UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Yan Budni de Souza Costa

Modelagem Estrutural e Compartimentação Geomecânica de um Túnel em Maciço Rochoso no Município de São José - SC.

Florianópolis
2024

Yan Budni de Souza Costa

Modelagem Estrutural e Compartimentação Geomecânica de um Túnel em Maciço Rochoso no Município de São José - SC.

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Geologia do Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia
Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Costa, Yan Budni de Souza
Modelagem Estrutural e Compartimentação Geomecânica de um Túnel em Maciço Rochoso no Município de São José - SC/Yan Budni de Souza Costa ; orientador, Murilo da Silva Espíndola, 2024.
91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia. 3. Túneis. 4. Classificação Geomecânica. 5. Modelagem 3D. I. Espíndola, Murilo da Silva. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Geologia. III. Título.

Yan Budni de Souza Costa

Modelagem Estrutural e Compartimentação Geomecânica de um Túnel em Maciço Rochoso no Município de São José - SC.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Geologia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Geologia.

Florianópolis, 29 de Novembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
Roberto Sacks de Campos
Data: 25/02/2025 18:04:43-0300
CPF: ***.831.440-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Prof. Roberto Sacks de Campos, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação e Geologia

Banca examinadora

Documento assinado digitalmente
Murilo da Silva Espindola
Data: 20/02/2025 16:56:15-0300
CPF: ***.661.899-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Prof. Dr. Murilo da Silva Espídola

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
Orlando Martini de Oliveira
Data: 18/02/2025 09:46:34-0300
CPF: ***.331.084-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira

Universidade Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
BRUNO OSMAR GONZATTO
Data: 18/02/2025 22:15:12-0300
CPF: ***.928.609-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Bruno Osmar Gonzatto, MSc.

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Suzana, por absolutamente tudo.

Ao meu orientador, professor Murilo, por todos os ensinamentos, amparo e por sempre me encorajar à busca ao conhecimento.

Aos meus colegas do Laboratório de Geotecnia Aplicada, Guilherme, Bruno, Mateus, Nilo, Ariel, e Jeff, por fazerem parte de um ambiente tão formativo.

Aos meus colegas do Contorno Viário, Otto, André, Luiz, Renata, Pablo, Júnior, Cassio e Guilherme, por me ensinarem tanto sobre túneis e engenharia civil.

A todos os meus colegas da turma 2018 de Geologia, por compartilharem tantos momentos em sala de aula e em campo.

Aos meus amigos, Felipe, Arthur e João, por serem meus irmãos.

Aos parceiros de banda, Vitor e Roberto, por todas as horas sem ver o tempo passar.

Ao Louis Cole, por sua música.

Ao departamento de Geologia da UFSC e seu corpo docente, por proporcionar um espaço de aprendizado fundamental para a minha formação.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de trilhar minha carreira.

À Construtora Aterpa, pela oportunidade de trabalhar numa obra tão importante, e pela disponibilização dos dados necessários para realização deste TCC.

À Seequent, por generosamente disponibilizar a licença para o LeapFrog Works.

RESUMO

O comportamento geomecânico de túneis em rocha é fortemente influenciado pelas estruturas geológicas (descontinuidades) presentes no maciço. Do ponto de vista geométrico, estas estruturas são caracterizadas por parâmetros que descrevem suas orientações, frequências e persistências. Durante a construção de uma obra de engenharia subterrânea, como um túnel, a análise das condições geológicas é imprescindível, para isso, é normatizado o acompanhamento de um geólogo/engenheiro geotécnico, e produção de mapeamentos de frente que proporcionam estimativas das condições do maciço. Entretanto, muitas vezes os dados de cunho geológico são visualizados em projetos como modelos em duas dimensões, tanto em planta quanto em seção transversal. Apesar de serem suficientes para mostrar uma visão geral da qualidade do maciço, acabam não representado da maneira mais visualmente fidedigna as condições reais das descontinuidades. Desta forma, este trabalho propõe-se a criar um modelo 3D da geologia estrutural local e compartimentar a escavação em parâmetros geológicos-geotécnicos do maciço rochoso do Túnel 4, presente no Contorno Rodoviário de Florianópolis, baseado na classificação *Rock Mass Rating*. Para isso, foram utilizados os dados sobre o projeto e os mapeamentos de frente de escavação realizados durante a execução da obra, fornecidos por uma das empresas envolvidas na construção, aliados a pesquisa bibliográfica. A obra situa-se na divisa entre os municípios de São José e Biguaçu, em um maciço rochoso constituído por gnaisses migmatíticos do Complexo Águas Mornas, mais especificamente em uma região de contato com o Granito São Pedro de Alcântara, pertencente à Suíte Intrusiva Maruim. As medidas estruturais foram analisadas por meio de estereogramas, revelando a predominância de três famílias de descontinuidades principais presentes no maciço. Foram compilados os dados de 604 mapeamentos, permitindo a compartimentação de toda a escavação com base nos parâmetros individuais do *Rock Mass Rating*. Por se tratar de uma análise feita também em ambiente 3D, foi possibilitada uma melhor visualização das pontuações e da classificação do maciço em escala e presente no contexto geomorfológico e topográfico. Foram realizadas análises estatísticas e estruturais com base nestes parâmetros e na setorização por classes geomecânicas. Assim, os produtos gerados foram capazes de promover melhor entendimento do maciço rochoso por meio da integração de todos os parâmetros pertinentes ao modelo geológico-geotécnicos em uma única interface.

Palavras-chave: classificação geomecânica; *Rock Mass Rating*; análise estereográfica; Complexo Águas Mornas; Granito São Pedro de Alcântara.

ABSTRACT

The geomechanical behavior of rock tunnels is strongly influenced by the geological structures (discontinuities) present in the rock mass. From a geometric standpoint, these structures are characterized by parameters describing their orientation, frequency, and continuity. During the construction of an underground engineering project, such as a tunnel, geological condition analysis is essential. For this purpose, geological/geotechnical surveying is standardized, encompassing the mapping of the tunnel face and providing estimates of the rock mass conditions. However, geological data are often visualized in projects as two-dimensional models, both in plan and cross-section. While sufficient for providing an overview of rock mass quality, it is not always represented in a way that is visually faithful to actual condition of such structures. Therefore, this study proposes the creation of a 3D model of the local structural geology and compartmentalization of the excavation based on geological-geotechnical parameters of the rock mass in "Túnel 4", located in the "Contorno Rodoviário de Florianópolis", using the Rock Mass Rating classification. For this purpose, data on the project and excavation face mappings carried out during construction, provided by one of the companies involved in the project, were used in conjunction with academic research. The project is situated on the border between the municipalities of São José and Biguaçu, in a rock mass composed of migmatitic gneiss from the Águas Mornas Complex, specifically in a region of contact with the São Pedro de Alcântara Granite, part of the Maruim Intrusive Suite. Structural measurements were analyzed through stereonets, revealing the predominance of three main discontinuity sets within the rock mass. Data from 604 tunnel face mappings were compiled, enabling the compartmentalization of the entire excavation based on individual parameters. Since this analysis was also conducted in a 3D environment, it allowed for improved visualization of RMR scores and rock mass classification in scale and in its geomorphological and topographical context. Statistical and structural analyses were performed based on these parameters and the segmentation by geomechanical classes. Thus, the generated products were able to promote a better understanding of the rock mass through the integration of all relevant parameters to the geological-geotechnical model into a single interface.

