

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA CEZARIO DA SILVA

MODELAGEM GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DO TÚNEL DE ADUÇÃO DA
PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DORES DE GUANHÃES – MG.

CURITIBA

2014

ANA PAULA CEZARIO DA SILVA

MODELAGEM GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DO TÚNEL DE ADUÇÃO DA
PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DORES DE GUANHÃES - MG

Trabalho apresentado com requisito parcial à
obtenção do grau de geóloga no curso de
graduação em Geologia , Setor de Ciências da
Terra da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Salamuni

Co-orientadora: Dsc. Isabella Françoso Rebutini
Figueira

CURITIBA

2014

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e amigos, pelo suporte emocional, incentivos e momentos de descontração nas horas de dificuldade;

Ao professor Eduardo Salamuni por todos os conselhos e ensinamentos ao longo caminho do aprendizado geológico;

À geóloga Isabella, pela convivência por tudo que me ensinou nesse período;

Aos Institutos Lactec pelo suporte para realização deste trabalho;

À Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) por disponibilizar os dados para que este trabalho se concretizasse.

RESUMO

A criação de um modelo 3D geológico-geotécnico na região de desemboque do túnel de adução da Pequena Central Hidrelétrica Dores de Guanhães - MG tem o objetivo de quantificar e delimitar as camadas de solo e topo rochoso com enfoque na estabilidade geotécnica, devido a grande espessura de camada de solo nesta porção do túnel. A interpretação dos dados das seções geofísicas, o mapeamento de superfície e interpolação dos dados provenientes das seções entre sondagens, serviram de parâmetro para delimitar regiões de instabilidade no modelo 3D criado. Esta modelagem indicou zonas com presença de camadas de biotitito que apresentam maior tendência a deslizamento ou deslocamento de superfície exposta. Em um segmento do interior do túnel, especificadamente na região de desemboque, a análise cinemática de taludes no maciço rochoso revelou que deslizamentos do tipo planar e em cunha, ou queda de blocos no teto da escavação estão previstos. O indicado para estas regiões de instabilidade é a cobertura com concreto projetado e limalha de ferro para sustentação e prevenção de acidentes não previstos.

Palavras-Chave: Modelagem geológica-geotécnica, estabilidade, maciço rochoso.

ABSTRACT

The creation of a 3D geological-geotechnical model in the terminating end region of the adduction tunnel of Dores de Guanhães Small Hydroelectric Powerplant, in the State of Minas Gerais, aims to quantify and delineate its layers of soil and bedrock with a focus on geotechnical stability, due to the large thickness of the soil layer in the portion of the mouth of the tunnel. Interpolation of geophysical data sections, surface mapping and interpretation of sections between polls as a parameter to delimit regions of instability in the created 3D model. This modeling indicated areas with presence of layers of biotitite that are more prone to sliding or peeling of exposed surface. In a segment of the tunnel, specifically in the region of terminating in the kinematic analysis of slopes in rock mass, revealed that landslides of wedge and planar types or falling blocks from the ceiling of the excavation are expected. The suitable for these regions of instability are the cover with shotcrete and iron filings to support as well as preventing unforeseen accidents.

Key words: geological and geotechnical modeling, stability, solid rock.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: LOCALIZAÇÃO E PRINCIPAIS VIAS DE ACESSO À PCH DORES DE GUANHÃES	2
FIGURA 2: SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA GERADA NO MOVE	7
FIGURA 3: DISTRIBUIÇÃO DOS NÚCLEOS DE SONDAGENS NA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA	8
FIGURA 4: ESTEREOGRAMA COM EXEMPLO DE PLANOS DE ATITUDE DE DESCONTINUIDADE E DE FACE DA VERTENTE. O RUMO DO PLANO REPRESENTADO ENCONTRA-SE NA REGIÃO DE INSTABILIDADE DO DIAGRAMA, OCORRENDO ESCORREGAMENTO DO TIPO PLANAR.	9
FIGURA 5: MAPA GEOLÓGICO DA PORÇÃO SUDESTE DO ORÓGENO ARAÇUAÍ MOSTRANDO SEUS LIMITES. EXTRAÍDO DE PERES <i>ET AL.</i> , (2004), COMPILADO DE MACHADO Fº <i>ET AL.</i> , (1983), PINTO <i>ET AL.</i> , (1997), GROSSI-SAD <i>ET AL.</i> , (1997) E PERES (2000).	11
FIGURA 6: REGIÃO DE DESEMBOQUE, MOSTRANDO A INTERFACE SOLO E MACIO ROCHOSO.	12
FIGURA 7: DETALHE DA FOLIAÇÃO MARCANTE NA ROCHA DO DESEMBOQUE E FRATURAS ESCALONADAS.	13
FIGURA 8: DETALHE PARA VEIO PEGMATÍTICO NO INTERIOR DO TÚNEL.	13
FIGURA 9: GRÁFICO DE(DIMENSÃO EQUIVALENTE) VERSUS Q(QUALIDADE DA ROCA) PARA DEFINIÇÃO DO TIPO DE SUPORTE DO TÚNEL. (MOREIRA FILHO, 2003, MODIFICADO DE GRIMSTAD E BARTON, 1993).	15
FIGURA 10: GRÁFICO DE VARIABILIDADE DE ESTABILIDADE DO MACIÇO SEM REVESTIMENTO VERSUS VÃO LIVRE DO TÚNEL. (BASTOS 1998, ADAPTADO DE BIENIAWSKI, 1973, EXTRAÍDO DE DINIS DA GAMA, 1976).	16
FIGURA 11: (A) RUPTURA PLANAR (HOEK E BRAY, 1981, EXTRAÍDO DE FIORI E CARMIGNANI, 2009). (B) RUPTURA PLANAR REPRESENTADA NO DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO. A ÁREA SOMBREADA	

REPRESENTA AS POSSÍVEIS DIREÇÕES DE DESLIZAMENTO (ADAPTADO DE FIORI E CARMIGNANI, 2009 EXTRAÍDO DE PINOTTI E CARNEIRO, 2013).....	17
FIGURA 12: (A) RUPTURA EM CUNHA (HOEK E BRAY, 1981, EXTRAÍDO DE FIORI E CARMIGNANI, 2009). (B) RUPTURA EM CUNHA REPRESENTADA NO DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO. A ÁREA SOMBREADA REPRESENTA AS POSSÍVEIS DIREÇÕES DE DESLIZAMENTO (ADAPTADO DE FIORI E CARMIGNANI, 2009 EXTRAÍDO DE PINOTTI E CARNEIRO, 2013).....	18
FIGURA 13: A) TOMBAMENTO DE BLOCOS (HOEK E BRAY, 1981, EXTRAÍDO DE FIORI E CARMIGNANI, 2009). (B) TOMBAMENTO DE BLOCOS REPRESENTADA NO DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO. O PLANO A OM MERGULHO COM ALTO ÂNGULO DE MERGULHO E INCLINADO CONTRA A VERTENTE, E O PLANO B INCLINADO A FAVOR DA VERTENTE E COM BAIXO ÂNGULO DE MERGULHO. A ÁREA SOMBREADA REPRESENTA A ÁREA DE INSTABILIDADE NA QUAL OCORRERÁ O DESLIZAMENTO (ADAPTADO DE FIORI E CARMIGNANI, 2009 EXTRAÍDO DE PINOTTI E CARNEIRO, 2013)....	19
FIGURA 14: VISUALIZAÇÃO DOS HORIZONTES DE SOLOS (EMBRAPA 1988).	20
FIGURA 15: MAPA DE SOLOS DA REGIÃO LESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS, DETALHADO PARA A REGIÃO DE DORES DE GUANHÃES. ADAPTADO DE MAPA DE SOLOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, FOLHA 4, 2010.	21
FIGURA 16: VISTA DO DESEMBOQUE DO TÚNEL DE ADUÇÃO.	23
FIGURA 17: SONDAGENS DA REGIÃO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL, COM COTAS DA BOCA DO POÇO CORRIGIDAS NA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA.	24
FIGURA 18: DISPOSIÇÃO EM PLANTA (VISUALIZAÇÃO 2D) DAS SEÇÕES ENTRE AS SONDAGENS. AS LINHAS ROXAS REPRESENTAM A LINHA DA SEÇÃO INTERPRETADA.....	25
FIGURA 19: INTERPRETAÇÃO ENTRE AS SEÇÕES SM-03 E SR-05.....	26
FIGURA 20: INTERPRETAÇÃO DOS HORIZONTES DE SOLO E TOPO ROCHOSO.....	26

FIGURA 21: SEÇÃO SR-06_SM-106 NA REGIÃO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL DE ADUÇÃO	27
FIGURA 22: DETALHE DA CORRELAÇÃO ENTRE OS HORIZONTES DA SEÇÕES INTERPRETADAS	27
FIGURA 23: MODELO 3D GERADO PARA A REGIÃO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE SEÇÕES.VISÃO DE NORDESTE PARA SUDOESTE.....	28
FIGURA 24: MODELO 3D GERADO PARA A REGIÃO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DE SEÇÕES. VISÃO LESTE PARA OESTE.	28
FIGURA 25: MODELO 3D PROPOSTO PARA A REGIÃO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL	29
FIGURA 26: MODELO 3D GERADO PARA A REGIÃO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL, COM A POSIÇÃO DOS FUROS DE SONFAGEM E REPRESENTAÇÃO DAS SEÇÕES.....	29
FIGURA 27: SEÇÃO GEOFÍSICA REALIZADA NO EIXO DO TÚNEL DE ADUÇÃO	30
FIGURA 28: DISPOSIÇÃO DAS SEÇÕES GEOFÍSICAS NA REGIÃO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL.....	31
FIGURA 29: (A) SEÇÕES INTERPRETADAS NO SEGMENTO DE DESEMBOQUE DO TÚNEL DE ADUÇÃO. (B) SEÇÃO GEOFÍSICA CORRESPONDENTE A MESMA REGIÃO. (C) SEÇÃO GEOFÍSICA COM DETALHE PARA OS POLÍGONOS A E B.	32
FIGURA 30: (A) SEÇÃO INTERPRETADA. (B) SEÇÃO GEOFÍSICA CORRESPONDENTE A MESMA REGIÃO.....	33
FIGURA 31: (A) SEÇÕES INTERPRETADAS. (B) SEÇÃO GEOFÍSICA CRUZADA NAS SEÇÕES INTERPRETADAS.	34
FIGURA 32: ALTERNÂNCIA DAS CAMADAS DE GNAISSES COM NÍVEIS DE BIOTITITO.....	35
FIGURA 33: DETALHE PARA A CAMADA DE BIOTITITO.....	35
FIGURA 34: ATITUDES DE FRATURAS REPRESENTADAS NO MOVE	36
FIGURA 35: DADOS DE ATITUDES GERAIS (FOLIAÇÃO, FRATURAS E BANDAMENTO).....	37

FIGURA 36: ATITUDES DE FOLIAÇÃO	37
FIGURA 37: ATITUDES DE FRATURAS	37
FIGURA 38: INTERPOLAÇÃO DE SEÇÃO GEOFÍSICA COM PLANO DE CAMADA COMPOSTA POR BIOTITA.	39
FIGURA 39: VISTA EM PLANTA DO CROQUI DO DESEMBOQUE DO TÚNEL DE ADUÇÃO, NA ESCALA 1:100.	40
FIGURA 40: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO COM PLANOS, RUMOS DE MERGULHO, DIREÇÃO DA VERTENTE E CONE DE ATRITO INTERNO. A REGIÃO EM CINZA É A REGIÃO DE INSTABILIDADE DO TALUDE, COM DESLIZAMENTO EM CUNHA DOA PLANOS 3 E 5. ...	42
FIGURA 41: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO COM PLANOS, RUMOS DE MERGULHO, DIREÇÃO DA VERTENTE E CONE DE ATRITO INTERNO. A REGIÃO EM CINZA É A REGIÃO DE INSTABILIDADE DO TALUDE, COM DESLIZAMENTO PLANAR DO PLANO 7.	43
FIGURA 42: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO COM PLANOS, RUMOS DE MERGULHO, DIREÇÃO DA VERTENTE E CONE DE ATRITO INTERNO. A REGIÃO EM CINZA É A REGIÃO DE INSTABILIDADE DO TALUDE, COM DESLIZAMENTO PLANAR DO PLANO 1. SE O VALOR DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO FOR DE 50° OCORRERÁ DESLIZAMENTO EM CUNHA DA VERTENTE.	44
FIGURA 43: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO COM VALOR DE ÂNGULO DE ATRITO INTERNO DE 45°. NESSA SITUAÇÃO, OCORRERÁ DESLIZAMENTO EM CUNHA DAS SUPERFÍCIES 1 E 2.	44
FIGURA 44: A REGIÃO EM CINZA SIMBOLIZA A CUNHA DE INSTABILIDADE DE BLOCOS EM TETOS DE ESCAVAÇÕES.	45
FIGURA 45: MODELO DE FRATURAS, EVIDENCIANDO EM AZUL CLARO A FOLIAÇÃO SUB-HORIZONTAL PARALELA AO TETO DA ESCAVAÇÃO.	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ORGANIZAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS DO MAPEAMENTO DO TÚNEL DE ADUÇÃO. NO QUAL RQD: ÍNDICE DE QUALIDADE DA ROCHA, JN: NÚMERO DE FAMÍLIAS DE FRATURAS, JR RUGOSIDADE DAS FRATURAS, JA: ALTERAÇÃO NAS PAREDES DAS FRATURAS, JW: INFLUÊNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA, SRF: ÍNDICE DE INFLUÊNCIA DO ESTADO DE TENSÃO DO MACIÇO, Q: QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO E CM: CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO.	5
TABELA 2: VALORES DE Z (MDT) CORRIGIDOS E A DIFERENÇA DAS COTAS FORNECIDAS PELAS SONDAGENS NA TOPOGRAFIA.	24
TABELA 3: VALORES DE ATRITO PARA ROCHAS DE ACORDO COM SUA ESTRUTURAÇÃO (HOEK, 1972 EXTRAÍDO DE PINOTTI & CARNEIRO, 2013).	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.2.1	Objetivos específicos:	3
1.2	JUSTIFICATIVA	3
2.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
2.1	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	5
2.2	TRATAMENTO DOS DADOS	6
2.2.1	Modelagem geológica 3D	6
2.2.2	Análise cinemática de estabilidade de taludes	8
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL.....	10
3.2	CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO	14
3.2	ANÁLISE CINEMÁTICAS DE TALUDES EM MACIÇOS ROCHOSOS	16
3.3	CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS.....	19
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS DADOS	22
5.	CONCLUSÕES	47
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

A construção de um túnel de adução para uma central hidrelétrica leva em consideração o reconhecimento de um determinado maciço rochoso, e incorpora várias informações adquiridas durante as fases de caracterização geológica-geotécnica do mesmo. A identificação e caracterização de estruturas nas rochas presentes no local da escavação do túnel é de grande importância para a contenção e percolação de água em fraturas, que podem alterar a qualidade do maciço rochoso e interferir no tempo e custos relacionados à Pequena Central Hidrelétrica (PCH).

A proposta deste trabalho é apresentar uma combinação de estudos geológicos que atuam como parâmetros para a engenharia civil na construção de projetos de túneis, de forma a identificar os riscos geológicos não previstos.

1.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A PCH Dores de Guanhões está localizada na cidade homônima, situada no rio Guanhões na porção leste do estado de Minas Gerais. O município Dores de Guanhões dista aproximadamente 220 km da cidade de Belo Horizonte, e este trajeto pode ser realizado pela BR-381 e continuação pela BR-120 até a entrada para o município. A principal via de acesso à PCH é a rodovia estadual MG-232, e a distância da sede municipal da cidade de Dores de Guanhões é de aproximadamente de 10 km. A localização e principais vias de acesso podem ser visualizadas na figura 1.

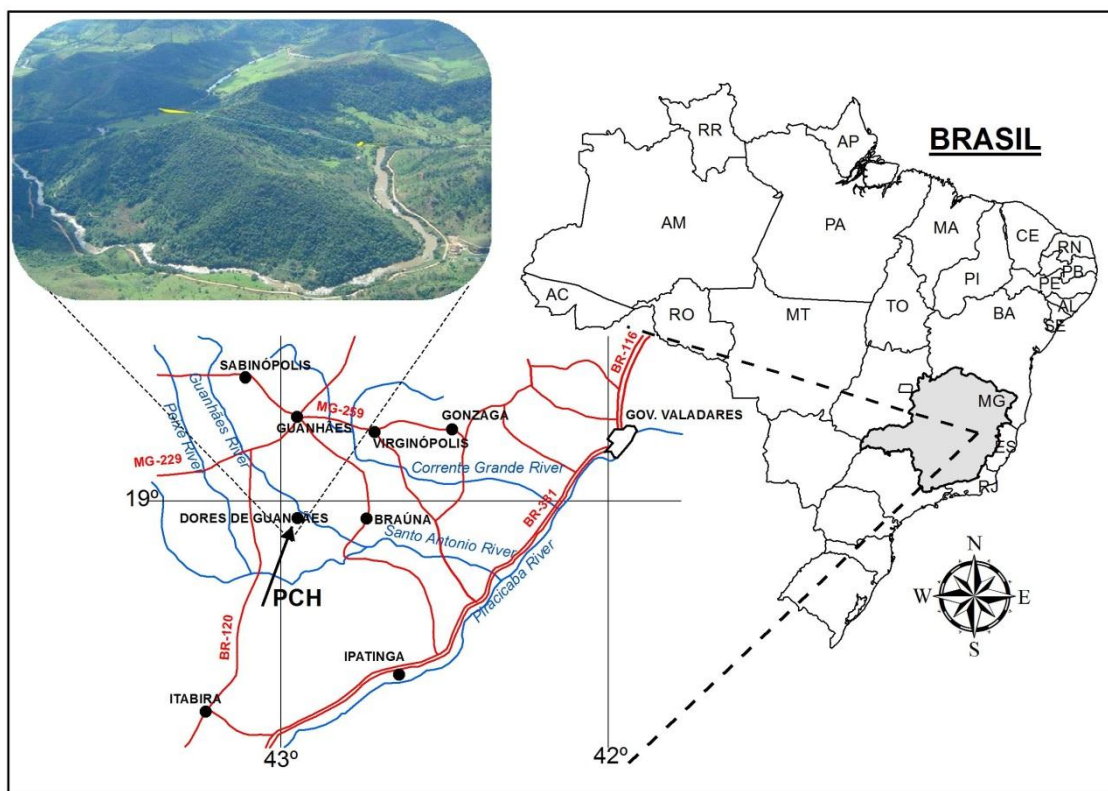


Figura 1: Localização e principais vias de acesso à PCH Dorés de Guanhães

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar a modelagem geológica e geotécnica no desemboque do túnel de adução da Pequena Central Hidrelétrica Dorés de Guanhães, para quantificar os horizontes de solo e topo do maciço rochoso, com enfoque na estabilidade geotécnica e de taludes no interior da região de desemboque do túnel de adução da PCH Dorés de Guanhães.

