)	Valor total gasto nas investigações (10^3 US\$)	Valor monetário total esperado da alternativa (10^3 US\$)
		E(A _i D)	E(A _i)			
Não executar investigações adicionais - (Condição 1)	NATM	407,30	101,83	640,00	-	741,83
	TBM	215,24	53,81	1.110,00	-	1163,81
Investigações a partir da superfície – maciço mais homogêneo - (Condição 2)	NATM	407,30	89,61	640,00	3,84	733,45
	TBM	215,24	47,35	1.110,00	3,84	1161,19
Investigações a partir da superfície – maciço mais heterogêneo - (Condição 3)	NATM	407,30	114,04	640,00	3,84	757,88
	TBM	215,24	60,27	1.110,00	3,84	1174,11
	NATM (mod.)	407,30	114,04	960,00	3,84	1077,88
Investigações a partir da frente de escavação - (Condição 4)	NATM	407,30	85,53	640,00	17,04	742,57
	NATM (mod.)	407,30	85,53	960,00	22,40	1067,93

Para definir o método de escavação a ser utilizado na construção, é necessário que os diversos sub-trechos que compõem o túnel sejam, individualmente, submetidos a análise semelhante à que foi desenvolvida neste estudo.

Os sub-trechos de análise são definidos pela conjugação dos compartimentos geológico-estruturais, pela relação entre a direção do túnel e da foliação e pelo uso e ocupação do solo em superfície (FIGURA 50). Qualquer alteração em um dos elementos que define um sub-trecho indica a necessidade de submetê-lo à análise individual.

FIGURA 50 – Planta de delimitação dos sub-trechos para análise de decisão

Este procedimento torna-se necessário visto que, a alteração em qualquer um dos elementos que define um sub-trecho, implica em alterações nas características de homogeneidade/heterogeneidade dos compartimentos lito-estruturais, nos condicionantes geológicos da estabilidade do maciço, ou nas conseqüências potenciais.

Uma vez aplicado o processo de avaliação e obtidos os resultados relativos a cada sub-trecho, a escolha do método construtivo para escavação do túnel é alcançada pelo somatório, ao longo dos sub-trechos delimitados para aplicação da análise de decisão, da ponderação do custo do metro linear de cada sub-trecho, conforme expresso pela aplicação da equação:

$$E_{\min} = \left\{ \sum_1^n (C_{\text{trecho}} \cdot L_{\text{trecho}}) \right\} / L_{\text{túnel}} \quad (45)$$

onde,

$E_{\min}$ – valor mínimo esperado do metro linear de escavação;
 C_{trecho} – custo metro linear de escavação no subtrecho analisado;
 L_{trecho} – comprimento do sub-trecho analisado;
 $L_{\text{túnel}}$ – comprimento do túnel;

A aplicação da equação (45) permite, para cada condição de análise e a partir dos dados obtidos em cada sub-trecho analisado, calcular o custo médio do metro linear de escavação e a escolha da melhor alternativa para redução do risco na construção do túnel.

8 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa procurou-se equacionar o problema das incertezas de natureza geológica, presente em todos os trabalhos de geologia de engenharia, incorporando-as ao projeto e construção das obras.

O mecanismo utilizado para incorporação das incertezas e, conseqüentemente, redução dos riscos foi a Análise de Decisão.

A metodologia desenvolvida objetivou fornecer as bases para a quantificação do risco na construção de túneis em áreas urbanas, assim como estabelecer os fundamentos que permitissem tecer estratégias racionais de intervenção para redução deste risco.