Keywords: geomechanical classification; Rock Mass Rating; stereographic analysis; Águas Mornas Complex; São Pedro de Alcântara Granite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito da escala de observação em maciços rochosos, de rocha intacta até maciço fraturado. 20

Figura 2 – Bloco diagrama ilustrativo para diferenciação entre juntas persistentes e não persistentes. 21

Figura 3 – Classificação sugerida para a caracterização da rugosidade das descontinuidades. 22

Figura 4 – Exemplo esquemático do método de cálculo do RQD. 23

Figura 5 – Exemplo de representação de um talude com descontinuidades utilizando projeção estereográfica, indicando as atitudes dos planos. 27

Figura 6 – Método de projeção estereográfica para feições planares. A: identificação a atitude do plano; B: representação em mapa do plano medido; C: intersecção do plano projetado no círculo primitivo; D: plano representado na rede estereográfica. 28

Figura 7 – Representação de estruturas planares em estereograma na forma de polos e contornos de densidade. 29

Figura 8 – Esquema de modelagem implícita com criação de isosuperfícies e atribuição de valores para domínios geológicos. 30

Figura 9 – Cinturão Dom Feliciano no estado de Santa Catarina. 32

Figura 10 – Mapa de localização da área de estudo. 35

Figura 11 – Dimensões aproximadas da seção transversal do túnel. 36

Figura 12 – Desenho em planta do Túnel 4. 36

Figura 13 – Modelo Digital de Elevação mostrando a geomorfologia da região de estudo. 37

Figura 14 – Mapa Geológico da área de estudo. 38

Figura 15 – Testemunhos obtidos das sondagens realizadas na área de estudo. Diabásio e granito (A); Granito (B); Migmatito (C); Veio pegmatítico em granito (D). 39

Figura 16 – Fluxograma dos processos executados e produtos gerados a partir da construção deste trabalho. 41

Figura 17 – Exemplo de como os intervalos foram delimitados, alocando uma cor para cada pontuação. 44

Figura 18 – Mapa da região de São José com MDT em relevo sombreado (iluminação artificial N315 à 45º) com as principais famílias de lineamentos traçadas. 47

Figura 19 – Diagrama de roseta mostrando a distribuição das principais direções dos lineamentos traçados na região. 48
Figura 20 – Diagrama de roseta incluindo apenas os lineamentos até 1,5 km da localização do Túnel 4. 49
Figura 21 – Estereograma com contornos de densidade dos polos dos planos das medidas, gerado no DIPS, mostrando as famílias de descontinuidades presentes no maciço e as três famílias delimitadas para a inserção no modelo. 50
Figura 22 – Planos médios das três famílias de descontinuidades definidas. F1, F2 e F3 em vermelho, azul e verde, respectivamente. 51
Figura 23 – Distribuição espacial das descontinuidades da família F1, vista em perspectiva do túnel. 53
Figura 24 – Distribuição espacial das descontinuidades da família F2, vista em perspectiva do túnel. 54
Figura 25 – Distribuição espacial das descontinuidades da família F3, vista em perspectiva do túnel. 55
Figura 26: Todos os parâmetros analisados e representados em 3D. Resistência da rocha (A); RQD (B); Espaçamento (C); Persistência (D); Abertura (E); Rugosidade (F); Preenchimento (G); Alteração (H); Fluxo d'água (I); Orientação das descontinuidades (J). 57
Figura 27 – Valores do parâmetro de Resistência da rocha intacta para cada um dos avanços do túnel. 59
Figura 28 – Valores do parâmetro de RQD para cada um dos avanços do túnel. 60
Figura 29 – Valores do parâmetro de Espaçamento para cada um dos avanços do túnel. 61
Figura 30 - Valores do parâmetro de Persistência para cada um dos avanços do túnel. 62
Figura 31 – Valores do parâmetro de Abertura para cada um dos avanços do túnel. 63
Figura 32 – Valores do parâmetro de Rugosidade para cada um dos avanços do túnel. 64
Figura 33 – Valores do parâmetro de Preenchimento para cada um dos avanços do túnel. 65
Figura 34 – Valores do parâmetro de Alteração para cada um dos avanços do túnel. 66

Figura 35 – Valores do parâmetro de Fluxo de Água para cada um dos avanços do túnel. 67

Figura 36 – Valores do parâmetro de ajuste à direção das descontinuidades para cada um dos avanços do túnel. 68

Figura 37 – Perfil longitudinal do Morro da Rússia, incluindo o traçado do Túnel 4, mostrando a diferença na topografia e cobertura do maciço entre os dois emboques. 70

Figura 38 – Compartimentação do túnel em parâmetros de Fluxo de Água (A) e Abertura (B), juntamente ao MDE e os lineamentos traçados (linhas brancas). 71

Figura 39 – Histograma mostrando a distribuição de valores RMR para o Túnel 4. . 73

Figura 40 – Compartimentação da escavação nas classes geomecânicas presentes em cada avanço. 74

Figura 41 – Compartimentação da escavação entre os valores RMR para cada avanço. 75

Figura 42 – Estereogramas contendo as estruturas medidas, separadas em Classe V (A), Classe IV (B), Classe III (C) e Classe II (D). 77

Figura 43 – Gráficos ilustrando o perfil de distribuição dos parâmetros de Resistência, RQD, Espaçamento, Persistência, Abertura e Rugosidade dentro de cada uma das 4 classes encontradas. O eixo y representa a porcentagem total dentro da classe e no eixo x estão distribuídos os valores de cada parâmetro. 79

Figura 44 – Gráficos ilustrando o perfil de distribuição dos parâmetros de Preenchimento, Alteração, Fluxo de Água e Favorabilidade das descontinuidades dentro de cada uma das 4 classes encontradas. 80

Figura 45 – Comparativo entre a compartimentação geomecânica real (A) e a prevista em projeto (B)para o Túnel 4. 82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Parâmetros de Classificação do RMR. 25

Quadro 2: Critério de avaliação da orientação das descontinuidades, usado como fator de correção para a nota final do RMR. Este em específico foi adaptado por Bieniawski para o uso em escavações subterrâneas. 26