1.2.1 Objetivos específicos:

- Criação de seções interpretadas entre os furos de sondagens na região de desemboque do túnel, para quantificação e delimitação dos horizontes de solo e topo do maciço rochoso;
- Integração de sondagens geofísicas com as seções interpretadas para relacionar os dados apresentados com a estabilidade de superfície de solos;
- Determinação de potenciais áreas de instabilidade de blocos no interior do túnel através da criação de diagramas estereográficos para análise cinemática;

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Kochen (2009), os riscos geológicos, geotécnicos e impactos nas construções subterrâneas sempre ocorrem e são maiores nas escavações de grande porte. Para reduzi-los, é necessário examinar a probabilidade dos riscos possíveis (quais riscos podem efetivamente se concretizar), identificar os riscos a serem superados diante de desconformidades geotécnicas e geológicas graves, e se estruturar quanto às respostas aos riscos em casos concretos.

Neto e Kochen (2000) propõem incluir, no projeto de túneis, avaliações de risco de acidentes geológicos ou construtivos não previstos, para aperfeiçoar o projeto final, identificando e quantificando os riscos. Para isso devem-se levar em conta as incertezas das variáveis relacionadas aos aspectos geológicos e geotécnicos, as técnicas de construção, e considerar os critérios probabilísticos no projeto. É necessário conhecer as condições extremas na construção de túneis, como o reconhecimento prévio de feições geológicas e/ou hidrogeológicas desfavoráveis com diversas etapas de campo informativas, e mapeamento geológico-geotécnico nas paredes de escavação.

O mapeamento geológico-geotécnico do túnel em escavação propicia adequações imediatas no projeto, e principalmente subsidia, com informações qualitativas do maciço rochoso, na decisão do tratamento a ser aplicado.

Este trabalho está inserido no projeto de pesquisa P&D ANEEL para quantificação de riscos em contrato de obras, visando a avaliação integrada dos dados fornecidos pela CEMIG da PCH Dores de Guanhães e mapeamentos complementares. Especificadamente se concentra no túnel de adução que servirá de conduto de água para aproveitamento hidráulico, na construção de um modelo geológico local, qualificação e quantificação dos riscos geológico-geotécnicos, no que diz respeito a instabilidade geotécnica na região do desemboque. A geração de um modelo tridimensional integrado para incrementar as informações servindo de suporte para obras e projetos de engenharia, tem o intuito de melhorar a confiabilidade dos dados e reduzir de incertezas geológicas-geotécnicos, que acarretam custos e tempo na elaboração e execução dos projetos.

A integração dos dados de mapeamento do túnel, com o enfoque na estabilidade de blocos em paredes de escavações, permite uma visualização rápida e dinâmica do potenciais de ruptura e deslizamento de descontinuidades. Quando analisado com os parâmetros de classificação do maciço rochoso, tal análise auxilia na determinação e complementam a determinação das potenciais área do maciço que necessitam de revestimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

A base de dados utilizados para realização deste trabalho, tanto aqueles inseridos na modelagem geológica, como dados estruturais obtidos no mapeamento do túnel e de superfície, sondagens e geofísica foram adquiridos por meio do Projeto de Pesquisa P&D Aneel, parceria entre a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Os dados obtidos no mapeamento do túnel de adução e do mapeamento geológico em superfície foram armazenados em planilhas eletrônicas para facilitar as análises subsequentes, e inserção no *software* de modelagem geológica e de tratamento estrutural. Nestas planilhas, os dados estruturais do mapeamento do túnel e de superfície foram separados em campos específicos, com coordenadas UTM, profundidade, descrição, atitudes estruturais, e no caso específico do túnel de adução, os parâmetros geotécnicos para classificação do maciço rochoso. A apresentação destes dados pode ser visualizada na tabela 1.

Tabela 1: Organização dos dados estruturais do mapeamento do túnel de adução. No qual RQD: Índice de qualidade da rocha, Jn: Número de famílias de fraturas, Jr Rugosidade das fraturas, Ja: Alteração nas paredes das fraturas, Jw: Influência da água subterrânea, SRF: Índice de influência do estado de tensão do maciço, Q: Qualidade do maciço rochoso e CM: Classificação do maciço.

Distância(m)	x	y	z	Atitude	azimute	dip	Tipo	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	CM
115,47	723029	7890827	459	N58W	5	89	Fratura vertical	85	9	1,5	1	1	2,5	14	I
116,27	723029	7890826	459	N80E/15NW	350	15	Fratura	85	9	1,5	1	1	2,5	14	I
119,47	723032	7890825	458	N5E/18SE	95	18	Fratura	85	9	1,5	1	1	2,5	14	I
123,27	723035	7890823	458	N62W/88NE	28	88	Fratura	85	9	1,5	1	1	2,5	14	I
124,47	723036	7890822	458	N84E/20NW	354	20	Fratura	85	9	1,5	1	1	2,5	14	I
125,47	723037	7890822	458	N45W	45	89	Fratura vertical	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
130,07	723041	7890819	458	N55E/80SE	145	80	Fratura vertical	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
136,27	723047	7890816	458	N45W/88NE	45	88	Fratura vertical	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
137,07	723047	7890816	458	N22E/15NW	292	15	Fratura	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
137,67	723048	7890816	458	N70E/13NW	340	13	Fratura	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
137,87	723048	7890815	458	N40E	310	89	Fratura vertical	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
138,67	723049	7890815	458	N18E/65SE	108	65	Fratura	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
139,07	723049	7890815	458	N70W/85SW	200	85	Fratura	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
141,87	723052	7890814	458	N75W/88SW	195	88	Fratura vertical	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
142,87	723052	7890813	458	N40E/70SE	130	70	Fratura	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I
144,07	723053	7890812	458	N80E/20NW	290	80	Fratura	90	9	1,5	1	1	2,5	15	I

As sondagens realizadas foram obtidas em duas campanhas distintas, totalizando 36 furos na região de emboque, desemboque e barragem. Na análise

destas sondagens, foram abordados os parâmetros geotécnicos como RQD, grau de coerência, grau de compactação e grau de faturamento.

2.2 TRATAMENTO DOS DADOS

2.2.1 Modelagem geológica 3D

A criação do modelo tridimensional da área estudada, foi realizada no *software* MOVE, no qual foram inseridas informações do mapeamento estratigráfico das camadas de colúvio, solo, saprólito e rocha, conforme fornecido pelas sondagens e estrutural com indicação das fraturas mapeadas em campo e provenientes do mapeamento fornecido do túnel de adução.

O Move tem a capacidade de construção de um modelo geométrico, interpretação entre seções com visualização 3D e 2D, geração de volumes tridimensionais com a interpolação das informações bidimensionais, fatiamento de modelos 3D e integração com a análise estrutural.

Para criação do modelo geológico do túnel de adução da PCH Dores de Guanhães, a geração do modelo digital de elevação (figura 2) foi realizada a partir da interpolação das curvas de nível (topografia).

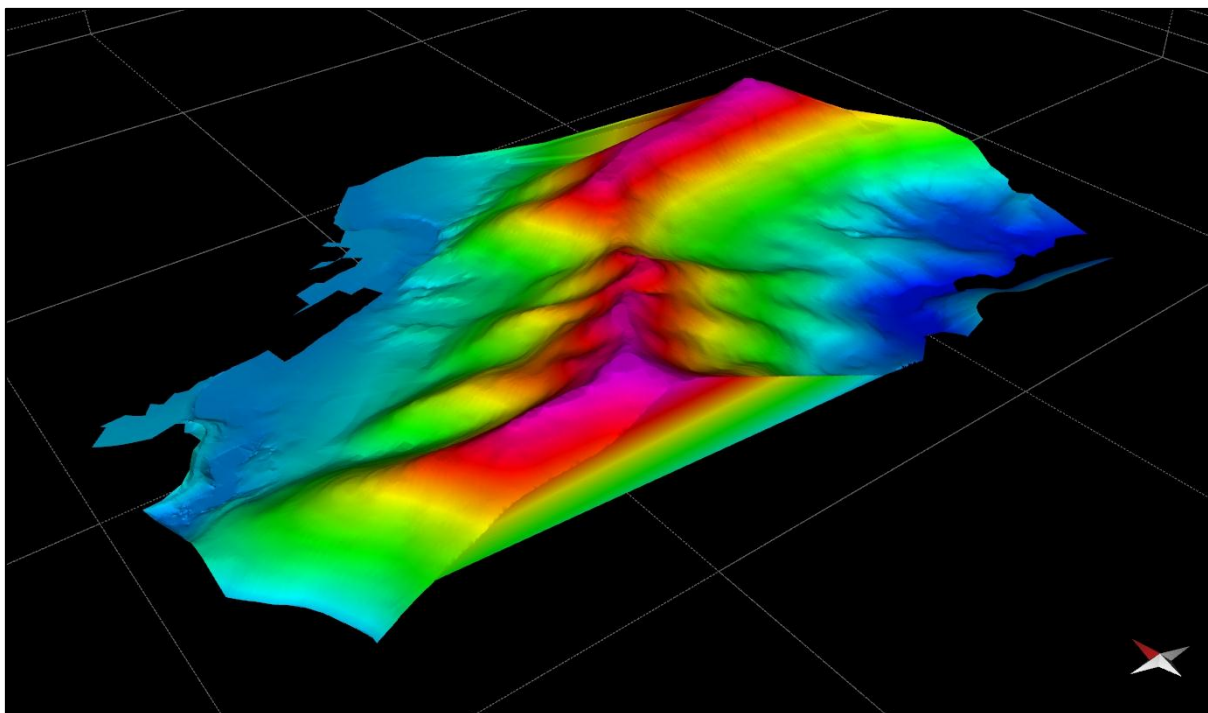


Figura 2: Superfície topográfica gerada no MOVE

Após inserção de uma superfície topográfica, foram inseridas as posições e dados correspondentes às sondagens da região de emboque, desemboque do túnel de adução da região da barragem. Para carregar esses dados, os mesmos foram transformados em arquivos de texto, em formato ASCII.

Embora as sondagens tenham sido realizadas nas regiões de emboque, desemboque do túnel de adução e na região da barragem (figura 3), para este estudo, foi elencado apenas a região do desemboque.

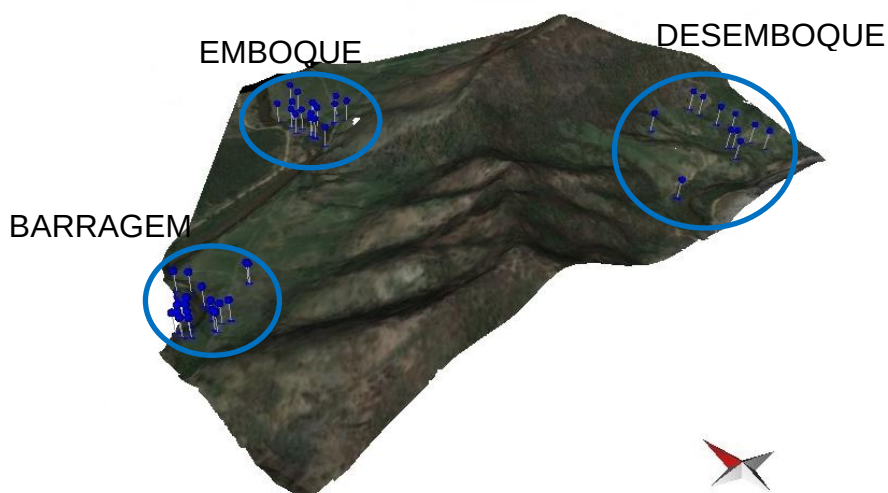


Figura 3: Distribuição dos núcleos de sondagens na superfície topográfica

2.2.2 Análise cinemática de estabilidade de taludes

A análise de estabilidade de taludes foi realizada a partir da análise estereográfica dos planos de descontinuidade em relação ao ângulo de atrito interno da rocha (ϕ) e a atitude da vertente exposta.

Em um diagrama de igual área, também conhecido como diagrama de Schimdt-Lambert, considerando o hemisfério inferior da esfera de referência, os dados estruturais das descontinuidades foram desenhados em uma folha de papel vegetal sobre o diagrama de igual área. Neste trabalho a representação dos dados planares foi realizada ciclograficamente, pois como a quantidade de dados no desemboque do túnel de adução é pequena, a visualização dos dados seria melhor representada e de melhor compreensão.

Com a folha que representa o diagrama de igual área fixa, girou-se a folha de vegetal, para leste ou para oeste, e a partir do norte original (visualizado no diagrama de igual área que esta fixo) traçou-se o grande círculo com o valor de mergulho do plano da superfície. O ângulo de atrito interno é representado como cone de atrito interno, representado como um círculo no diagrama, e o ângulo foi calculado pela contagem dos grandes círculos (representativo de graus), da extremidade para o ponto central na linha horizontal no centro do diagrama. A região de instabilidade é representada na cor cinza, delimitada pela cunha entre os planos

da vertente, da descontinuidade e cone de atrito interno. A representação dos plano traçados e do cone de atrito interno é visualizada na figura 4.

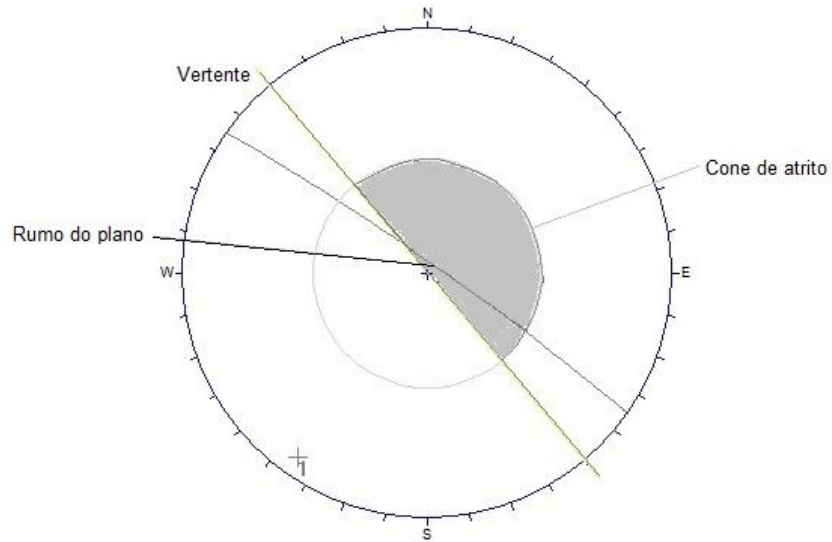


Figura 4: Estereograma com exemplo de planos de atitude de descontinuidade e de face da vertente. O rumo do plano representado encontra-se na região de instabilidade do diagrama, ocorrendo escorregamento do tipo planar.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GEOLOGIA REGIONAL LOCAL

A Província Mantiqueira apresenta disposição geral NNE-SSW, estendendo-se do Estado do Rio Grande do Sul ao sul do Estado da Bahia no território brasileiro. São diversos sistemas de orógenos colisionais com evolução no neoproterozóico/cambriano e com sistemas de cavalgamento em direção ao cráton São Francisco (PERES *et al.*, 2004). Dentre esses sistemas orogênicos está o Orógeno Araçuaí, no qual está inserida a área de estudo deste trabalho.

A Faixa Araçuaí representa a parte externa do orógeno Araçuaí-Congo Ocidental, formado a partir da colisão dos crátons São Francisco e Congo durante a amalgamação da parte oeste do paleocontinente Gondwana, no Neoproterozóico. Caracteriza uma faixa de dobramentos que bordeja a porção leste do cráton São Francisco. O esboço da Faixa Araçuaí mais localizada na região leste de Minas Gerais pode ser visualizada na figura 5.

O embasamento arqueano do Orógeno Araçuaí é constituído por ortognaisses resultados do retrabalhamento em domínio orogênico durante o Ciclo Brasileiro. O Complexo Mantiqueira constitui o embasamento gnáissico ortoderivado, é constituído por ortognaisses, ortognaisses bandados de composição granítica a tonalítica e espessura do bandamento gnáissico variando de centimétrica a métrica (NOCE *et al.*, 2007).

O Complexo Mantiqueira é visto como unidade de caráter autóctone e para-autóctone que representam o domínio cratônico retrabalhado no domínio orogênico e compreende um segmento retrabalhado do Orógeno Araçuaí no Cinturão Mineiro (NOCE *et al.*, 2007).