A estratégia estabelecida baseou-se em dois princípios básicos: reduzir as incertezas através da obtenção de um maior número de informações ou limitar o impacto das incertezas no desempenho técnico e econômico do projeto. Estes princípios consubstanciaram o modelo de decisão desenvolvido, que apresenta os seguintes aspectos principais:

- a caracterização e o zoneamento de risco das áreas nos entornos da rota do túnel com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas. A utilização desta ferramenta possibilitou conjugar todos os parâmetros intervenientes e gerar os mapas de qualidade das investigações, de susceptibilidade do maciço rochoso em deflagrar os processos geradores de risco, de conseqüências potenciais e de risco;
- o zoneamento de risco permitiu caracterizar as áreas nos entornos do túnel como de médio a alto risco. As áreas de baixo risco podem ser consideradas como secundárias dentro do contexto da análise. Em função dos resultados obtidos na caracterização e zoneamento de risco, selecionou-se a área das marginais do rio Pinheiros para aplicação do modelo de decisão desenvolvido;
- o modelo de decisão desenvolvido conjugou os dois princípios básicos, sobre os quais foi estabelecida a estratégia para redução do risco. Os métodos construtivos e das alternativas de investigação submetidas à análise foram aqueles mais usuais utilizados na geologia de engenharia e no tipo de obra analisada;

- a aplicação do modelo de decisão, que contempla as ações para redução do risco e que estão à disposição de um decisor, exige a estimativa de ocorrência de eventos aleatórios. A estimativa das probabilidades de ocorrência deste eventos é efetuada de forma subjetiva, a partir do julgamento profissional de técnicos experientes em geologia de engenharia e no tipo de obra em análise.

O modelo de decisão desenvolvido foi aplicado, a título de exemplo, em uma área que representa uma situação de alto risco e extremamente importante na análise de decisão. Os resultados obtidos permitem afirmar que o modelo de decisão é sensível às pequenas variações dos parâmetros e das estimativas de probabilidade de ocorrência dos eventos aleatórios, permitindo diferenciar de forma efetiva as alternativas para redução do risco.

Verifica-se uma carência de banco de dados que sintetizem as experiências adquiridas em diferentes tipos de obra, de forma a permitir que este conhecimento seja incorporado ao conjunto de conhecimento da sociedade, possibilitando um efetivo avanço e substancial melhoria em análises de decisão.

Este é um aspecto de extrema importância, visto o profundo incremento na utilização deste tipo de análise pela geologia de engenharia e ciências afins.

"Probabilidade nem sempre significa verdade"

Sigmund Freud (1856 – 1939)

9 BIBLIOGRAFIA

- AAGAARD, B.; BLINDHEIN, O. T. (1999). Crossing of exceptionally poor weakness zones in three subsea tunnels. In: **CHALLENGES FOR THE 21ST CENTURY**, Oslo, Noruega, 1999. **Proceedings of the World Tunnel Congress**, v.2, t.4, p. 457-466.
- ANDERSON, J. M. (1998). An "ERASE" approach to eliminate and control risks in tunnelling before work starts. In: **TUNNELS AND METROPOLISES**, São Paulo, Brasil, 1998. **Proceedings of the World Tunnel Congress**, v. 1, t. 1, p. 135-139.
- ASSIS, A. A. (1999). Panorama internacional de túneis urbanos. Palestra Especial. In: **SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS**, 3., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, ABGE, CBT, IE. v. 1, p. 163-172.
- BENSON, R.; YUHR, L.; SHARMA, D. (1996). Uncertainty in the geologic setting and its impact on site characterisation. In: **Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice. Proceedings of Uncertainty' 96**. Geotechnical Special Publication nº 58. ASCE. p. 91 - 103. Ford, C. D. S.; Nelson, P. P.; Roth, M. S. S. (eds.).
- BLEUS, J. L.; FEUGA, B. (1981). La Fracturation des roches. **Manuels et Méthodes**. 1, 1981. 121 p. BRGM, Paris.
- CABRERA, J. C. (1975) Seleção racional de locais para barragens. In: **SEMINARIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**, 10, Curitiba, 1975. **Anais**. Curitiba, 1975. CBGB, v.1, 7p.
- CAMARGO CORRÊA. (1998). **Camargo Corrêa - Notícias**. 18. Dez/1998-Fev/1998. São Paulo.