Quadro 3: Classes do RMR correspondentes para os diferentes intervalos de pontuação final, e suas descrições em relação à qualidade. 26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Atitudes dos planos médios e tamanho amostral das principais famílias de descontinuidades definidas. 50

Tabela 2: Estatística geral dos valores RMR para todo o Túnel 4. 72

Tabela 3: Classes encontradas na escavação e seus comprimentos correspondentes, total e para as pistas individuais. 73

Tabela 4: Extensão de cada classe geomecânica prevista para o Túnel 4. 81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPRM – Serviço Geológico Brasileiro

ISRM – *International Society for Rock Mechanics*

MDT – Modelo Digital de Terreno

MDE – Modelo Digital de Elevação

PN – Pista Norte

PS – Pista Sul

RQD – *Rock Quality Designation*

RMR – *Rock Mass Rating*

UCS – *Uniaxial Compression Strength*

U-Pb – Urânio-Chumbo

LISTA DE GRANDEZAS

km – Quilômetro

m – Metro

Ma – Milhões de anos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 OBJETIVO GERAL 17

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

1.3 JUSTIFICATIVA 18

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

2.1 MACIÇOS ROCHOSOS 19

2.2 DESCONTINUIDADES 20

2.3 RQD 22

2.4 SISTEMA RMR 24

2.5 PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA 26

2.6 MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA 3D 29

2.6.1 Modelagem geológica 3D 29

3 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO 31

3.1 Batólito Florianópolis 31

3.2 Complexo Águas Mornas 32

3.3 Suíte Intrusiva Maruim 33

3.3.1 Granito São Pedro de Alcântara 33

3.3.2 Granodiorito Alto da Varginha 34

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E EMPREENDIMENTO DE ESTUDO . 35

4.1 O EMPREENDIMENTO 35

5 METODOLOGIA 41

5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 41

5.2 OBTENÇÃO DE DADOS 42

5.3 PROCESSAMENTO DE DADOS 43

5.4 CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO MODELO 44

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 47

6.1 ANÁLISE DE LINEAMENTOS 47
6.2 MODELO ESTRUTURAL 49
6.2.1 Caracterização das famílias de descontinuidades 49
6.2.2 Representação tridimensional 51
6.3 COMPARTIMENTAÇÃO GEOMECÂNICA 56
6.3.1 Resistência da rocha intacta 58
6.3.2 RQD 60
6.3.3 Espaçamento das descontinuidades 61
6.3.4 Persistência 62
6.3.5 Abertura 63
6.3.6 Rugosidade 64
6.3.7 Preenchimento 65
6.3.8 Alteração 66
6.3.9 Fluxo de Água 67
6.3.10 Favorabilidade da direção das descontinuidades 68
6.3.11 Condicionantes geológicos 69
6.4 ANÁLISE DA PONTUAÇÃO RMR E CLASSES GEOMECÂNICAS 72
6.4.1 Análise estrutural das classes geomecânicas 76
6.4.2 Distribuição dos valores dos parâmetros RMR nas classes geomecânicas 78
6.5 COMPARATIVO DE PROJETO 81
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES 83
7.1 CONCLUSÕES 83
7.2 SUGESTÕES 84
REFERÊNCIAS 86

1 INTRODUÇÃO

Com o expressivo aumento na necessidade de aproveitamento dos espaços subterrâneos, principalmente em metrópoles densamente ocupadas, a urbanização e expansão das cidades requerem a execução subterrânea das principais obras de infraestrutura, tais como obras para transporte de pessoas e materiais, instalações de redes de utilidades públicas, estocagem, entre outras, para assim minimizar a ocupação do espaço na superfície e reduzir o impacto físico, visual e ambiental durante a construção e operação dos sistemas instalados (Aguiar, 2017).

Um maciço rochoso é um meio rochoso *in situ* descontínuo formado por um conjunto de blocos de rocha justapostos, separados por descontinuidades (Hoek; Brown, 1980). Barton (1974) introduziu o sistema "Q", método para classificação de maciços rochosos amplamente utilizado em obras de engenharia, mineração e estabilização de taludes. Pouco tempo depois, Bieniawski (1989) propôs uma revisão de um de seus trabalhos antigos, trazendo uma versão nova de um sistema de classificação de maciços rochosos que prioriza a interpretação de um maciço como sendo uma assembleia de blocos intactos de rocha, separados por descontinuidades, o amplamente difundido *Rock Mass Rating*. Este sistema foca em agrupar propriedades relacionadas às descontinuidades e da rocha intacta em classes, afim de avaliar de forma mais assertiva e atribuir parâmetros de resistência para as diferentes zonas do maciço.

Este trabalho visa expor a classificação do maciço e disposição das descontinuidades e das condições geomecânicas presentes no maciço de um dos túneis no Contorno Viário de Florianópolis, localizado no município de São José, Santa Catarina. A região de estudo situa-se no embasamento ígneo neoproterozóico do Batólito Florianópolis. A obra em questão está localizada num maciço rochoso constituído por gnaisses migmatíticos do Complexo Águas Mornas, mais especificamente em uma região de contato com o Granito São Pedro de Alcântara, pertencente à Suíte Intrusiva Maruim.

1.1 OBJETIVO GERAL

Criar um modelo tridimensional coerente que permita visualizar as descontinuidades presentes na escavação, bem como compartimentá-la em unidades Geomecânicas com base nos parâmetros geotécnicos observados durante a construção do Túnel 4, presente no Contorno Viário de Florianópolis, localizado no município de São José, Santa Catarina.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- Verificar as tendências ou padrões nos dados estruturais coletados;
- Analisar e levantar a compartimentação das classes geomecânicas determinadas para os avanços do túnel, e comparar com as estimativas de projeto;
- Compartimentar a escavação nos parâmetros RMR;
- Averiguar a correlação entre o padrão estrutural das descontinuidades e a classificação do maciço.

1.3 JUSTIFICATIVA

Diante da crescente demanda por espaços subterrâneos e das limitações dos modelos bidimensionais, torna-se evidente a necessidade de aprimorar as metodologias de mapeamento e análise geológica em projetos de túneis e escavações.

Modelos tridimensionais oferecem uma solução mais precisa e detalhada, proporcionando uma melhor compreensão das condições geológicas e contribuindo para a inovação e aprimoramento das práticas de engenharia geotécnica. Portanto, este estudo se justifica pela necessidade de desenvolver métodos mais eficazes para o mapeamento e análise das condições geológicas em obras subterrâneas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais necessários para a realização do trabalho: maciços rochosos, descontinuidades, classificação de maciços, projeções estereográficas e modelos geológico-geotécnicos. Sem a intenção de realizar uma extensa revisão dos resultados e informações disponíveis na literatura, esta revisão tem apenas um caráter introdutório.