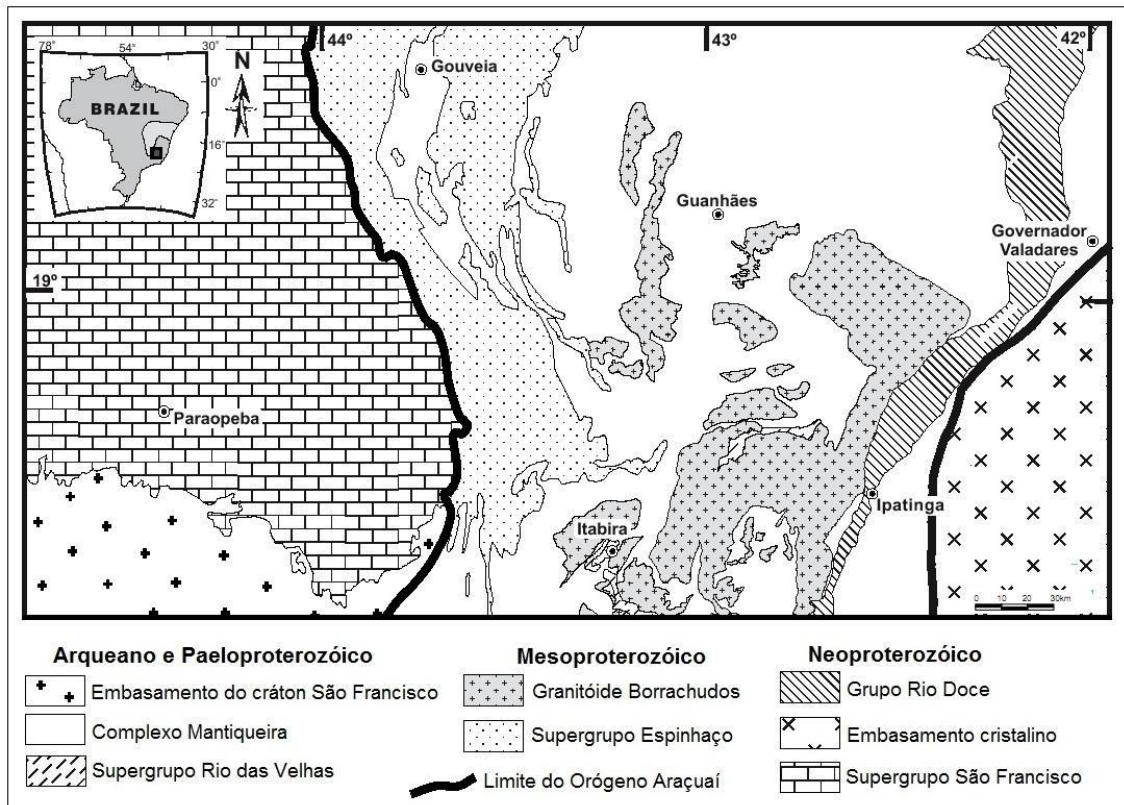


Figura 5: Mapa geológico da porção sudeste do Orógeno Araçuaí mostrando seus limites. Extraído de Peres *et al.*, (2004), compilado de Machado Fº *et al.*, (1983), Pinto *et al.*, (1997), Grossi-Sad *et al.*, (1997) e Peres (2000).

Intrudidos aos gnaisses do Complexo Mantiqueira estão os granitos da Suíte Borrachudos, classificados por Peres *et al.*, (2004), como álcali-granitos hololeucocráticos com mineralogia variando entre seus principais componentes de quartzo, microclinio e albita. Esses corpos granitoides estão relacionados às diversas fases evolutivas do Orógeno Araçuaí com metamorfismo relacionado ao Evento Brasileiro há cerca de 600 ma (NOCE *et al.*, 2007).

3.2 GEOLOGIA LOCAL

Na região mapeada em Dores de Guanhães, as principais feições estruturais são de cavalgamentos de orientação NNE –SSW, com componentes oblíquos dextral que são deslocados ou truncados por um sistema menos intenso na direção NW- SE, que afetam rochas granito-gnaisses do Granito Açucena pertencente a Suíte Borrachudos.

Estão presentes bandamentos gnáissicos, foliações no granito e fraturas inclinadas relacionadas à deformação de idade Neoproterozóica e relacionada à Orogênese Brasileira, que afetou as rochas da região. Em níveis superficiais do maciço rochoso, ocorrem fraturas abertas com oxidação generalizada e juntas de alívio, produzidas por processos de erosão e entalhamento do vale do rio.



Figura 6: Região de desemboque, mostrando a interface solo e macio rochoso.

Na região do desemboque as rochas apresentam foliação marcante com mergulho subverticalizado e direção oblíqua ao eixo do túnel. O faturamento na região possui intensidade branda, contido em famílias de alto ângulo de mergulho e ocorrem de forma dispersa uma família sub-horizontal. Na porção interna do túnel, ocorrem níveis bandados de concentrações de biotita, denominado localmente biotitito, com orientação subparalela à foliação.



Figura 7: Detalhe da foliação marcante na rocha do desemboque e fraturas escalonadas.

Ocorrem também, de forma esparsa, veios pegmatíticos centimétricos e decimétricos, com direção oblíqua ao eixo do túnel e mergulho subvertical até 60°. Sua composição é rica em feldspato potássico, quartzo, biotita e minerais acessórios. A direção destes veios varia de subparalela a foliação a oblíqua (15/70, 21/70, 192/67). Em geral o mergulho destas feições é de alto ângulo a subverticalizado, e direção subparalela a foliação.



Figura 8: Detalhe para veio pegmatítico no interior do túnel.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

Um maciço rochoso pode ser definido como uma unidade de rocha são delimitado por blocos a partir de discontinuidades presentes. As discontinuidades encontradas no maciço são estruturas geológicas como falhas, juntas, acamamento, xistosidade, zonas de cisalhamento etc., as quais contém uma ou mais superfícies que a um determinado esforço apresente uma redução à resistência ao cisalhamento (ABGE, 1998).

De acordo com Bazante *et al* (1999), a classificação geomecânica do maciço tem por objetivo zonear o maciço rochoso em características e comportamentos mecânicos semelhantes, e o conhecimento das características que determinam seu comportamento mecânico em função das solicitações do seu entorno físico.

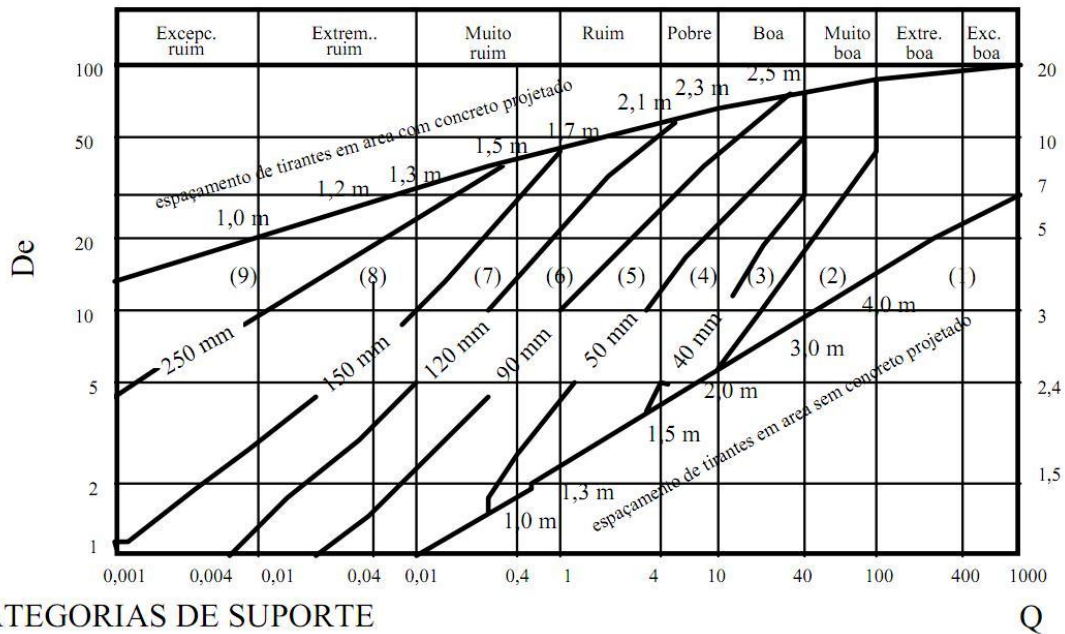
O sistema de classificação de maciços rochoso tem o intuito de auxiliar no projeto da construção de túneis, principalmente em sua estabilidade.

O valor de Q, proposto por Barton (2002), um dos métodos de classificação, é calculado a partir da relação de seis parâmetros e a expressão para realizar o cálculo é mostrada a seguir:

$$Q = (RQD/J_n).(J_r/J_a). (J_w/SRF)$$

No qual RQD é o índice de qualidade da rocha, expresso em porcentagem adquirida pela competência de fragmentos de testemunho de sondagem, J_n é o número de famílias de fraturas nos maciços, J_r é a influência da rugosidade dos planos, J_a é o índice de influência de alteração das paredes, J_w é o índice de influência da pressão de água subterrânea e SRF é o índice de influência das tensões do maciço. As três relações são parâmetros referentes à relação entre os tamanhos dos blocos (RQD/J_n), em relação a força de atrito (J_r/J_a), e relativo ao efeito da água, falhas e tensões do maciço (Barton 2002).

O projeto de um túnel depende da classe Q calculada e do tamanho da abertura do túnel, denominada Dimensão equivalente (D_e), calculada a partir da razão da dimensão da escavação em metros pelo EJR (Excavation Support Radio). O sistema Q permite classificar o maciço rochoso em 9 categorias (figura 9) e tem por objetivo definir o tipo de suporte necessário à estabilidade de maciços rochosos interessados na construção de túneis.



(1) Sem suporte	(6) Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 90-120 mm, e com tirantes
(2) Tirantes curtos localizados	(7) Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 120-150 mm, e com tirantes
(3) Sistema de tirantes	(8) Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de > 150 mm, reforçado com arcos de concreto e tirantes
(4) Sistema de tirantes com concreto projetado de 40-100 mm	(9) Estrutura de concreto
(5) Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 50-90 mm, e com tirantes	

Figura 9: Gráfico De(Dimensão equivalente) versus Q(qualidade da roca) para definição do tipo de suporte do túnel. (Moreira Filho, 2003, modificado de Grimstad e Barton, 1993).

Bieniawski (1989) propõe uma classificação geomecânica que considera a orientação de discontinuidades que somado ao peso parâmetros característicos do maciço rochoso resultará um valor final RMR que determina a classe do maciço rochoso, dividida em 5 classes. Os parâmetros analisados são índice RQD, resistência uniaxial da rocha, espaçamento das fraturas, orientação das fraturas, condição das discontinuidades e fatores hidrogeológicos. A partir das classes de RMR pode-se obter valores de estabilidade do maciço sem autorevestimento em relação ao vão livre do túnel, como ilustrado na figura 10.

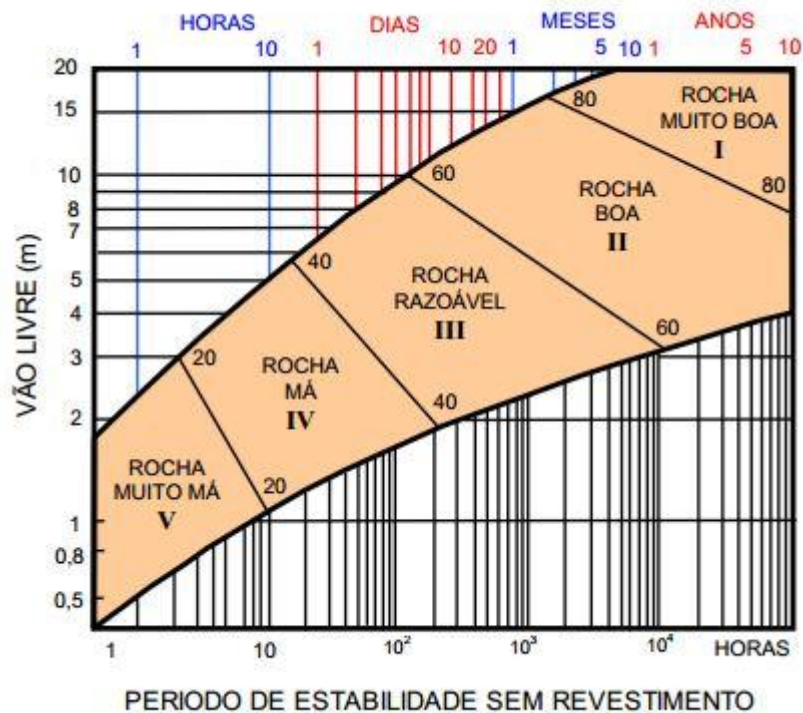


Figura 10: Gráfico de variabilidade de estabilidade do maciço sem revestimento versus vão livre do túnel. (Bastos 1998, adaptado de Bieniawski, 1973, extraído de Dinis da Gama, 1976).

O índice Q e RMR para classificação de maciços rochosos propõem a quantificação de massas rochosas com base na descrição qualitativa de padrões geológicos. É um sistema requerido para identificação e avaliação para estimar o projeto do suporte do túnel.

3.2 ANÁLISE CIMENÁTICAS DE TALUDES EM MACIÇOS ROCHOSOS

Quando uma escavação subterrânea é realizada, a retirada de um determinado volume de rocha pode gerar a queda ou o deslizamento das superfícies de descontinuidades presentes na face da vertente livre da escavação (HOEK *et al*, 1998).

A análise cinemática de blocos tem como base as atitudes dos planos de fraquezas das descontinuidades contidas no maciço, levando em conta também o ângulo de atrito ao longo das descontinuidades. Tais descontinuidades podem ser

reconhecidas em campo a partir de estruturas planares como planos de falhas, juntas, xistosidade, acamamento, entre outros.

De acordo com Fiori e Carmignani (2009), três tipos de deslizamentos em maciços rochosos ocorrem basicamente, sendo eles do tipo planar, em cunha e tombamento de blocos. Todos os tipos de deslizamentos estão relacionados às superfícies das discontinuidades com o valor do ângulo de atrito interno (ϕ) e a atitude da vertente ou do talude.

O escorregamento segundo estruturas planares ocorre quando as superfícies são inclinadas a um ângulo menor que o inclinação na direção face livre da vertente, e a um ângulo superior ao ângulo de atrito interno (ϕ). Além disso, o plano deslizante deverá aflorar na face aberta da vertente.

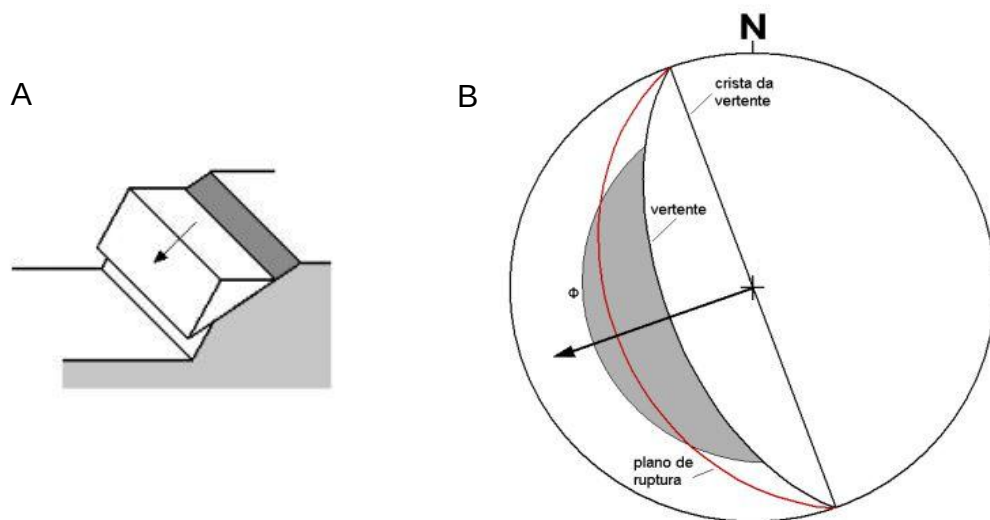


Figura 11: (A) Ruptura planar (HOEK e BRAY, 1981, extraído de FIORI e CARMIGNANI, 2009). (B) Ruptura planar representada no diagrama estereográfico. A área sombreada representa as possíveis direções de deslizamento (Adaptado de FIORI e CARMIGNANI, 2009 extraído de PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

O deslizamento em cunha é gerado quando duas estruturas planares se interceptam e, quando a linha de intersecção destes planos afloram na vertente exposta do maciço. Neste caso, o caimento da linha de intersecção deve ser maior que o ângulo de atrito interno (ϕ) e menor que o mergulho da face da vertente. Na análise estereográfica, um deslizamento em cunha (figura 12A) irá ocorrer quando a direção da intersecção dos planos cair na região de instabilidade, representada de meia-lua na figura 12B.

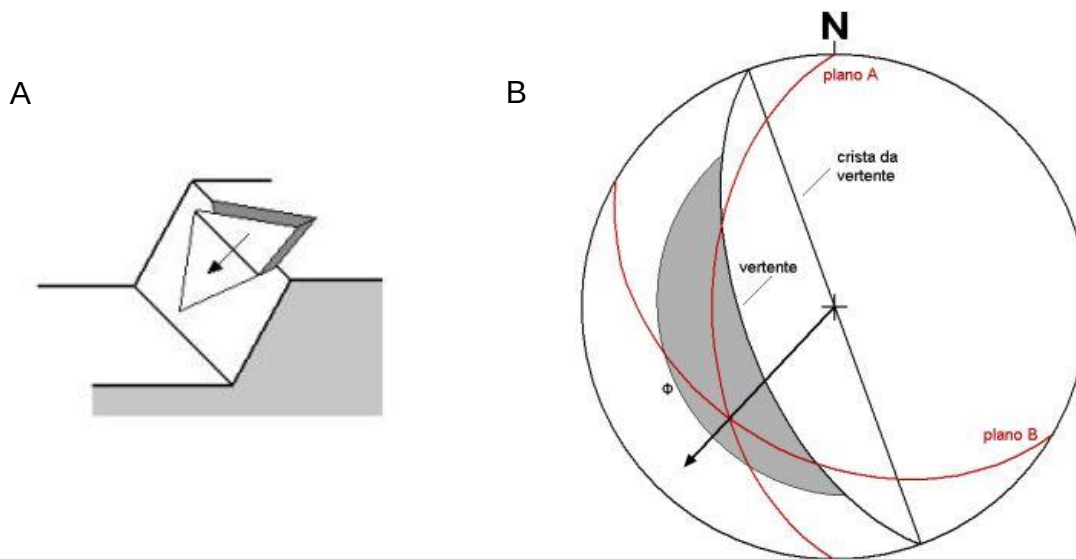


Figura 12: (A) Ruptura em cunha (HOEK e BRAY, 1981, extraído de FIORI e CARMIGNANI, 2009). (B) Ruptura em cunha representada no diagrama estereográfico. A área sombreada representa as possíveis direções de deslizamento (Adaptado de FIORI e CARMIGNANI, 2009 extraído de PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

Em relação a tombamentos de blocos, não há relação com a movimentação das superfícies de deslizamento, mas sim a blocos que rotacionam sobre eixos fixos. As condições mínimas para o caimento de blocos em escavações é a presença de duas famílias de descontinuidades, uma com mergulho contrário ao mergulho da vertente a altos ângulos, e outra com mergulho de baixo ângulo no mesmo sentido da vertente (HOEK; BRAY, 1981; WALTON, 1985 citado por FIORI & CARMIGNANI, 2009). Os rumos dos mergulhos dos planos devem estar situados dentro de 20° do rumo de mergulho da face da vertente (FIORI & CARMIGNANI, 2009).