- CARVALHO, C. S. (1996) **Gerenciamento de Riscos Geotécnicos em Encostas Urbanas: Uma Proposta Baseada em Análise de Decisão**. São Paulo. 192 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CASAGRANDE, A. (1965). Role of "calculated risk" in earthwork and foundation engineering. The Terzaghi Lecture: **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings, ASCE**, 1965. Vol. 91, nº SM 4, p. 1 - 40.
- CELESTINO, T. B. (1995). Aspectos contratuais na construção de túneis. In: **SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS**, 1., São Paulo, 1995. **Anais**. São Paulo. ABGE, CBT, 1995. v. 1, t. 2, p. 45-57.
- CELLA, P. R. C.; GALLARDO, A. L. C. F.; AZEVEDO, A. A.; MAGALHÃES, F. S.; (1999). Compartimentação geomecânica do maciço gnáissico alterado do túnel da Linha 4 - Metro de São Paulo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA**, 9., São Pedro, 1999. **Anais**. São Paulo. ABGE, 1999. t. 3.
- CERRI, L. E. S. (1993). **Riscos Geológicos Associados a Escorregamentos: Uma Proposta para Prevenção de Acidentes**. Rio Claro, 1993. 197 p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.
- COMITÉ FRANÇAIS DU GRANDS BARRAGES (1982). La Reconnaissance des sites de barrages: Difficultés rencontrées. In: **INTERNATIONAL CONGRES ON LARGE DAMS**, 14., Rio de Janeiro, 1982. **Anais**. ICOLD, 1982. Q. 53, R. 55, p. 877 - 897.
- COPPEDÊ JR, A. (1990). Roteiro metodológico de estudos geológico-geotécnicos para viabilidade de pequenos e médios aproveitamentos hidroelétricos. In: **HYDRO 90 - Small/Medium**, 1990. São Paulo, **Anais**. 1990. CESP/ELETROPAULO/CPFL/ HRC. p. 115-127.

- FOOKES, P. G. (1997). Geology for engineers: the geological model, prediction and performance. The First Glossop Lectures. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. v. 30, part 4. p. 293-424. Nov.
- FRANCISS, F. O.; ROCHA, H. C. (1998). Obras Subterrâneas Civis. In: **GEOLOGIA DE ENGENHARIA**. Antoni Manoel dos Santos Oliveira, Sergio Nertan Alves de Brito, eds. São Paulo. p. 439-456.
- GALVES, M. L. (1995). **Condicionantes Geotécnicos do Traçado de Rodovias: uma Proposta Metodológica de Escolha Baseada na Análise de Decisões com Objetivos Múltiplos**. São Paulo. 235 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- GILBERT, R. B.; McGRATH, T. C. (1996). Seven guidelines for managing uncertainty in geoenvironmental design. In: **Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice. Proceedings of Uncertainty' 96**. Geotechnical Special Publication nº 58. ASCE. p. 774-796. Ford, C. D. S., Nelson, P. P., Roth, M. S. S. (eds.).
- GRIMSTAD, E.; BARTON, N. (1993). Updating the Q-System for NTM. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPRAYED CONCRET, MODEN USE OF WET MIX SPRAYED CONCRET FOR UNERGROUND SUPPORT**. 1993, Fagernes. **Proceedings**. Fagernes, Oslo.
- GUICICINI, G. 1983. Fundações e escavações em rocha. Relato do Tema. In: **SIMPOSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANA**,. São Paulo, 1983. **Anais**. São Paulo, ABGE, 1983. v. 3, t. II B, p. 111 - 121.
- GUIDICINI, G. (1984). O Imprevisto geológico e seus reflexos em obras de engenharia: um Caso Real. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA**, 4., Belo Horizonte, 1984. **Anais**. São Paulo, ABGE, 1984. v.4, p. 389-398.