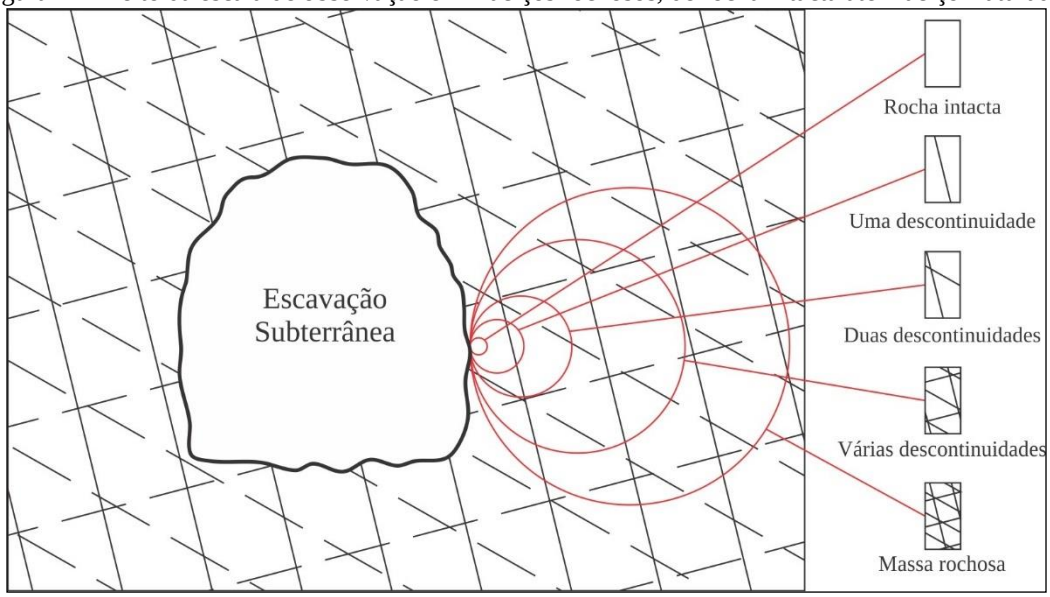
2.1 MACIÇOS ROCHOSOS

A fim de compreender o comportamento mecânico das rochas, se faz necessário primeiramente entender a diferença entre maciço rochoso e rocha intacta. Segundo Hoek e Brown (1980), um maciço rochoso é um meio rochoso *in situ* descontínuo formado por um conjunto de blocos de rocha justapostos, separados por descontinuidades. Já a rocha intacta é definida como um corpo rochoso sem a presença de descontinuidades significativas em sua trama.

Outro conceito muito importante referente à análise da natureza mecânica das rochas é o efeito da escala de trabalho. Quando analisando áreas e volumes pequenos (em escala milimétrica ou centimétrica, por exemplo), o comportamento mecânico do material em questão é mais aproximado ao da rocha intacta. Conforme a escala de observação é aumentada, maior é a influência das descontinuidades na análise, por tanto o comportamento mecânico da rocha passa a assemelhar-se ao de um maciço rochoso altamente fraturado (Figura 1).

Com a presença de descontinuidades, os maciços rochosos demonstram reduzida resistência e rigidez. Além disso, com o aumento da permeabilidade, a infiltração de água é facilitada e, por consequência, reduz o atrito entre os blocos e as tensões efetivas atuando no maciço. Logo, a estabilidade de um maciço rochoso é governada pelas propriedades físicas da rocha intacta aliada à facilidade ou tendência de desagregação entre os blocos, característica que é influenciada pelas dimensões dos blocos individuais e as condições de atrito ao longo das juntas que os separam (Sivakugan; Shukla; Das, 2013).

Figura 1 – Efeito da escala de observação em maciços rochosos, de rocha intacta até maciço fraturado.



Fonte: Goulart (2019) *apud* Hoek e Brown (1980).

2.2 DESCONTINUIDADES

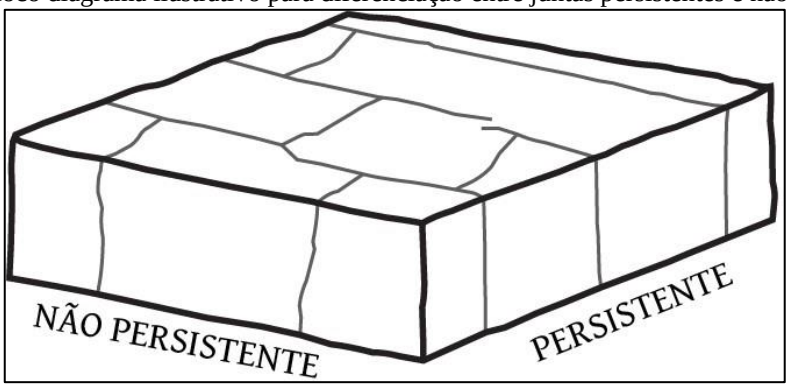
Descontinuidade é um termo abrangente que se refere às superfícies ou interfaces planares entre estruturas em materiais geológicos sólidos. Dentre os diferentes tipos de descontinuidades, os principais são juntas, falhas, clivagens, foliações metamórficas e magmáticas, estratificações e contatos entre litologias. (Sivakugan; Shukla; Das, 2013).

Quando se trata da resistência e qualidade de um maciço rochoso, a maioria das características analisadas está relacionada às descontinuidades, pois as mesmas afetam aspectos do comportamento mecânico e a permeabilidade das rochas. As descontinuidades, de modo geral, representam superfícies de resistência ao cisalhamento reduzida e resistência à tração muito baixa ou nula, portanto quanto mais numerosas e pouco espaçadas são as descontinuidades dentro de um maciço, menor será a estabilidade mecânica do material. Além disso, as descontinuidades aumentam a porosidade e condutividade hidráulica da rocha, gerando caminhos preferenciais para o fluxo de água e, consequentemente, intensificando a ação do intemperismo químico (Sivakugan; Shukla; Das, 2013).

A fim de padronizar e simplificar o processo de classificação dos maciços rochosos, a ISRM (1978) sugeriu um método de análise das características das descontinuidades que permite a coleta de dados parametrais a serem utilizados nas classificações. As propriedades consideradas neste método são:

Orientação corresponde ao azimute e mergulho de uma descontinuidade. A orientação em relação à estrutura de engenharia controla em grande parte a tendência a situações de instabilidade. **Espaçamento** entre descontinuidades adjacentes determina o tamanho dos blocos de rocha intacta individuais. Em condições de numerosas famílias pouco espaçadas, o maciço demonstra comportamento de baixa coesão. Em contrapartida, condições de espaçamento grande, de maneira geral, promovem um estado de blocos "intertravados". O efeito do espaçamento no comportamento mecânico está associado também à persistência das descontinuidades. **Persistência** se refere à área de extensão de uma descontinuidade em um plano. Pode ser grosseiramente quantificada observando o seu comprimento na superfície de observação (Figura 2);

Figura 2 – Bloco diagrama ilustrativo para diferenciação entre juntas persistentes e não persistentes.