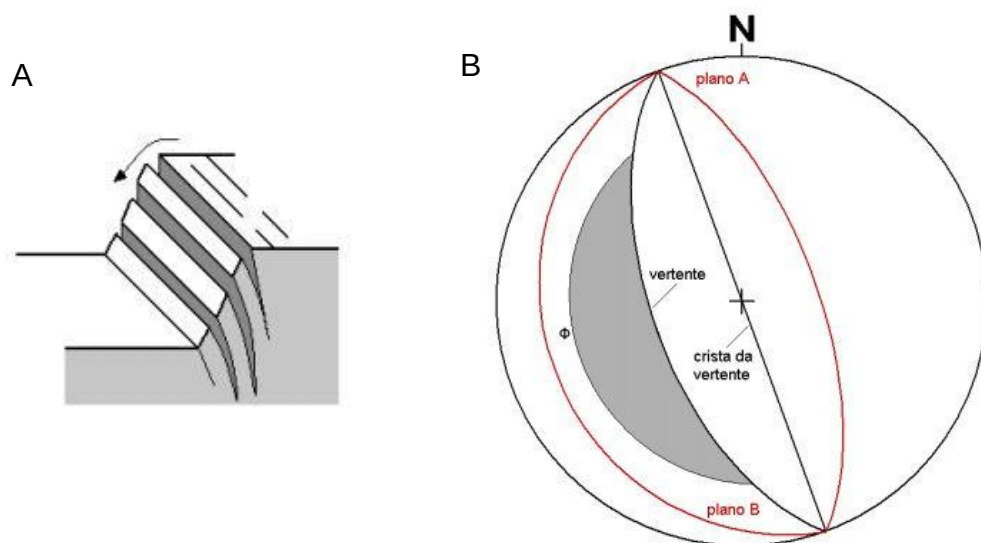


Figura 13: A) Tombamento de blocos (HOEK e BRAY, 1981, extraído de FIORI e CARMIGNANI, 2009). (B) Tombamento de blocos representada no diagrama estereográfico. O plano A om mergulho com alto ângulo de mergulho e inclinado contra a vertente, e o plano B inclinado a favor da vertente e com baixo ângulo de mergulho. A área sombreada representa a área de instabilidade na qual ocorrerá o deslizamento (Adaptado de FIORI e CARMIGNANI, 2009 extraído de PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS

Os solos são gerados preferencialmente a partir das condições climáticas e material de origem, ou seja, o tipo de rocha. Esse processo é chamado de intemperismo físico, quando há a desagregação mecânica de fragmentos da rocha, e intemperismo químico originado da decomposição das rochas. O resultado de cada tipo de rocha a esses processos irá gerar uma alteração superficial, e a partir da intensidades dos processos intempéricos horizontes de solos serão formados. A figura 14, mostra os principais horizontes de solos.

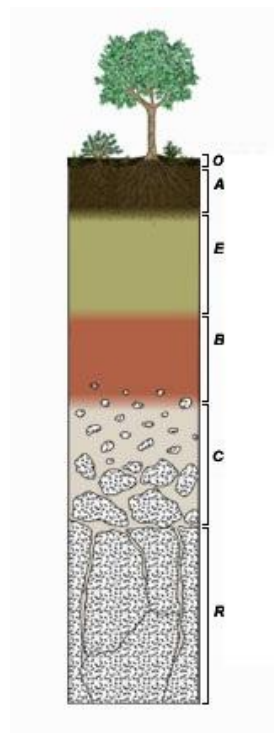


Figura 14: Visualização dos horizontes de solos (EMBRAPA 1988).

O horizonte O é mais superficial, caracterizado pela predominância de restos de material orgânico. O horizonte A é um horizonte mineral com perda de componentes minerais. O horizonte E é um solo no qual todas as argilas foram lixiviadas, com concentração de materiais mais resistentes como areia. O horizonte B é a acumulação de material proveniente dos horizontes superiores, de acumulação de argila. O horizonte C é constituído por material não consolidado, pouco afetado pelos processos pedogenéticos (processos de formação de solos). Abaixo de todos os horizontes citados está a rocha consolidada. A descrição dos horizontes de solos é baseada na classificação usada pela EMBRAPA (1988).

Duas categorias de solos são caracterizadas. A primeira por solo residual, gerado pelo intemperismo físico (desagregação) da rocha no local *in situ*. A segunda seria a categoria de solos transportados, os quais são separados de acordo com o agente de transporte, como por exemplo o solo coluvionar, gerado pela ação da gravidade, e o solo aluvionar, gerado por corrente de rios ou algum tipo de fluxo de água.

Na porção leste do estado de Minas Gerais, o mapa de solos elaborado pela Universidade Federal de Viçosa é visualizado na figura 15. Mais especificadamente na região do entorno da PCH Dores de Guanhões, no município homônimo, os tipos

de solos presentes são..latossolos vermelhos com textura muito argilosa e relevo forte ondulado (MAPA DE SOLOS DO ESTADO DE MNAS GERAIS, 2010).

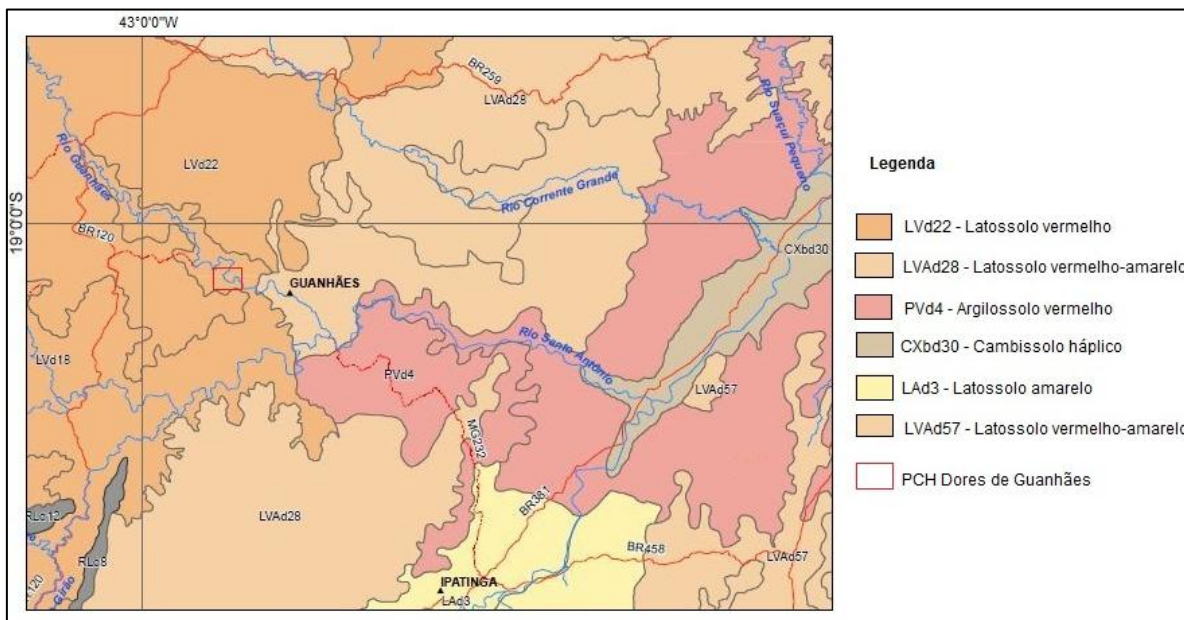


Figura 15: Mapa de solos da região leste do estado de Minas Gerais, detalhado para a região de Dorés de Guanhões. Adaptado de Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, Folha 4, 2010.

Um fator de extrema importância na caracterização nas discontinuidades presentes nos solos é a presença de água. A água é um fator de risco adicional, pois sua presença torna mais vulnerável à movimentação as discontinuidades geológicas como falhas, juntas, e níveis de solos. A presença de um horizonte de solo espesso, com influência de fatores como alta pluviosidade e declividade da superfície, por exemplo, podem gerar escorregamentos de grande volume de material na interface solo/rocha de emboque ou desemboque de um túnel. MENEZES *et al.* 1978 (citado por JORGE DA SILVA, 2006) relata sobre o caso do Túnel Américo Simas no ano de 1971, no qual houve escorregamento de material constituído de solo superficial argilo-arenoso e parte da rocha alterada. Os fatores que levaram a este acidente foram precipitações elevadas, declividade elevada da encosta, propriedade e condições da drenagem.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS DADOS

A modelagem 3D foi idealizada para reduzir as incertezas nas interpretações geológicas e análise de riscos, as quais auxiliam os grandes projetos no âmbito da engenharia. A diferença entre a modelagem 2D e a 3D está essencialmente na visualização dos dados integrados, já que no modelo tridimensional a correlação entre as informações torna-se muito mais notável, e os erros podem ser melhor observados, e assim reduzidos. Na PCH Dores de Guanhães, os dados obtidos em etapas preliminares, tais como descrição dos parâmetros geotécnicos do maciço, levantamentos geofísicos, dados de mapeamento de superfície e do interior do túnel e informações de furos de sondagem, foram integrados para geração de um modelo 3D, especificadamente na região de desemboque do túnel de adução.

A região de desemboque do túnel de adução da PCH Dores de Guanhães apresenta maior espessura de solo, considerando as imagens obtidas no mapeamento geológico (figura 16) e as informações obtidas nos boletins de sondagens entre as regiões nas quais as sondagens foram realizadas. O peso das camadas de solo, somando-se a presença de água em períodos de alta pluviosidade, pode ser um fator condicionante a deslizamento de superfícies de solo e aumento o fator de risco geológico e geotécnico. Por este motivo, este trabalho visa à modelagem geológica e a análise de estabilidade de taludes em túneis para a região de desemboque do túnel.



Figura 16: Vista do desemboque do túnel de adução.

As sondagens realizadas pela CEMIG foram efetuadas em mais de uma campanha e, assim, foi necessário identificar os erros de locações. O uso de bases topográficas distintas nas diversas etapas, produziram resultados com cotas diferentes no modelo topográfico. Para minimizar esse erro, a alternativa foi recolocar as cotas de cada sondagem com base na topografia, para que uma modelagem 3D adequada seja bem realizada. A diferença de altitude entre a cota fornecida (Z) e a cota modificada para a modelagem (Z Modelo Digital de Elevação – MDE) para as sondagens da região de desemboque é mostrada na tabela 2, e a disposição dos furos de sondagem com a topografia corrigida está evidenciada na figura 17.

Tabela 2: Valores de Z (MDT) corrigidos e a diferença das cotas fornecidas pelas sondagens na topografia.

Sondagem	X	Y	Z	Z (MDT)	Diferença
SM-03	723507,41	7890025,216	433,13	436,164	3,03
SEV-01-S6	723932,09	7890103,8	442,28	440,4438	-1,84
SEV-01-S8	723825	7890078,28	445,1	443,3395	-1,76
SM-102	723905,701	7890252,58	454	454,5486	0,55
SM-103	723925	7890135	443	443,5846	0,58
SM-104	723935	7890065,443	438,22	437,7971	-0,42
SM-105	723945,566	7890016,717	435	435,2644	0,26
SM-106	723893,649	7890284,731	461,69	462,851	1,16
SR-05	723669,9	7890269,68	477,33	477,5054	0,18
SR-06	723839,92	7890090,07	442,73	442,1695	-0,56
SR-07	723802	7890031,99	450,22	450,4881	0,27
SRD-200	723854,107	7890076,993	442,27	442	-0,27

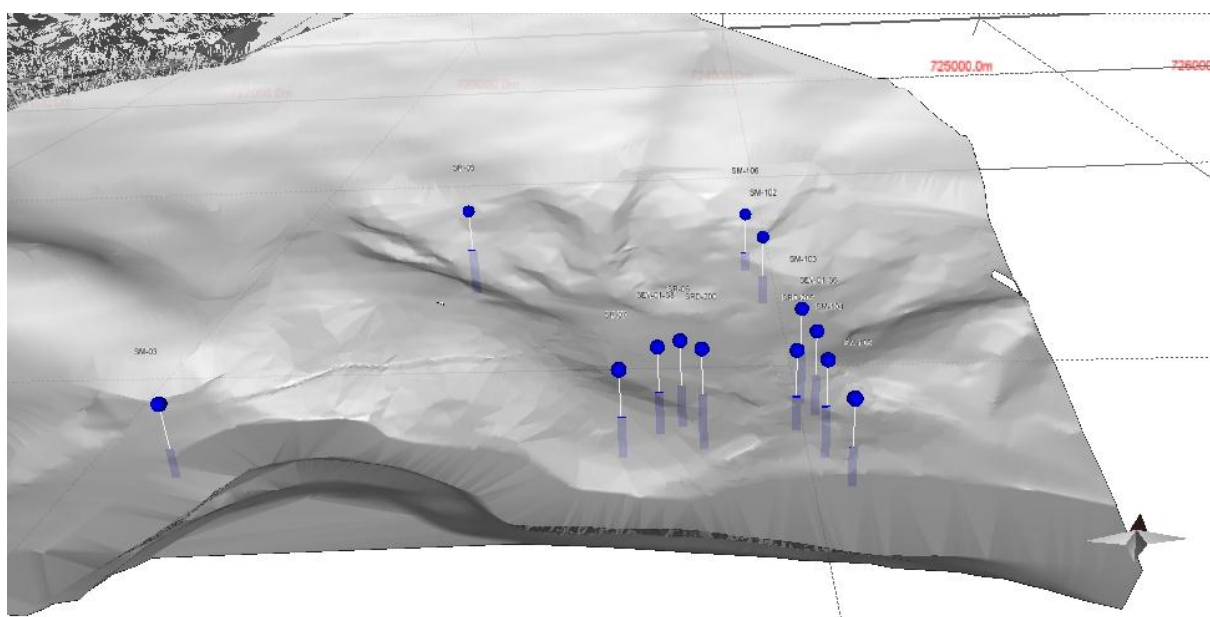


Figura 17: Sondagens da região de desemboque do túnel, com cotas da boca do poço corrigidas na superfície topográfica.

No espaço entre as sondagens, a variação topográfica é bem significativa. Neste trabalho, foram gerados modelos para regiões em que há concentração de sondagens, especificadamente para a área de desemboque do túnel de adução. As sondagens em sua maioria estão localizadas em cotas altimétricas variando de 400 a 500 metros.

A construção de seções a partir da ligação de sondagens próximas tem por objetivo quantificar os horizontes geológicos de interesse, delimitando topo rochoso,

espessura de solo e saprólito. Sem conexão com outras sondagens, os horizontes são interpretados como camadas horizontalizadas, gerando um modelo sem interpretação geológica condizente com a realidade. A interpretação de diversas seções interpoladas auxiliou na delimitação da geometria do horizonte desenhado mais próximo com a geologia local.

Primeiramente as seções foram geradas em superfície 2D (figura 18), e os horizontes geológicos foram delimitados por linhas de cores no topo de cada intervalo (figura 19). Na sequência, as linha de interpretação 2D foram transformadas em uma superfície de modelagem 3D, as quais foram representativas da interpolação de duas seções que caracterizam a modelagem 3D deste estudo. O produto da interpolação das seções pode ser visualizado na figura 20.

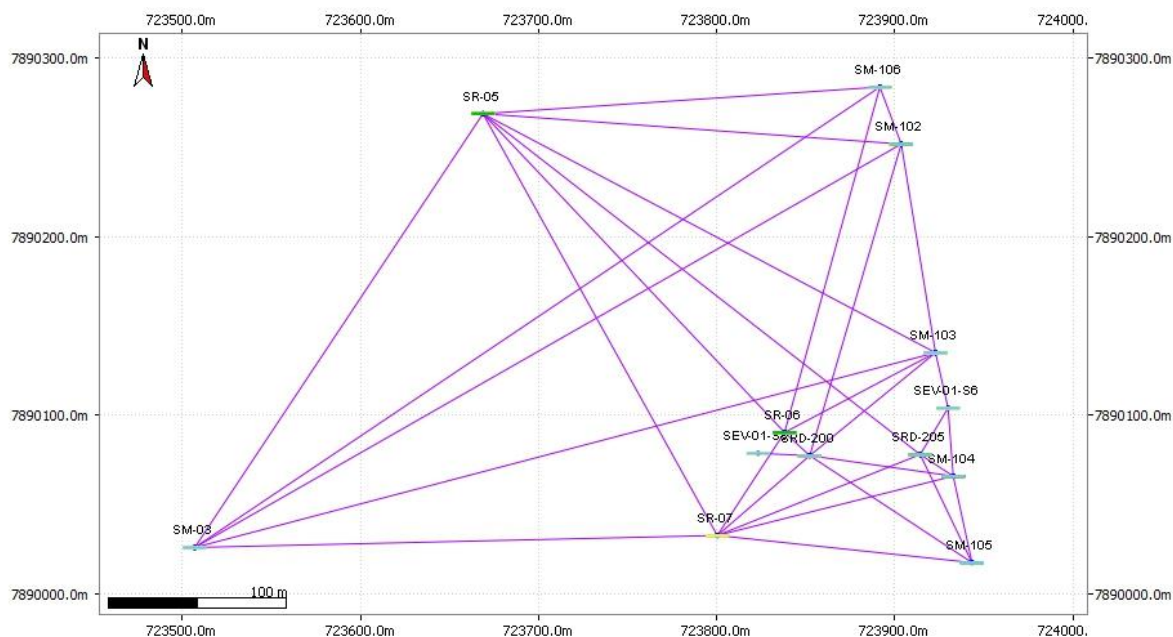


Figura 18: Disposição em planta (visualização 2D) das seções entre as sondagens. As linhas roxas representam a linha da seção interpretada.