- RAIFA, H. (1977). **Decision Analysis: Introductory Lectures on Choice Under Uncertainty**. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing, 1976. 346 p.
- HASUI, Y. (1993). **Geologia estrutural das rochas na linha 4 do Metro. Avaliação e síntese dos conhecimentos**. Metro. Relatório Interno. 23 p.
- HASUI, Y.; MIOTO, J. A. , org. (1992). **Geologia Estrutural Aplicada**. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, S. A. Industrias Votorantim.
- HOEK, E., PALMIERI, A. (1998). Geotechnical risks on large civil engineering projects. In: **International Congress of International Association of Engineering Geology**, 8., Vancouver, 1998. **Anais**. Canada, IAEG, 1998. v. 1, t. 1, 79 - 88.
- HOLANDA, A. B de. (1975). **Novo Dicionário da Língua Portuguesa**. Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro. 1499 p.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA; ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS (1999). Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público. **Revista dos Transportes Públicos**. São Paulo, ano 21, v. 82, 1º trim. p. 35-92.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1997). **Ensaio triaxiais em rochas gnáissicas**. Relatório IPT 35729. 101p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1998a). **Caracterização geomecânica do maciço rochoso do trecho Faria Lima - Vila Sônia, Linha 4 – Amarela**. São Paulo. Relatório IPT 36891. 146 p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. (1998b). **Ensaio geofísicos, análise geológico-geotécnica e hidrogeológica para subsidio de projeto de contenção e/ou drenagem do lençol freático na**

- passagem Euriclides de Jesus Zerbini, no bairro do Butantã, cidade de São Paulo, SP. Relatório IPT 37537. 22p.
- ISAKSON, M. T.; REILLY, J. J.; ANDERSON, J. M. (1999). Risk mitigation for tunnel projects – A structured approach. In: **CHALLENGES FOR THE 21ST CENTURY**, Oslo, Noruega, 1999. **Proceedings of the World Tunnel Congress**, v.2, t.5, p. 703-711.
- MAIONCHI, A. (1997). Participação da iniciativa privada na implantação e operação de barragens. Debates. In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**, 22. , São Paulo, 1997. **Anais**, São Paulo. CBGB. v.2, t. 1, p. 19-20.
- MANGOLIM Fº, A.; OJIMA, L. M. (1995). Planejamento de investigações. In: **SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS**, 1., São Paulo, 1995. **Anais**. São Paulo. ABGE, CBT, 1995. v. 1, t. 1, p. 11-20.
- MANO, V. G. T. (1987). **Estudos geológicos e geotécnicos das discontinuidades rochosas, “pillow lavas” e paleocanal nos basaltos de fundação da barragem e Nova Avanhandava, Rio Tietê (SP)**. São Paulo. 96 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.
- MASSAD, F. (1999). Baixada Santista: Implicações da história geológica no projeto de fundações (texto preliminar). **Conferência Pacheco Silva**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, São Paulo.
- MATOS, A. C. B., et al. (1989). Análise de eixos alternativos em estudos de viabilidade de barragens: considerações metodológicas e aplicação prática. In: **SEMINARIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**, 18., Foz de Iguaçu, 1989. **Anais**. Rio de Janeiro, CBGB, 1989. v.3, p. 1165-1185.
- MAZO, C. O. (2001). Métodos constructivos de túneis urbanos. **As Recentes Obras de Ampliação do Metro de Madri - 1995/2003**. Seminário Internacional.

Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas.

MELLO, V. F. B. de (1972). Recomendações referentes a estudos geológico-geotécnicos para barragens. In: **SEMINARIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**, 8., São Paulo, 1972. **Anais**. Rio de Janeiro, CBGB, 1972. v.1, 72 p.

NAPOLES NETO, A. D. F. (1963). Métodos para investigações de fundações de barragens. **Revista do Clube de Engenharia**. Rio de Janeiro. v.26, nº 324. 28 ago/dez 1963, p. 260-263.

NUNES, A. J. da C. (1962). Investigações para fundações de barragem. In: **SEMINARIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**, 1., Rio de Janeiro, 1962. **Anais**. Rio de Janeiro, CBGB, 1962.

OLIVEIRA, A. M. S.; GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1970). Quadro roteiro de trabalhos em geologia aplicada a barragens. In: **SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA**, 2., São Paulo, 1970., **Anais**. São Paulo, 1970, APGA. v.2, t. 5, p. 409-415.

PARKER, H. W. (1997). Geotechnical Investigation. **Tunnel Engineering Handbook**, 1997. Bickel, J. O., Kuessel, T. R., King, E. H. (eds.), 2º edition. New York. Chapman & Hall. p. 46-79.