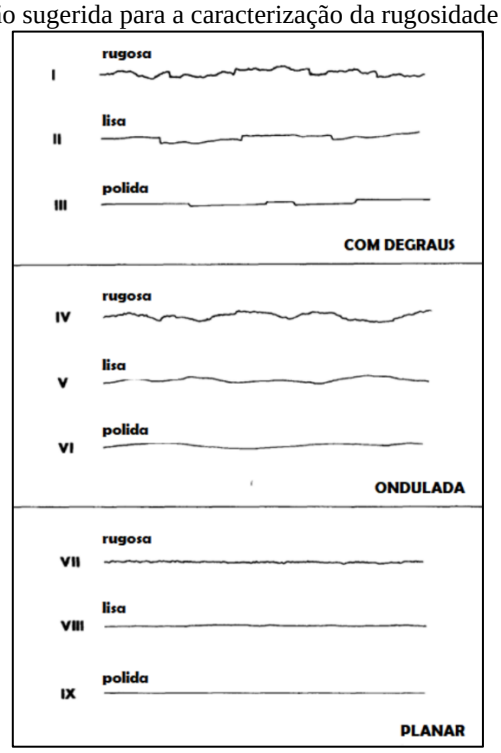


Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

Rugosidade é a característica que descreve a morfologia superfície das descontinuidades, ou seja, a quão "plana" ou "rugosa" é. Essa propriedade é de grande influência na resistência ao cisalhamento da descontinuidade, promovendo atrito adicional e dificultando a movimentação dos blocos de rocha (Figura 3). **Resistência à compressão** trata-se da resistência à compressão da rocha, especificamente nas paredes da descontinuidade. É uma componente importante para a resistência ao cisalhamento e deformabilidade, especialmente nos casos de descontinuidades sem material de preenchimento. **Abertura** é a distância que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade aberta (ou seja, não preenchida), medida perpendicularmente à direção da mesma. Aberturas de maior tamanho podem indicar deslocamentos por cisalhamento. **Preenchimento** refere-se ao material presente entre uma parede e outra da descontinuidade, podendo ser uma mineralização depositada por percolação, um produto de alteração, material resultante de deformação rúptil, entre outros.

Devido à grande variedade composicional, as descontinuidades preenchidas demonstram elevada disparidade de comportamentos mecânicos. **Presença de água** é resultante do fluxo de água que passa pelas descontinuidades, e descreve a quantidade de fluido que infiltra na escavação por descontinuidades individuais ou por famílias distintas;

Figura 3 – Classificação sugerida para a caracterização da rugosidade das descontinuidades.



Fonte: Traduzido de ISRM (1978).

Número de famílias descreve quantitativamente o número de famílias de descontinuidades com padrões de atitudes consideravelmente diferentes. **Tamanho de bloco** corresponde ao volume dos blocos individuais, delimitados pelas descontinuidades. Essa propriedade em si é produto do espaçamento, persistência e do número de famílias.

2.3 RQD

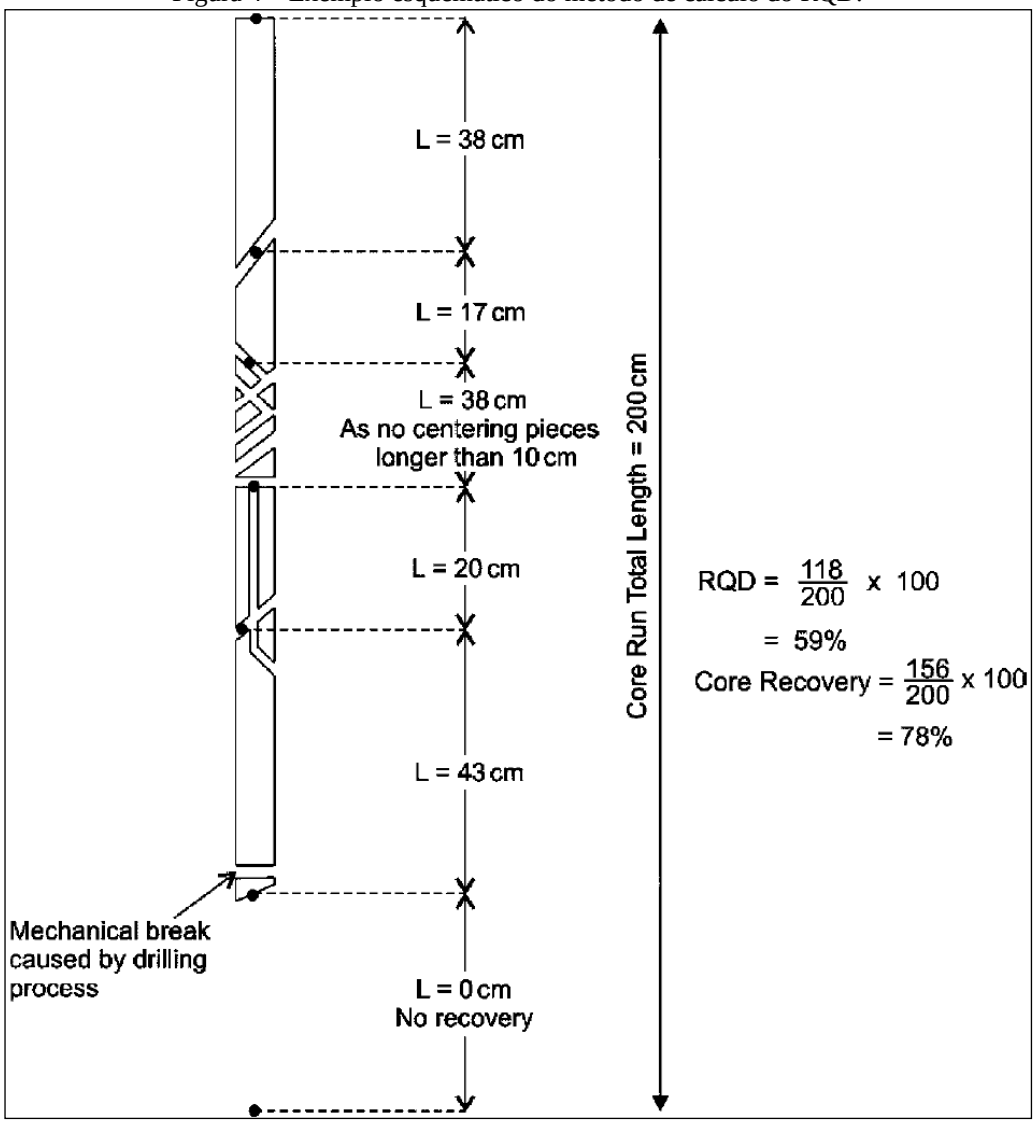
O *Rock Quality Designation*, ou RQD, foi introduzido numa época em que as únicas informações a respeito da qualidade do material rochoso eram, de maneira geral, apenas provenientes das descrições feitas por geólogos com base em observações de campo e na quantidade de material recuperado de sondagens (Deere, 1988).