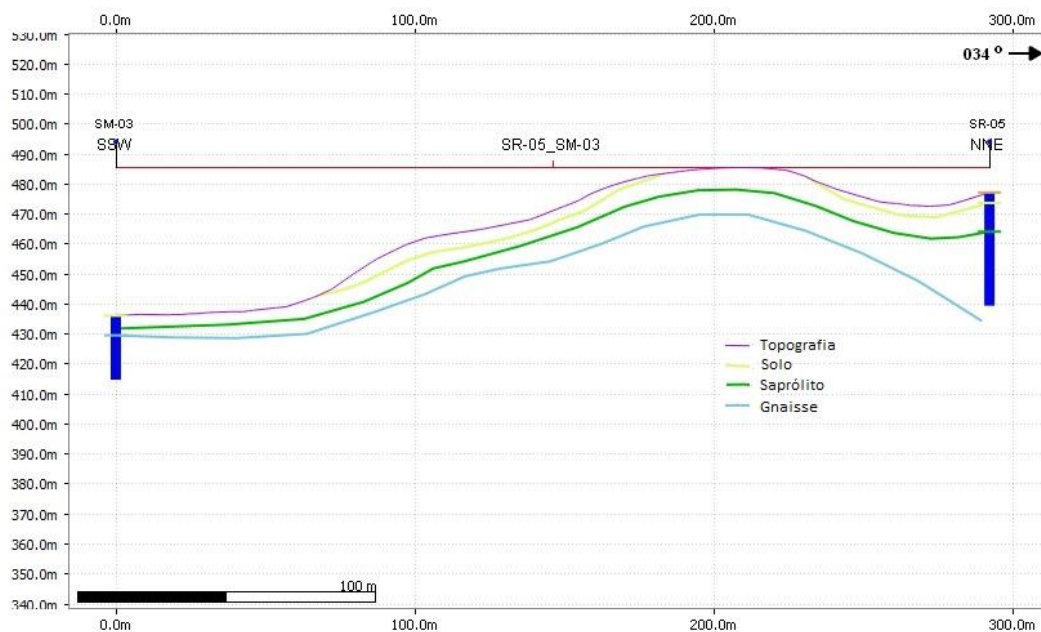


Figura 19: Interpretação entre as seções SM-03 e SR-05.

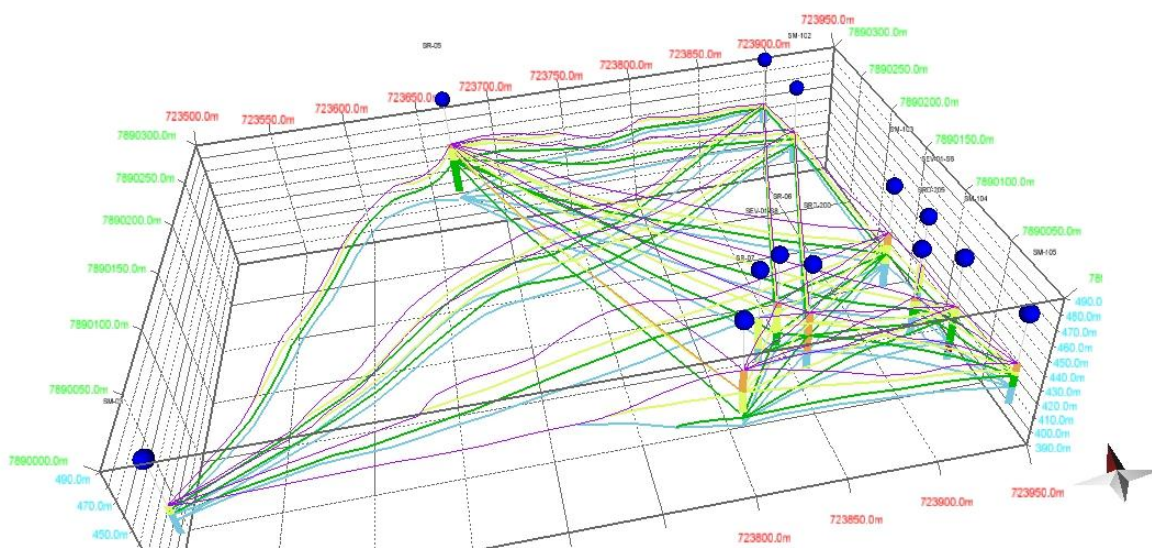


Figura 20: Interpretação dos horizontes de solo e topo rochoso.

Para uma melhor visualização dos horizontes interpretados as seções foram preenchidas com cores pré-estabelecidas e o resultado deste produto é visualizado na figura 21, na qual está representada a interpretação dos furos SR-06 e SM-106.

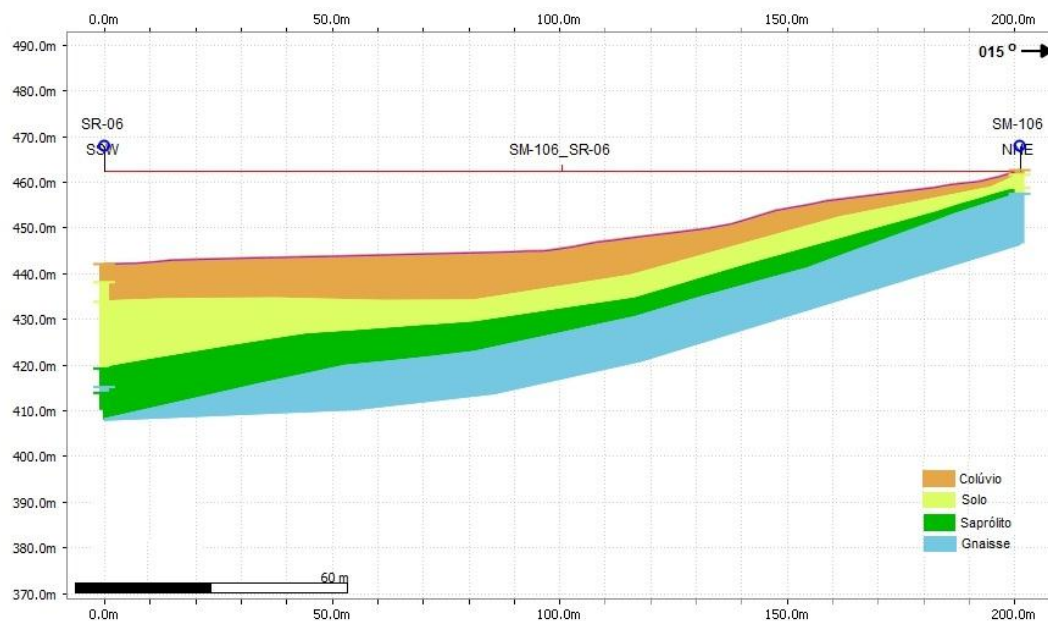


Figura 21: Seção SR-06_SM-106 na região de desemboque do túnel de adução

A interpretação de horizontes nas seções, principalmente entre as seções mais distantes entre si, foi realizada a partir da correlação dos horizontes com as seções já interpretadas (figura 22). Desse modo, com o cruzamento das seções, os horizontes elaborados para o modelo 3D tendem a minimizar os erros e representar a realidade geológica e pedológica mais representativa da original na superfície.

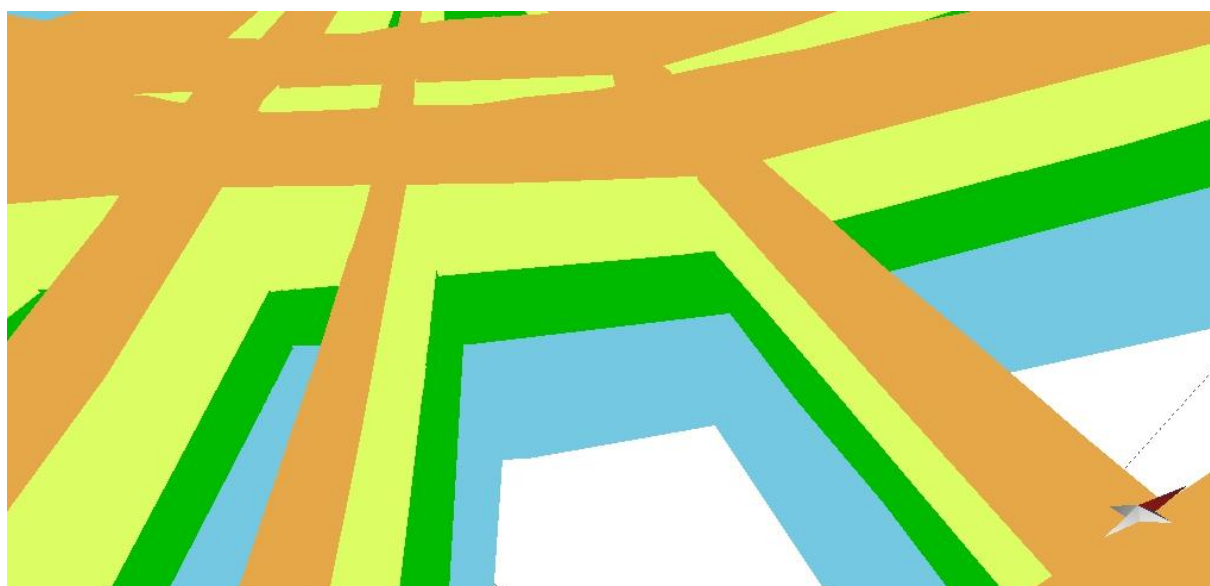


Figura 22: Detalhe da correlação entre os horizontes das seções interpretadas

A conexão das 28 seções interpretadas entre os 12 furos de sondagem da região de desemboque do túnel, gerou um modelo 3D delimitando os horizontes de solos e topo com o maciço rochoso, visualizado nas figuras 23, 24, 25 e 26.

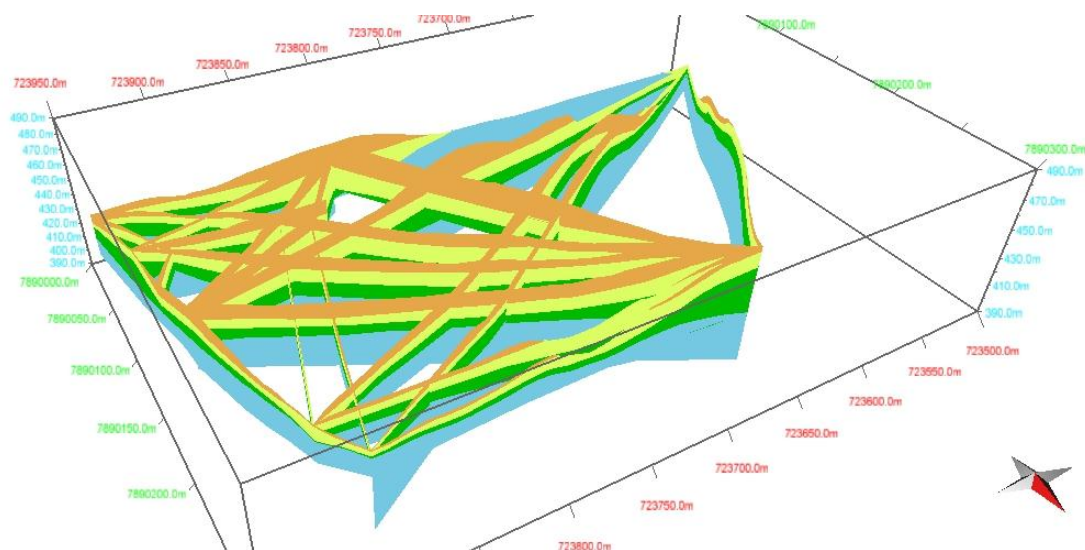


Figura 23: Modelo 3D gerado para a região de desemboque do túnel a partir da interpretação de seções. Visão de nordeste para sudoeste.

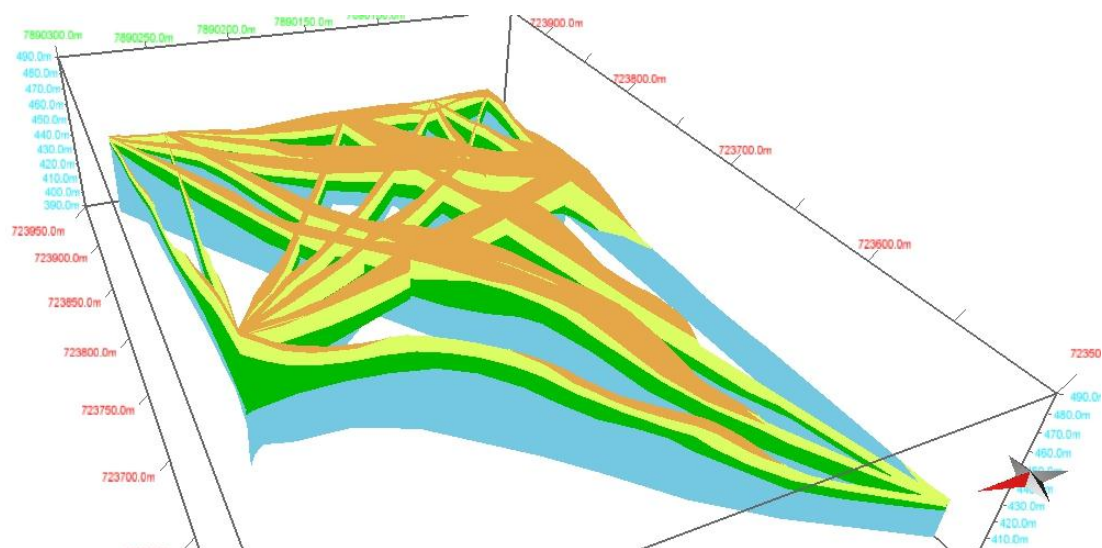


Figura 24: Modelo 3D gerado para a região de desemboque do túnel a partir da interpretação de seções. Visão leste para oeste.

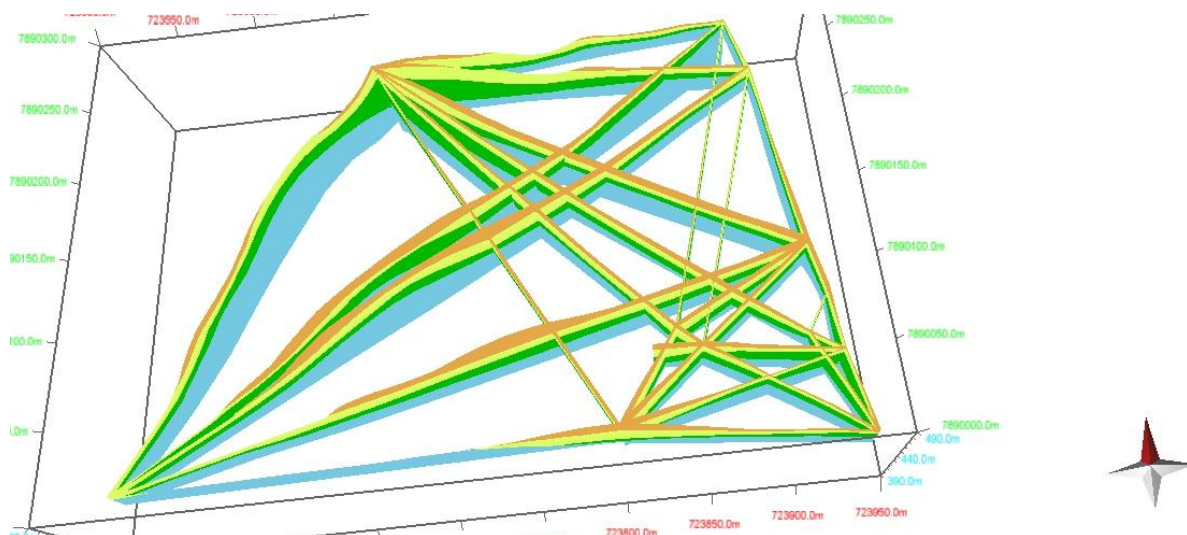


Figura 25: Modelo 3D proposto para a região de desemboque do túnel

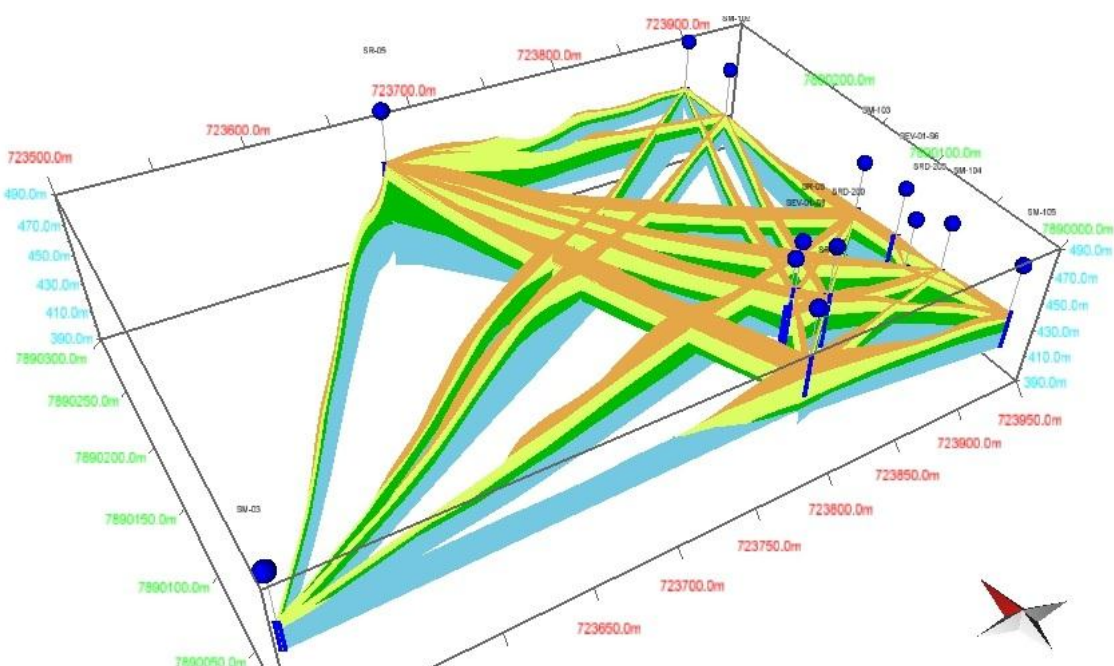


Figura 26: Modelo 3D gerado para a região de desemboque do túnel, com a posição dos furos de sonfagem e representação das seções.