PELIZZA, S.; GRASSO, P. (1998). Tunnel collapses: are they unavoidable?. **World Tunnelling**, mar, 1998. p 71-75.

PELIZZA, S.; GRASSO, P. (1999). Increasing confidence in the expected safety factor using information from tunnel colapses and closures. In: **Ground Challenges and Expectations in Tunnelling Projects. International Symposium. PROCEEDINGS**, Cairo, Egito, p. 181-198.

- PELLIZA, S. (1996). Trends and development in tunnelling. In: **INTERNATIONAL SEMINAR ON URBAN PROBLEMS AND UNDERGROUND SOLUTIONS**, São Paulo, 1996. **Proceedings**. p. 1-24.
- RIBEIRO NETO, F. (1999). **Segurança, ruptura e colapso de túneis urbanos em NATM**. São Paulo. 171 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
- ROBERDS, W. J. (1990). Methods for developing defensible subjective probability assessment. **Transportation Research Record. Soils, Geology and Foundation**. nº 1288, 1990. National Research Council. p. 183-190.
- ROCHA, H. C.; LEITE, R. L.L. (2002). Multifaceted design for São Paulo. In: **Tunnels & Tunnelling International**, v.34, n.4. p. 20-22.
- ROCHA, H.C.; CYBELE, A. V.; LEITE, R. L.L. (2002). Aspectos geológicos, geotécnicos e construtivos do novo projeto da Linha 4, Amarela, do Metro de São Paulo. In: **SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS**, 4, São Paulo, **Anais**. São Paulo. ABGE, CBT, IBRACON, v. 1, p. 12.
- ROTSTEIN, H. C. (1962). Análise geral dos métodos de investigação de fundação de barragem. In: **SEMINARIO GERAL DE GRANDES BARRAGENS**, 1., Rio de Janeiro. 1962. **Anais**. Rio de Janeiro, CBGB, 1962.
- RUIZ, M. D. (1983). Fundações e escavações em rocha. Relato do Tema. In: **SIMPOSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ**, São Paulo, 1983. **Anais**. São Paulo, ABGE, 1983. v. 3, t. II B, p. 111 - 121.
- RUIZ, M. D. (1984). Considerações gerais sobre imprevistos geológicos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA**, 4., Belo Horizonte, 1984., **Anais**. São Paulo, ABGE, 1984. v.4, p. 385-398.
- SAAVEDRA, F. M. (2001). Tuneladoras. **As Recentes Obras de Ampliação do**

Metro de Madri - 1995/2003. Seminário Internacional. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas.

SLOVIC, P.; KUNREUTHER, H.; WHITE, G. F. (1974). Decision processes, rationality, and adjustment to natural hazards. In: **NATURAL HAZARDS. Local, National, Global.** New York, Oxford University Press. p. 187-205. Gilbert F. White, ed.

STAPLEDON, D. H. (1976). Geological hazards and water storage. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology.** n. 14, p. 249-262, dec.

SZASZ, P.; (2000). Informação pessoal

VAZ, L. F. (1969) Estudo geológico de barragens. In: **SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA**, 1., São Paulo, 1969. **Anais.** APGA, 1969. v.3, t. 3, 22.p.

VAZ, L. F. (1984). Imprevistos geológicos em obras civis. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA**, 4., Belo Horizonte, 1984. **Anais.** São Paulo, ABGE, 1984. v. 4, p. 403 - 408.

VAZ, L. F. (1999). O Efeito das condições geológicas na economia de obras subterrâneas. Palestra Especial. In: **SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS**, 3., São Paulo, 1999. **Anais.** São Paulo. ABGE, CBT, IE, 1999. v. 1, p. 89-110.

YUHR, L.; BENSON, R. C.; SHARMA, D. (1996). Achieving a reasonable level of accuracy in site characterisation in the presence of geologic uncertainty. In: **Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice. Proceedings of Uncertainty' 96.** Geotechnical Special Publication nº 58. ASCE. p. 195-209. Ford, C. D. S.; Nelson, P. P.; Roth, M. S. S. (eds.).