D. U. Deere (1964) propôs um índice de quantificação da porcentagem de material recuperado em testemunhos de sondagem em rocha, e desde o início de sua implantação no

contexto da engenharia geológica e geotecnia tem sido usado como um indicador de zonas com rochas de baixa qualidade e que devem ser examinadas com maior cautela (Bieniawski, 1989).

O procedimento realizado para a obtenção do índice tem como base a recuperação de testemunhos de sondagem para um certo intervalo da sondagem pelo seu diâmetro. O valor corresponde à percentagem gerada pela divisão da soma dos comprimentos de todos os pedaços do testemunho de sondagem iguais ou maiores do que 10 cm, pelo comprimento total do furo (Figura 4). O maciço rochoso pode ser classificado em muito fraco (< 25%), fraco (25 – 50%), razoável (50 – 75%), bom (75 – 90%) e excelente (90 – 100%) (Niehues, 2019).

Figura 4 – Exemplo esquemático do método de cálculo do RQD.



Fonte: Singh e Goel, *apud* Deere (1989)

2.4 SISTEMA RMR

Rock Mass Rating (RMR) foi introduzido inicialmente por Bieniawski (1974) e subsequentemente aprimorado pelo mesmo autor (1989) utilizando análises em dados de 268 túneis em rocha (Sivakugan; Shukla; Das, 2013). Sua aplicação abrange diversas práticas de engenharia, incluindo a construção de túneis, a estabilidade de encostas, atividades de mineração e fundações. Objetiva determinar parâmetros geotécnicos e estimar a redução de resistência em variados contextos geológicos. Se trata de um sistema de pontuação (num intervalo de 0 à 100) baseado em seis parâmetros, com valores específicos à eles atribuídos (Quadro 1):

- Resistência da rocha intacta: leva em consideração a resistência à compressão uniaxial (UCS), ou o valor de índice de carga pontual (*point load index*). Entretanto, Hoek e Brown (1994) observaram que os testes de carga pontual são pouco confiáveis para rochas menos resistentes (UCS < 25 MPa);
- Valor do RQD;
- Espaçamento das descontinuidades: média da distância (em metros) entre as descontinuidades;
- Condições das descontinuidades: este parâmetro leva em consideração a abertura das descontinuidades, a sua continuidade ou persistência, a rugosidade de sua superfície, a natureza do material de preenchimento (se presente) e o grau de alteração do material de preenchimento;
- Presença de água subterrânea: uma avaliação qualitativa visual da pressão e taxa de fluxo de água do maciço para a escavação;
- Orientação das descontinuidades: se refere à atitude das descontinuidades. A influência da orientação é considerada em relação à direção de avanço de um túnel, sejam elas classificadas em termos de favorabilidade à estrutura. É utilizado como um fator de correção da pontuação do maciço (Quadro 2).

A alocação desses valores de classificação leva em conta o fato de que todos os parâmetros não necessariamente contribuem de maneira igual para o comportamento do maciço rochoso. O valor do RMR final é obtido somando os valores das classificações determinadas para os parâmetros individuais (Quadro 3).

Quadro 1: Parâmetros de Classificação do RMR.

1	**Resistência da rocha intacta**	UCS (MPa)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
		Point Load Index (MPa)	>10	10-4	4-2	2-1	Para valores muito baixos, usar o USC.		
		Pontuação	15	12	7	4	2	1	0
2	**RQD (%)**		100-90%	90-75%	75-50%	50-25%	<25%		
	Pontuação		20	17	13	8	3		
3	**Espaçamento das descontinuidades (m)**		>2	2 - 0,6	0,6 - 0,2	0,2 - 0,06	<0,06		
	Pontuação		20	15	10	8	5		
4	**Condições das descontinuidades**	Persistência (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20		
		Pontuação	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	0	<0,1	0,1-1	1-5	>5		
		Pontuação	6	5	4	1	0		
		Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Levemente rugosa	Plana	Polida		
		Pontuação	6	5	3	1	0		
		Preenchimento (mm)	Nenhum	Duro <5	Duro >5	Mole <5	Mole >5		
		Pontuação	6	4	2	2	0		
		Alteração	Sã	Levemente Alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Completamente Alterada		
		Pontuação	6	5	3	1	0		
5	**Presença de água**	Condições gerais	Seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluxo		
		Pontuação	15	10	7	4	0		

Fonte: modificado de Bieniawski (1989).

Quadro 2: Critério de avaliação da orientação das descontinuidades, usado como fator de correção para a nota final do RMR. Este em específico foi adaptado por Bieniawski para o uso em escavações subterrâneas.

Orientação das descontinuidades								
	Orientação	Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		Independentemente da direção
		Avanço a favor do mergulho		Avanço contra o mergulho				
		Mergulho entre 45º e 90º	Mergulho entre 20º e 45º	Mergulho entre 45º e 90º	Mergulho entre 20º e 45º	Mergulho entre 20º e 45º	Mergulho entre 45º e 90º	Mergulho entre 0º e 20º
	Condição	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Razoável	Muito desfavorável	Razoável
	Pontuação	0	-2	-5	-10	-5	-12	-5

Fonte: modificado de Bieniawski (1989).

Quadro 3: Classes do RMR correspondentes para os diferentes intervalos de pontuação final, e suas descrições em relação à qualidade.