A utilização de seções geofísicas, serviu como um parâmetro essencial adicional na delimitação dos corpos mais resistentes no modelo. O levantamento geofísico foi realizado na extensão em superfície do túnel de adução da PCH Dores de Guanhões. Para este estudo, utilizou-se o método geolétrico, que por meio de uma fonte artificial para induzir energia elétrica na superfície e obtém os valores de resistividade dos materiais do subsolo. Este método é utilizado para identificar

feições geológicas como fraturas, pois mostra a diferença de resistividade entre um material com fraturas preenchidas ou não, e rocha sã, e também utilizado para delimitação das zonas de alteração no maciço rochoso)

O arranjo utilizado para a aquisição dos dados geofísicos foi o caminhamento elétrico, o qual consiste na indução e recepção de correntes elétricas ao longo de uma linha no terreno. Ao total foram instalados 60 canais com espaçamento de 10 metros no terreno. O equipamento utilizado neste levantamento foi um resistímetro digital com resolução de 50 nV, um sistema multi-eletrodos de 60 canais. A figura 27 mostra o resultado do levantamento geofísico no eixo do túnel de adução, na qual é possível observar duas regiões que se destacam nos valores de resistividade. Os menores valores de resistividade são relacionados às cores mais frias (azul) e os maiores valores às cores mais quentes (vermelho). O trecho mapeado como solo ou regolito na seção apresenta valores de resistividade abaixo de 5000 ohms/m, acima destes valores são encontradas rocha sã, interpretadas com ausência de faturamento, com ou sem preenchimento de algum material.

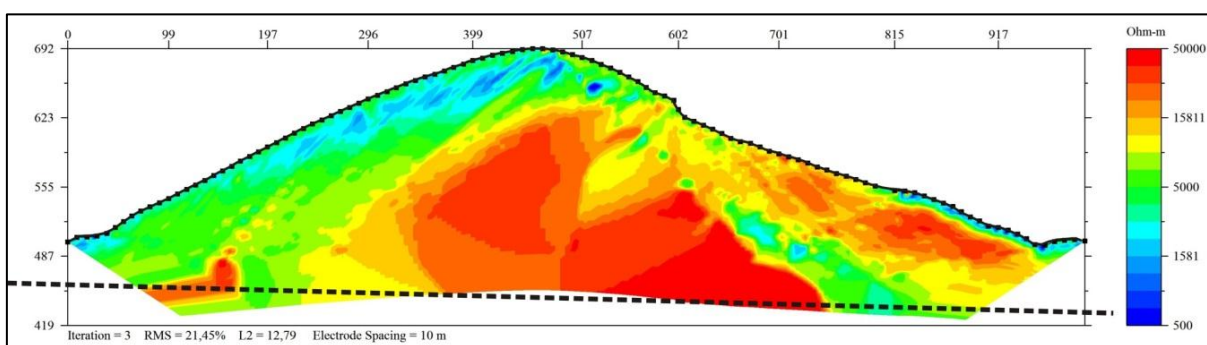


Figura 27: Seção geofísica realizada no eixo do túnel de adução

Localmente na região de desemboque do túnel de adução, foram utilizadas seções geofísicas adquiridas na época do projeto básico da obra, e suas disposições no modelo 3D são observadas na Figura 28 A disposição destas seções integradas ao modelo 3D gerado é visualizado nas figuras 29, 30 e 31.

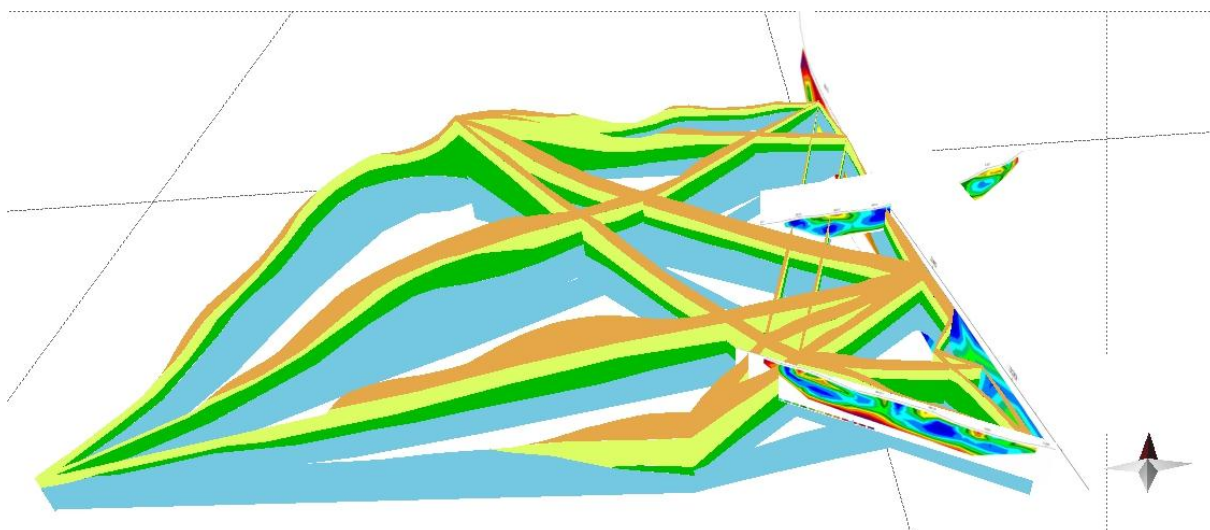


Figura 28: Disposição das seções geofísicas na região de desemboque do túnel.

A partir da interpolação da seção geofísica de detalhe no segmento de desemboque do túnel de adução com as seções interpretadas, a figura 29 mostra a região com maiores valores de resistividade entre as seções geofísicas interpretadas. Os polígonos delimitados na figura 29C realçam dois intervalos de contraste nos valores de resistividade. Na região realçada pelo polígono a, os valores de resistividade variam de 15.000 até valores superiores a 50.000 Ohm/m, interpretado como o maciço rochoso, com aumento da espessura de rocha sã para norte da área. Já o polígono realçado pela letra b possui valores médios de resistividade, mas em comparação com outras áreas da seção geofísica é interpretado como horizonte espesso de rocha alterada (saprólito) que armazena as características e propriedades da rocha sã, assim como na região em verde que contorna o polígono delimitado pela letra a. As outras regiões da seção geofísica possuem valores de resistividade mais baixos, interpretados como horizonte de solo e colúvio (solo transportado) no topo.

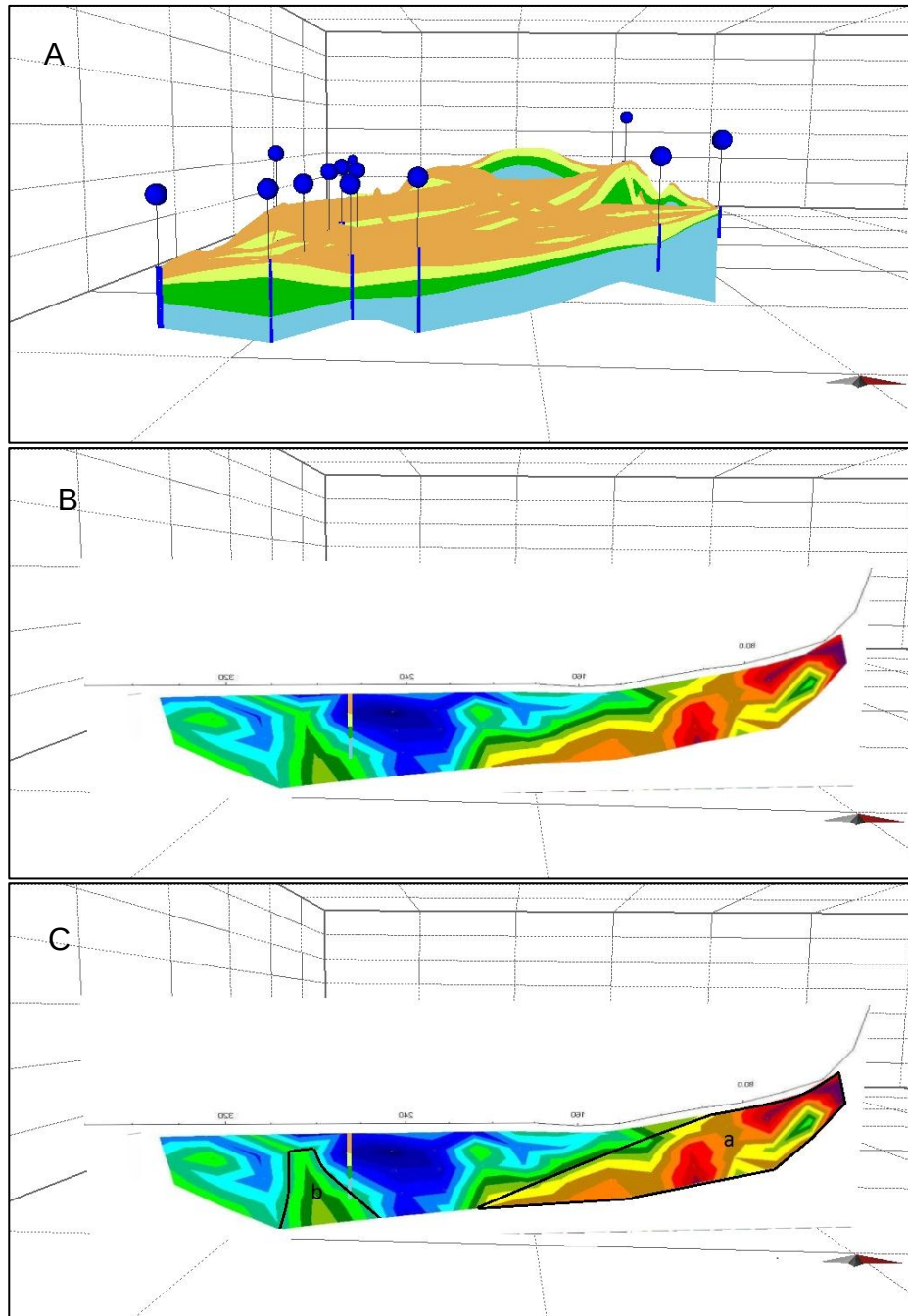


Figura 29: (A) Seções interpretadas no segmento de desemboque do túnel de adução. (B) seção geofísica correspondente a mesma região. (C) Seção geofísica com detalhe para os polígonos a e b.

Em outro segmento das seções interpretadas, uma diferente seção geofísica foi interpretada, e sua localização pode ser visualizada na figura 30. Os maiores valores de resistividade, representando o maciço rochoso na cor vermelha na seção, estão situados na base da seção geofísica, e as cores mais frias, como azul, por exemplo, representam os horizontes de solo, com presença de água devido à baixa resistividade representada na região.

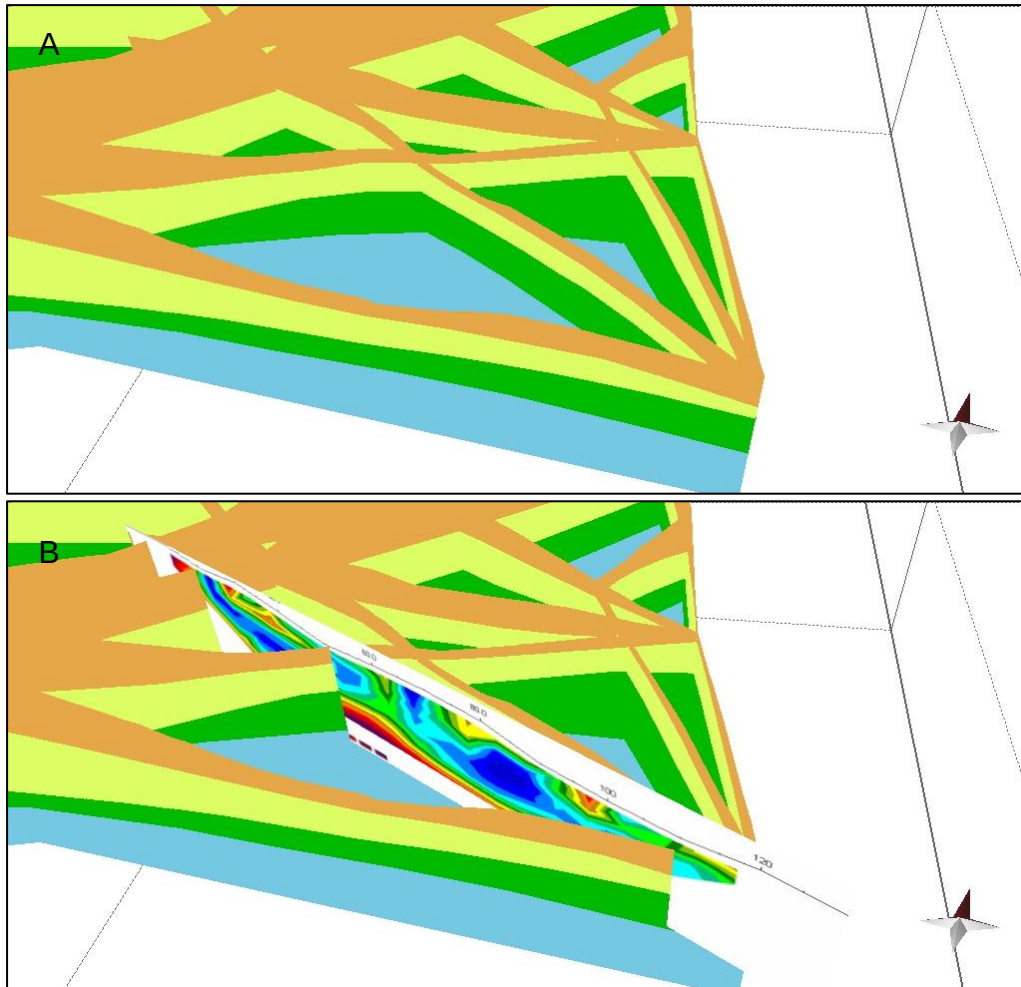


Figura 30: (A) Seção interpretada. (B) Seção geofísica correspondente a mesma região.

Na figura 31, outra seção geofísica é interpretada. Neste caso, os valores médios de resistividade (de 1.550 a 10.000 ohm/m) são representativos de horizontes de solos nas cores mais frias, como azul, e de saprólito (solo residual) em verde na seção.

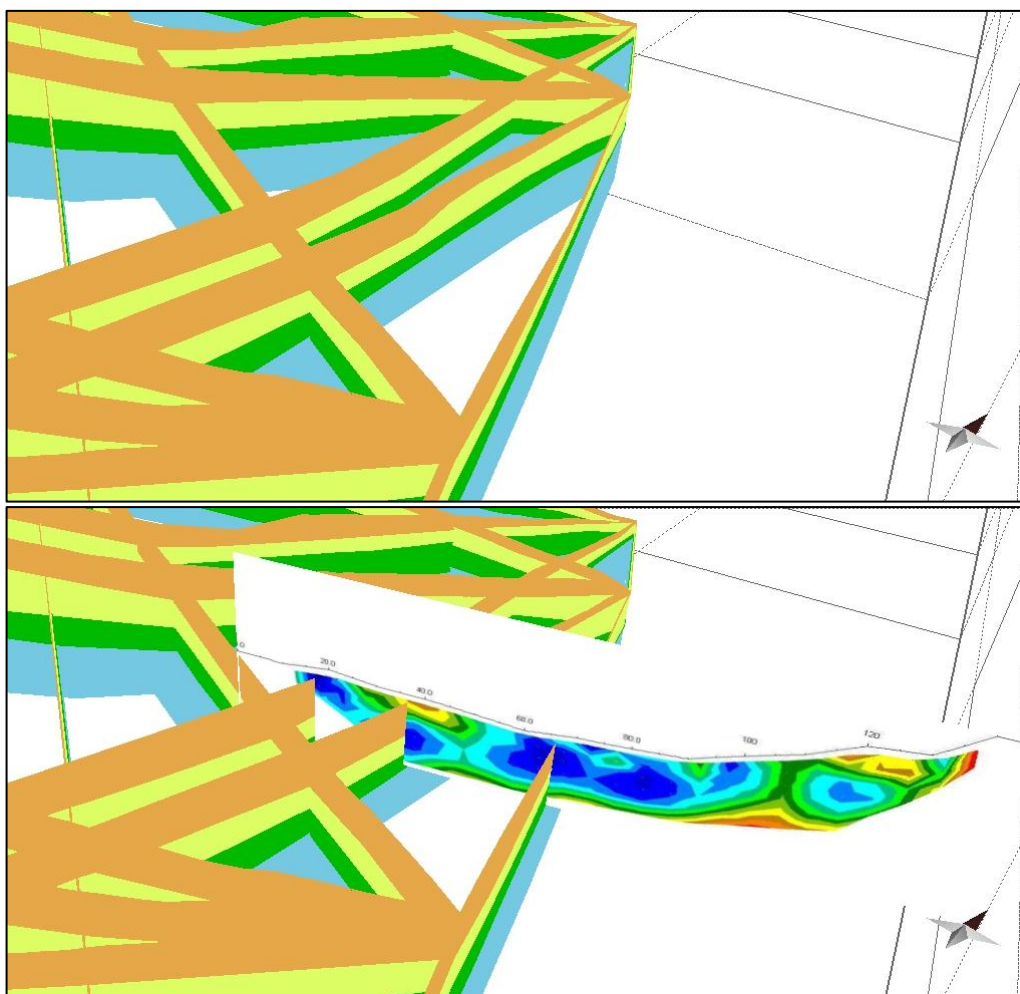


Figura 31: (A) Seções interpretadas. (B) Seção geofísica cruzada nas seções interpretadas.