Classe RMR	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
Pontuação final	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	≤ 20
Qualidade	Muito bom	Bom	Normal	Ruim	Muito Ruim

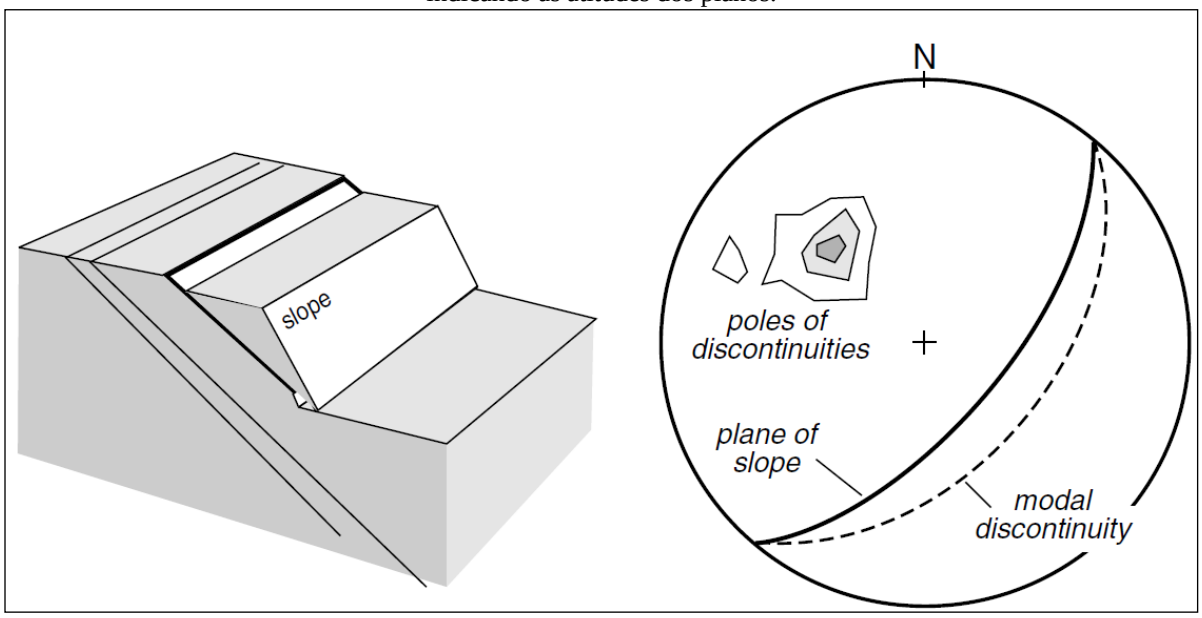
Fonte: modificado de Bieniawski (1989).

2.5 PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA

Uma forma adequada de representação e tratamento de dados estruturais (estruturas planares, falhas, fraturas, etc.) é pela projeção estereográfica, que viabiliza a representação de dados estruturais com rápida visualização espacial. A projeção estereográfica faz uso da rede equiárea, também denominada rede de Schmidt-Lambert ou simplesmente rede de Schmidt, e viabiliza uma forma prática de apresentar bidimensionalmente orientações de feições geológicas tridimencionais (Lisle; Leyshon, 2018).

Este tipo de projeção visa reproduzir as atitudes (azimute e mergulho) das estruturas geológicas, permitindo a alocação de um grande número de planos e linhas em uma só representação estereográfica e, consequentemente, uma melhor visualização destas estruturas e se as mesmas tendem ou não a apresentar atitudes correlacionadas (Figura 5).

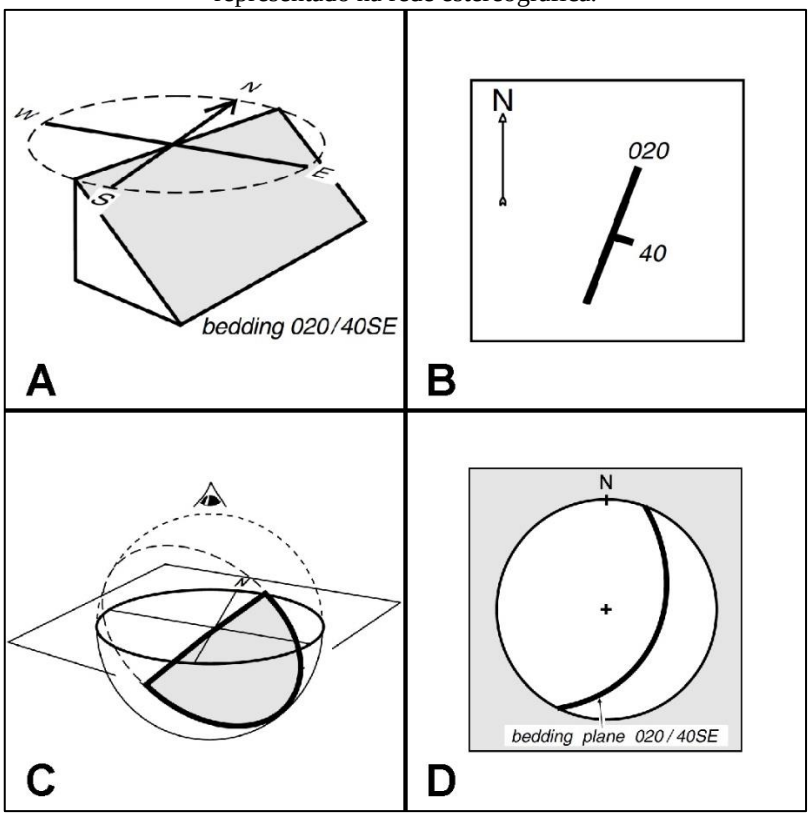
Figura 5 – Exemplo de representação de um talude com descontinuidades utilizando projeção estereográfica, indicando as atitudes dos planos.



Fonte: Leisle; Leyshon (2004).

Consiste em uma área de projeção, chamada de "círculo primitivo", usada como referência para a inserção de dados. Seu plano equatorial é horizontal e sua orientação é fixada ao norte relativo. As estruturas planares são representadas como uma intersecção de um plano imaginário com o círculo primitivo, denominada como "grande círculo", de modo que qualquer possível atitude tenha uma representação única. O azimute ou *dip-direction* e o mergulho determinam, respectivamente, a orientação do grande cículo e a posição do mesmo entre o contorno e o centro do círculo primitivo. A Figura 6 mostra o processo de representação de um plano nesse tipo de projeção.