As diferenças nas espessuras das seções geofísicas comparadas às seções interpretadas, nas figuras 29, 30 e 31, está relacionado à diferença de escala utilizada na confecção da figura.

Esta interpolação das seções entre sondagens com as seções geofísicas, serviu como parâmetro para consolidar os horizontes interpretados no modelo geológico. Os valores de resistividade delimitam, principalmente, os horizontes de solo, saprólito e topo rochoso, e a integração com o modelo 3D confirma os horizontes interpretados.

Do ponto de vista de análise estrutural, o mapeamento geológico realizado no interior do túnel, identificou como feição mais marcante, a foliação com direção N68W/89NE com direção subparalela ao eixo do túnel e mergulho verticalizado. Na região do desemboque ocorre um foliação marcante, de atitude N40W/89SW com direção oblíqua ao eixo do túnel de adução. No interior do túnel, em meio aos

gnaisses, ocorre uma alternância de camadas de espessura centimétrica compostas de acumulações de biotita, denominados biotititos. Geralmente, a direção dos níveis com biotitito é subparalela a foliação gnáissica, por vezes um desvio na direção (N75W/70NE ; N69W/70NE) ocasiona um pequeno espessamento da camada de gnaisse.



Figura 32: Alternância das camadas de gnaisses com níveis de biotitito.



Figura 33: Detalhe para a camada de biotitito

O fraturamento na região é brando, em famílias de fraturas com alto ângulo de mergulho e uma família dispersa com baixo ângulo de mergulho até sub-

horizontal. As falhas foram identificadas no leito do rio Guanhões, e a presença de *steps* indicam movimentação cinemática oblíqua reversa transcorrente sinistral. O diagrama de tensores indica compressões na direção NW/SE.

As atitudes das foliações, em geral, são de alto ângulo de mergulho e com direções subparalelas ao eixo do túnel de adução. Estas atitudes de foliação e fraturamento foram plotadas no *software* MOVE, em detalhe para a região de desemboque do túnel na figura 34. Os diagramas de roseta ilustrados pelas figuras 35, 36 e 37 mostram a direção preferencial das atitudes das foliações e fraturas.

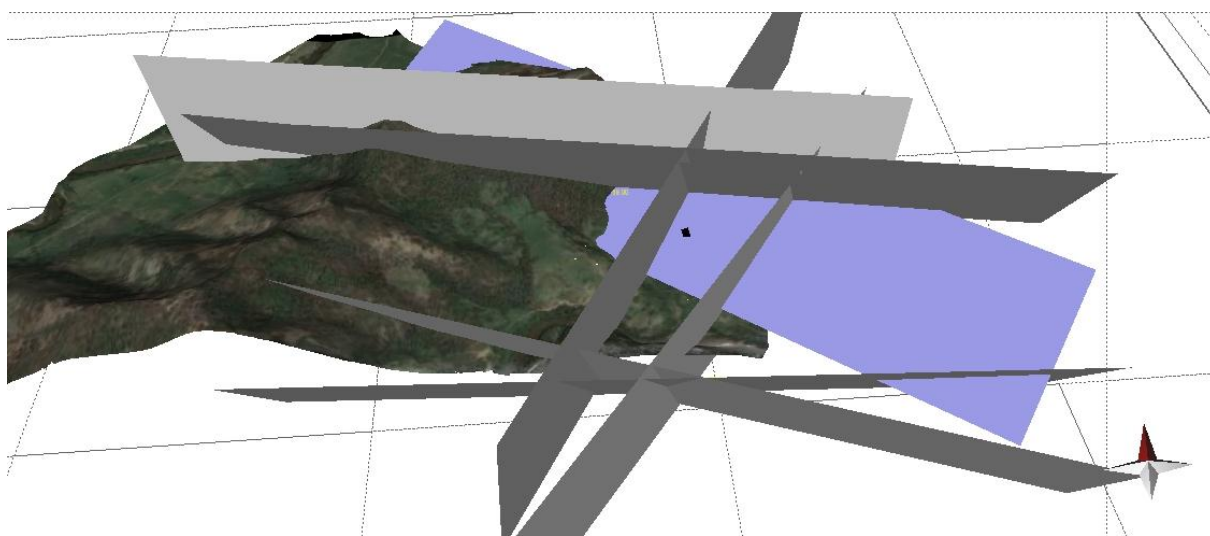


Figura 34: Atitudes de fraturas representadas no MOVE

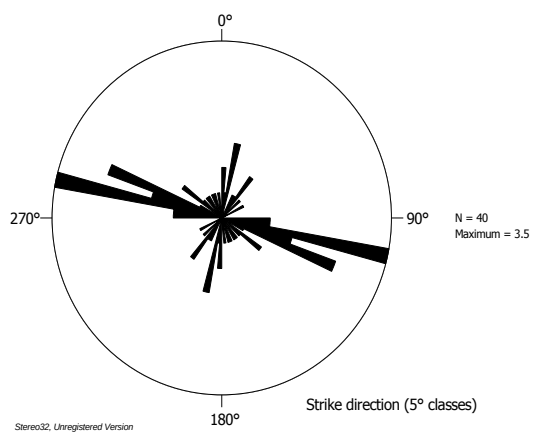


Figura 35: Dados de atitudes gerais (foliação, fraturas e bandamento)

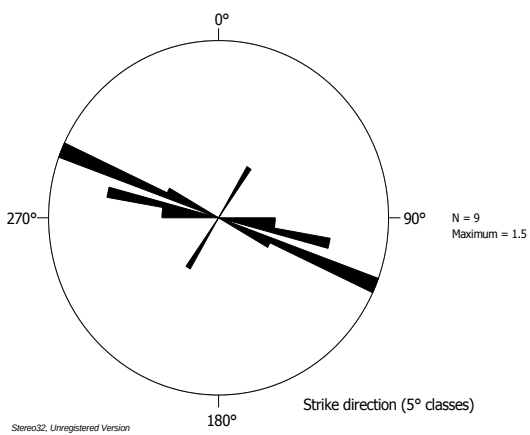


Figura 36: Atitudes de foliação

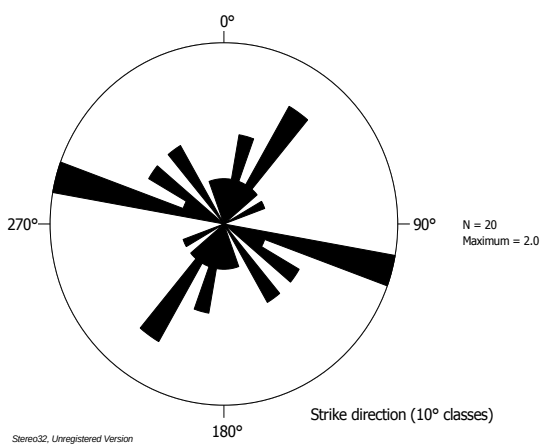


Figura 37: Atitudes de fraturas

A relação dos dados estruturais com a interpretação de seção geofísica pode ser visualizada na Figura 38, na qual um plano de descontinuidade intercepta a seção. Nessa região, o plano de descontinuidade está cruzando uma região em que há uma variação nos valores de resistividade. Os valores mais baixos de resistividade, representados pela cor marrom claro, amarela e verde, indicam a presença de um fator geológico que influenciou em uma leitura diferenciada nesta região interpretada como maciço rochoso. Tal fator é interpretado como a presença de fraturamento ou nesse caso, bandamento subvertical, associado a camadas ricas em biotita (figura 33), e identificadas em mapeamento de campo. Tal região apresenta um risco geológico, pois o preenchimento por biotita, um mineral de hábito micáceo, ou seja, superfícies em forma de folhas, apresentam tendência maior a deslocamento ou deslizamento da superfície. Esse caso de instabilidade pode ser evitado com a cobertura da superfície com concreto projetado e limalha de ferro, não somente na região de emboque, como em todas as outras porções na extensão total do túnel de adução.

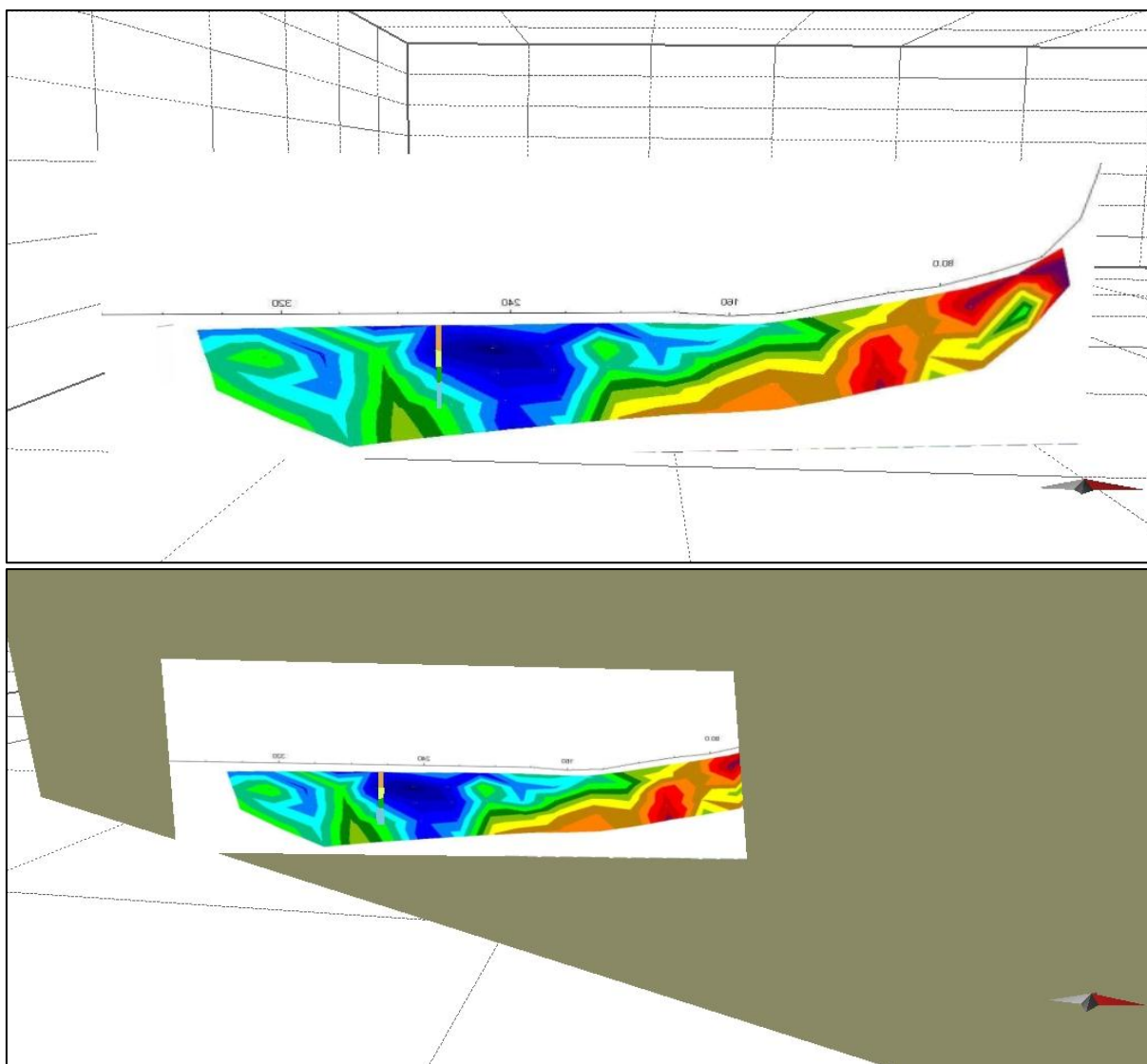


Figura 38: Interpolação de seção geofísica com plano de camada composta por biotita.

A análise de estabilidade de taludes foi realizada na região de desemboque do túnel de adução, visando uma proposta de estabilidade

A partir da plotagem dos planos de descontinuidades em um diagrama estereográfico de igual área, a análise de estabilidade de blocos contidos no talude rochoso foi feita a partir da relação dos rumos de mergulho dos planos com a direção da vertente exposta e o ângulo de atrito interno da rocha. Ao total são 10 planos de descontinuidades, ilustrados na figura 39.

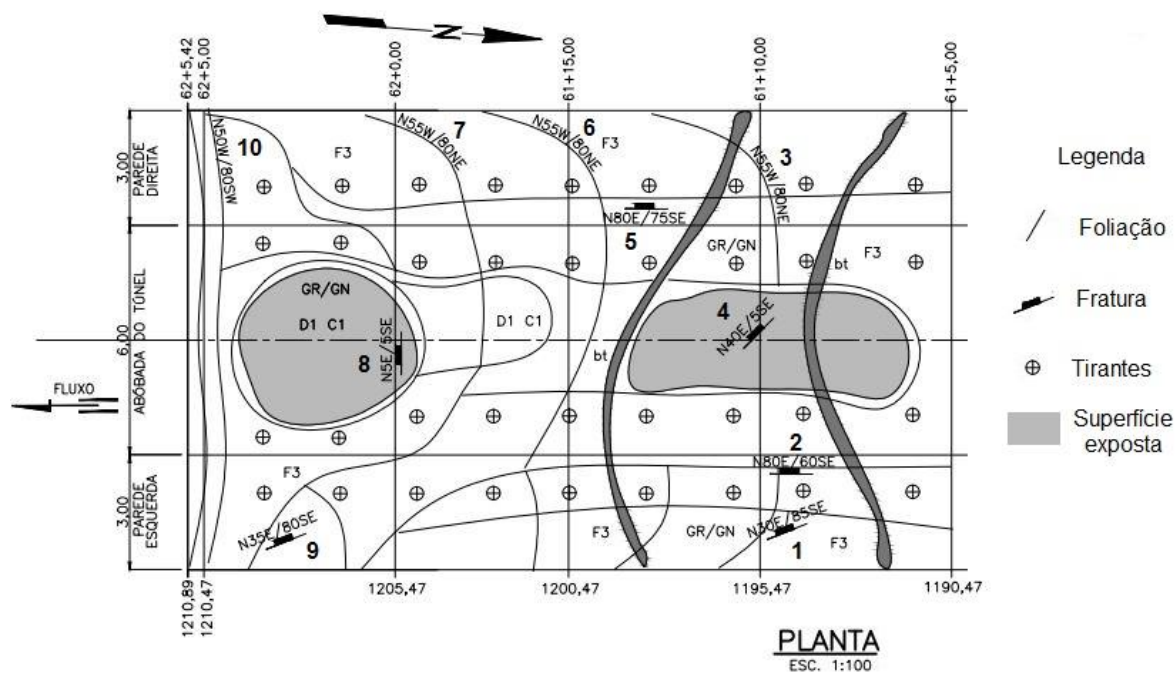


Figura 39: Vista em planta do croqui do desemboque do túnel de adução, na escala 1:100.

O ângulo de atrito interno de um determinado maciço rochoso é determinado de acordo com o litotipo característico. A tabela 3 mostra valores de ângulo de atrito interno para diferentes tipos de rocha, proposto por Hoek, (1972 citado por Pinotti & Carneiro, 2013). De acordo com estas propostas, assume-se neste trabalho um ângulo de atrito médio de 53° , pois o contexto geológico local é de granito gnaisses pertencentes à Suíte Borrachudos. A atitude da vertente, ou seja, a superfície livre gerada pela abertura do túnel, é assumida como N6W com mergulho vertical (90°) nas paredes do túnel, e com mergulho de 45° na parte superior da abóboda do túnel.

Tabela 3: Valores de atrito para rochas de acordo com sua estruturação (Hoek, 1972 extraído de Pinotti & Carneiro, 2013).

Tipo de Rocha	Ângulo de Atrito interno (graus)		
	Intacta	Junta	Residual
Andesito	45	31-35	28-30
Basalto	48-50	47	-
Gesso	-	35-41	-
Diorito	53-55	-	-
Granito	50-64	-	31-33
Grauvaca	45-50	-	-
Calcário	30-60	-	33-37
Monzonito	48-65	-	28-32
Pórfiro	-	40	30-34
Quartzito	64	44	26-34
Arenito	45-50	27-38	25-34
Xisto	26-70	-	-
Folhelho	45-64	37	27-32
Siltito	50	43	-
Ardósia	45-60	-	24-34

A partir das atitudes mostradas no croqui da figura 39, o estudo de estabilidade de taludes em escavações foi realizado analisando as diferentes atitudes de descontinuidades, em relação ao plano da vertente e ao ângulo de atrito interno do maciço.

Analisando a descontinuidade de número 3 (N55W/80NE) e 5 (N80E/75SE), o ponto de intersecção dessas duas superfícies está situado na região de instabilidade (preenchida em cinza na figura 40) do segmento oeste do túnel, conferindo um escorregamento em cunha para esta região.

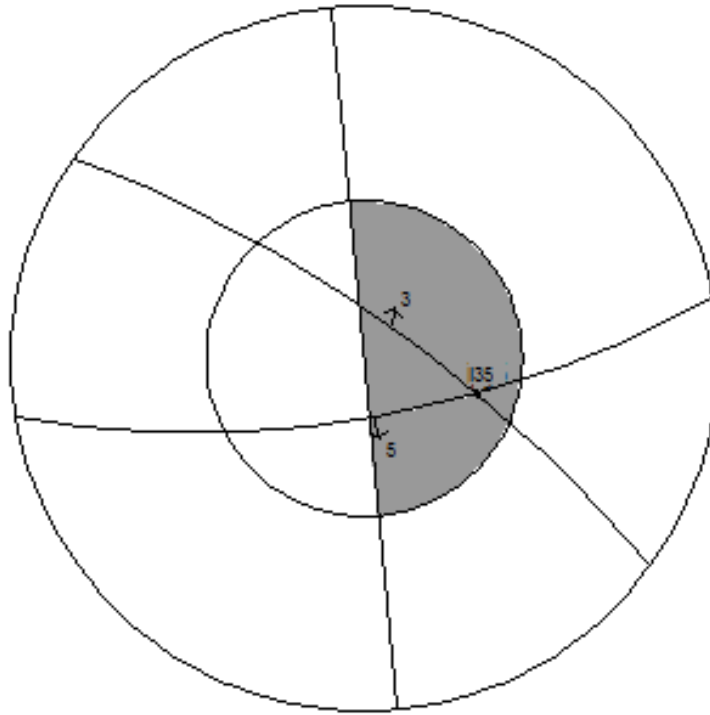


Figura 40: Diagrama estereográfico com planos, rumos de mergulho, direção da vertente e cone de atrito interno. A região em cinza é a região de instabilidade do talude, com deslizamento em cunha dos planos 3 e 5.

Após a plotagem da atitude número 7 (N55W/80NE) e 10 (N50W/80SW) no diagrama estereográfico representado na figura 41, a tendência de deslizamento do tipo planar para nordeste do plano 7 é confirmada, pois o rumo de mergulho de tal plano está situado na região de instabilidade. Já o plano 10 (N50W/80SW) está estável nestas condições, pois o rumo de mergulho localiza-se fora da região de instabilidade.

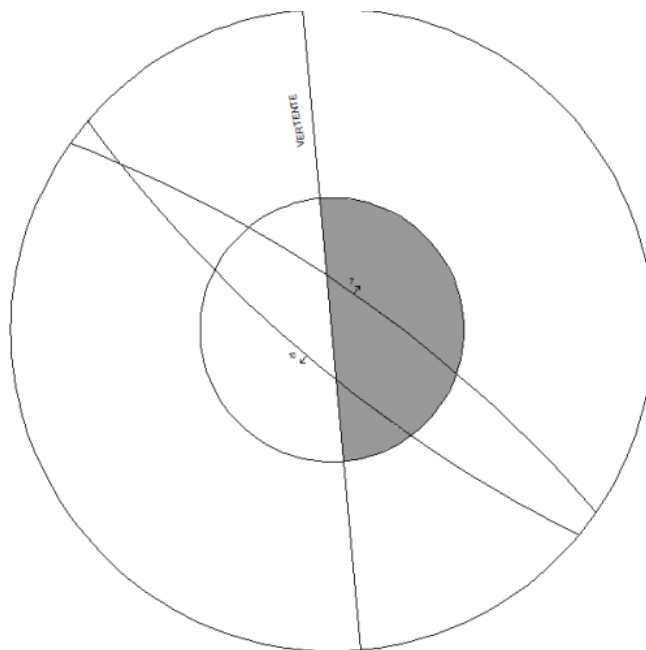


Figura 41: Diagrama estereográfico com planos, rumos de mergulho, direção da vertente e cone de atrito interno. A região em cinza é a região de instabilidade do talude, com deslizamento planar do plano 7.

Como o valor de ângulo de atrito aqui considerado é um valor médio, tal valor pode variar para mais ou para menos. De acordo com essa variação, uma vertente pode estar sujeita a mais de algum tipo de deslizamento das superfícies de descontinuidades. Exemplo disso, é o caso dos planos de atitude número 1 (N30E/85SE) e 2 (N80E/85SE), nos quais é assumido o valor médio de ângulo de atrito de 53° . Nessa situação, ocorrerá o deslizamento planar para sudeste do plano 1, e o plano 2 está próximo da limitante da região instável do diagrama (figura 42). Se o valor do ângulo de atrito interno diminuir a 45° , por exemplo, ocorrerá deslizamento em cunha dos plano 1 e 2, já que a intersecção dos planos 1 e 2 (i_{12}) estará totalmente dentro da região de instabilidade da porção leste de túnel de adução, pois o desenho do cone de atrito no diagrama se apresentará com maior diâmetro (figura 43).

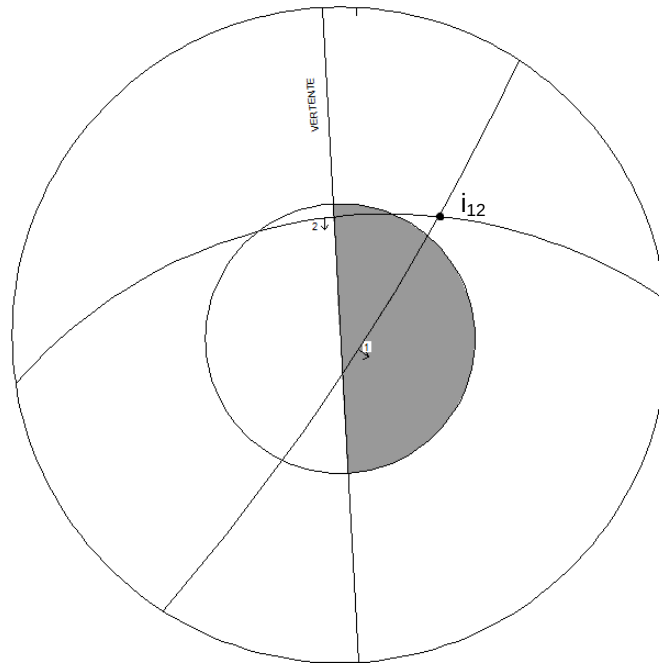


Figura 42: Diagrama estereográfico com planos, rumos de mergulho, direção da vertente e cone de atrito interno. A região em cinza é a região de instabilidade do talude, com deslizamento planar do plano 1. Se o valor do ângulo de atrito interno for de 50° ocorrerá deslizamento em cunha da vertente.

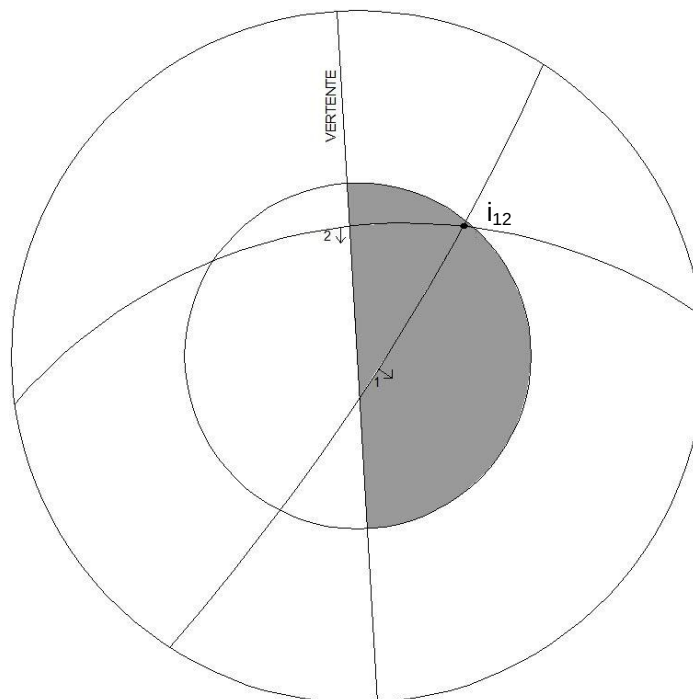


Figura 43: Diagrama estereográfico com valor de ângulo de atrito interno de 45° . Nessa situação, ocorrerá deslizamento em cunha das superfícies 1 e 2.

Considerando as atitudes número 2 (N803/60SE), 3 (N55W/80NE) e a superfície sub-horizontal do teto da escavação (destacado em vermelho no

diagrama da figura 44), a cunha gerada a partir dos três planos delimita a região de instabilidade para desprendimento de blocos em tetos de escavações. Para que ocorra a queda dos blocos, é necessário que o centro do diagrama estereográfico esteja na cunha de instabilidade, como pode ser observado na figura 44.

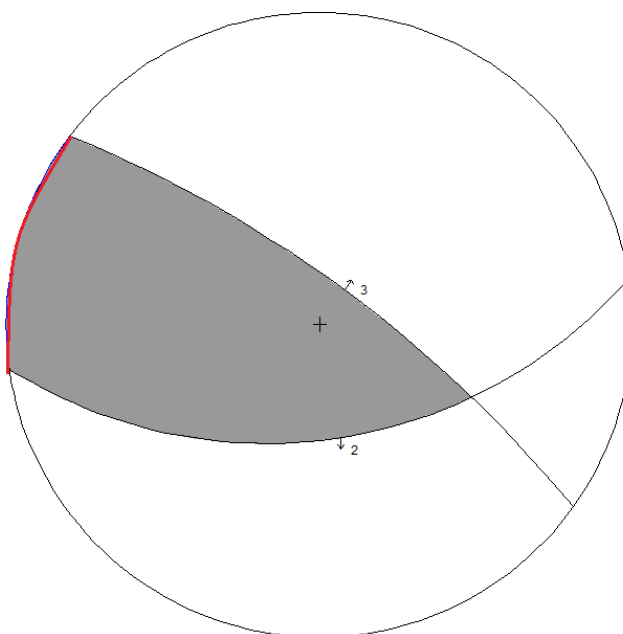


Figura 44: A região em cinza simboliza a cunha de instabilidade de blocos em tetos de escavações.

A presença de uma foliação sub-horizontal ao teto da escavação pode ser observada no modelo de fraturas gerado no MOVE (figura 45).

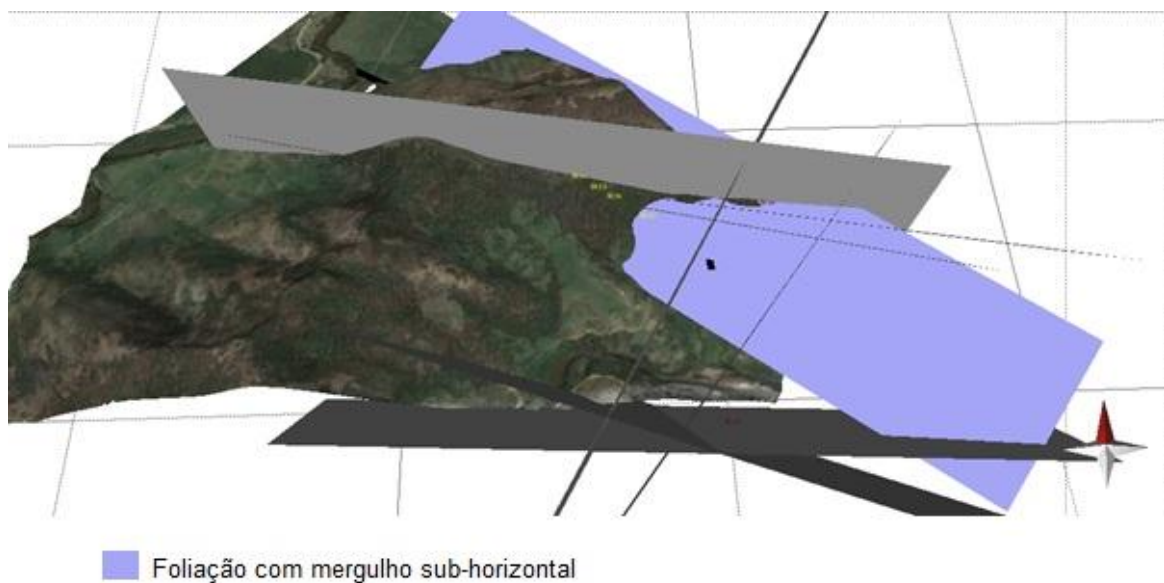


Figura 45: Modelo de fraturas, evidenciando em azul claro a foliação sub-horizontal paralela ao teto da escavação.

Os diagramas analisados com enfoque na estabilização de taludes indicam deslizamento tipo planar e em cunha ou queda de blocos ou superfícies de descontinuidades no interior do desemboque do túnel de adução. Para prevenção de acidentes, é necessário o revestimento do maciço com concreto projetado e limalha de ferro. Esse tipo de revestimento já foi realizado em algumas seções na projeção túnel, em especial nas faces livres de vertente que apresentam camadas de biotitito, devido ao maior risco de deslizamentos nessas seções.

5. CONCLUSÕES

O modelo 3D gerado para a região de desemboque do túnel de adução a PCH Dorés de Guanhães, localizada no estado de Minas Geraí – BR, enfatiza a interpretação e delimitação dos horizontes de colúvio, solo, saprólito e topo do maciço rochoso. Nesta região, levando em conta os horizontes de solo interpretados a espessura deste pacote é bastante significativa, na ordem de centenas de metros, podendo aumentar o fator de riscos de deslizamento de horizontes de solos e acidentes na abertura do túnel.

A análise de seções geofísicas integradas as seções interpretadas, serviu de parâmetro adicional para a delimitação dos horizontes interpretados. Os valores de resistividade serviram para delimitar as camadas de rocha alterada (saprólito) e o maciço rochoso.

Com base na integração do modelo 3D gerado, com as seções geofísicas e as fraturas representadas, é possível visualizar regiões com descontinuidades geológicas que podem interferir na estabilidade do pacote de solo e maciço rochoso. A presença de camadas ricas em biotita (denominadas de biotitito) é um fator de risco adicional, pois são superfícies nas quais o deslizamento ou deslocamento da superfície apresentam maior tendência de ocorrência. Nessas situações, é indicado o revestimento com concreto projetado e limalha de ferro.

No âmbito de estabilidade de taludes, a análise de diagramas estruturais com relação aos planos de descontinuidades, plano da vertente exposta e ângulo de atrito interno da rocha, mostrou que todas as propostas demonstradas apresentam risco de deslizamentos em determinados segmentos do interior da região de desemboque do túnel de adução. Nesse estudo, ocorrerá deslizamento em cunha a partir das descontinuidades 3 e 5, na parede oeste da escavação, assim como deslizamento planar da superfície 7. Na parede leste exposta da escavação, ocorrerá deslizamento planar da superfície 1, além do desprendimento de blocos no teto da escavação. Para a prevenção de algum acidente, revestimentos com concreto projetado já foram realizados pela empresa operante na obra.

A realização de uma modelagem geológica-geotécnica em áreas de construção de barragens mostra uma alternativa eficaz para quantificação e

qualificação dos substratos do terreno, tanto com ênfase nos horizontes pedológicos como na delimitação de áreas de instabilidade no maciço rochoso. É uma ferramenta que aponta locais a serem monitorados no projeto de construção, conferindo um incremento na segurança da barragem.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE (1998) Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Geologia de Engenharia**. Editores: Antonio Manoel dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves Brito. 1ª edição. FAPESP- CNPq, São Paulo, p. 587.

BARTON, N. **Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunel design**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39 (2002) 185-216.

BASTOS, M.J.N. **A geotecnia na concepção , projeto e execução de túneis em maciços rochosos**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Instituto Superior Técnico , Universidade Técnica de Lisboa, 1998. Disponível em: <http://www.visaconsultores.com/pdf/Tese_MSc_MB.pdf> Acesso em 20/04/2014.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering rock mass classification**. New York: John Wiley, 1989, 251p.

BAZANTE, A.J.; LIMA, A.A; ALCÂNTARA, M.E.; OLIVEIRA, N.V. 1999. **Utilização do critério de ruptura Hoek-Brown em mecânica de rocha**. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, São Paulo.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos . **Definição e notação de horizontes e camadas do solo**. 2.ed. rev. Atual, Rio de Janeiro, 1988. 54p. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/sibcs/atas/ata05.html>> Acesso em 05/05/2014

GOMES DA SILVA, A.M.G. **Condicionantes geológicos-geotécnicos de escavação grampeada em solo residual de gnaiss**. 126 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://wwwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2006/Teses/SILVA_AMBG_06_t_M_geo.pdf> Acesso em 15/04/2014

FIORI, A.P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes**. 2. ed. rev. e ampl. Curitiba; São Paulo: Ed. UFPR: Oficina de Textos, 2009. 602p.

HOEK, E.; KAISER, P.K.; BAWDEN, W.F. **Support of underground excavations in hard rock**. Third print Rotterdam, Balkema, 1998. 215p.

JORGE DA SILVA, J. C. B. 2006. **Solos grampeados – comprimentos máximos de grampos nos solos a leste da falha de Salvador**. *Sitientibus*, Feira de Santana, n.35, p.57-74. Disponível em :

<http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/35/solos_grampeados.pdf>. Acesso em: 20/05/2014.

KOCHEN, R. **Gerenciamento de riscos em obras subterrâneas de engenharia**. Revista Engenharia 2009 – 595. Disponível em: <www.brasilengenharia.com.br> Acesso em 05/05/2014).

MOREIRA FILHO, R.D. **Os condicionantes geológico-geotécnicos em obra de usinas hidrelétricas – O caso do aproveitamento hidrelétrico queimado**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto- Escola de Minas, 2003.

NETO, F.R.; KOCHEN, R. **Segurança, ruptura e colapso de túneis urbanos em NATM**. Revista Engenharia 2000, p55-62. Disponível em: <http://geocompany.com.br/es/esp_ftp/Artigo8.pdf> Acesso em 15/04/2014.

MAPA DE SOLOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. 2010. Universidade Federal de Viçosa: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; Universidade Federal de Lavras: Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente.

NOCE, C.M.; SOARES A.C.P.; SILVA, L.C. & Alkimim, F.F. 2007. **O embasamento Arqueano e Paleoproterozóico do Orógeno Araçuaí**. In: *Geonomos* 15(1): 17-23.

PERES, G.G.; ALKIMIM, F.F.; JORDT-EVANGELISTA, H. **The southern Araçuaí belt and Dom Silvério Group: geologic architecture and tectonic significance**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Ouro Preto, v. 76, n. 4, p.771-790, 01 jan. 2014.

PINOTTI, A. M.; CARNEIRO, C. dal Ré. **Geologia estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no granito Santos**. Terrae Didática, Campinas, v. 9, n. 2, p.132-168, 2013. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v9_2/PDF92/Td93-Celso.pdf>. Acesso em: 27 out. 2014.