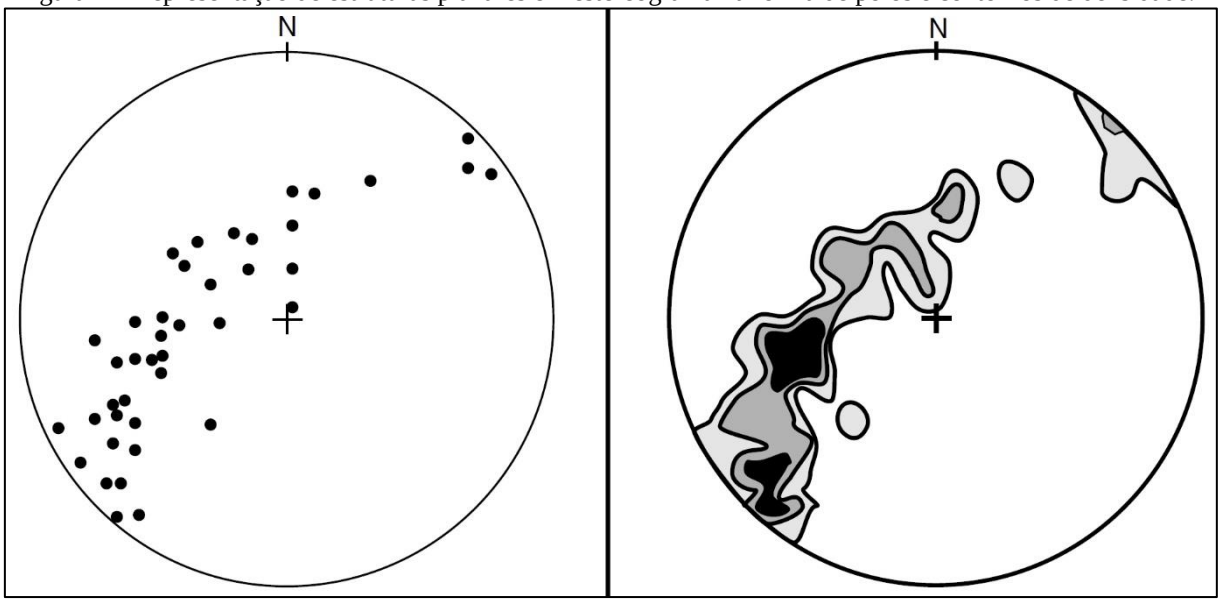
Figura 6 – Método de projeção estereográfica para feições planares. A: identificação a atitude do plano; B: representação em mapa do plano medido; C: intersecção do plano projetado no círculo primitivo; D: plano representado na rede estereográfica.



Fonte: Adaptado de Leisle; Leyshon (2004).

Quando muitas estruturas planares são plotadas em um estereograma, a visualização de aspectos como a orientação principal de diferentes famílias de descontinuidades é dificultada (Wyllie; Mah, 2004). Então, para melhorar a visibilidade da representação, pode-se plotar apenas os polos de cada plano, ou seja, pontos normais (ortogonais) aos planos. Além disso é possível contornar a área plotada de acordo com a densidade de polos, de modo que as regiões de maior concentração indicam as principais atitudes das estruturas analisadas (Figura 7).

Figura 7 – Representação de estruturas planares em estereograma na forma de polos e contornos de densidade.



Fonte: Leisle; Leyshon (2004).

2.6 MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA 3D

As obras ou estruturas geotécnicas compreendem as construções ou partes destas, nas quais sua execução e dimensionamento são essencialmente controlados pelo comportamento mecânico, de deformabilidade e hidráulico dos maciços terrosos ou rochosos, onde estas se implantam (Freitas, 2015). Os projetos de engenharia civil induzem, nos maciços terrosos e rochosos, estados de tensão e de deformação capazes de alterar mais ou menos profundamente os estados de repouso destes maciços. Neste seguimento, os dimensionamentos das estruturas geotécnicas devem utilizar metodologias que garantem o cumprimento dos requisitos de estabilidade e funcionalidade das construções projetadas (Silva, 2023).

Com a coleta de dados que detalham as propriedades de um maciço, através de ensaios, campanhas de prospecção, sondagens e mapeamentos, é viabilizada a construção de um modelo geológico-geotécnico. O mesmo tem o intuito de representar as características de um maciço necessárias para a análise do comportamento mecânico e permitir o acompanhamento da influência da execução da obra de engenharia sobre o maciço.

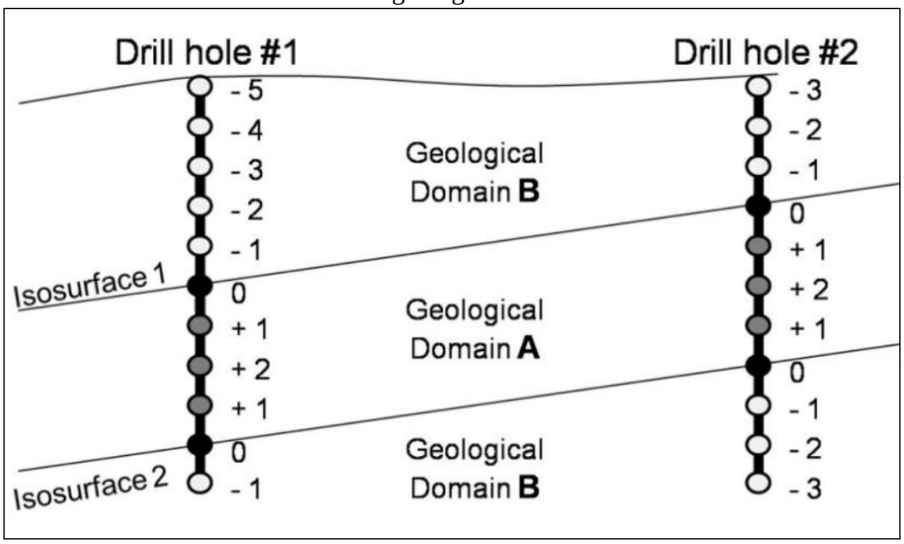
2.6.1 Modelagem geológica 3D

Modelos geológicos tridimensionais (3D) são representações digitais de formações subsuperficiais e suas propriedades associadas. Recentemente, a valorização de sua utilidade

para diversas áreas do conhecimento tem crescido, e *softwares* que possibilitam a construção deste tipo de modelo têm sido proliferados. Nas geociências e na engenharia, eles têm contribuído para o desenvolvimento de métodos de localização de terremotos, em projetos de escavações e túneis, análises para estimativas de morfologia de corpos mineralizados e entre diversas outras aplicações (Thornton, Mariethoz, Brunner, 2018).

Há duas maneiras principais de modelar geometrias complexas. A primeira é a modelagem explícita, método esse que usa uma definição explícita de cada objeto do modelo. As superfícies que bordejam cada uma das formações são definidas e construídas por interpolação de dados. A outra é denominada modelagem implícita, que utiliza definições implícitas das interfaces geológicas, que são definidas como uma das linhas em um dos vários campos escalares em um espaço 3D (Figura 8). A razão para esta variedade de abordagens é que não há um modelo conceitual que satisfaça todas as necessidades de todos os problemas em cada uma de suas áreas de aplicação (Turk & O'brien, 2002).

Figura 8 – Esquema de modelagem implícita com criação de isosuperfícies e atribuição de valores para domínios geológicos.



Fonte: Manual Leapfrog Works, 2020.

Matematicamente, uma superfície implícita é definida por uma função de volume contínua F (x, y, z) = 0 em um nível infinito de detalhe, sendo considerada como existindo dentro da função matemática. A superfície é dita implícita porque a equação não é resolvida para x, y e z. A superfície se torna explícita quando a equação é resolvida e uma aproximação dessa superfície em uma resolução especificada é renderizada como, por exemplo, uma estrutura *wireframe* triangulada (Kentwell, 2019).

3 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo apresenta um resumo geral e descrições sucintas das unidades litológicas presentes na área e seu contexto na geologia da região da grande Florianópolis.

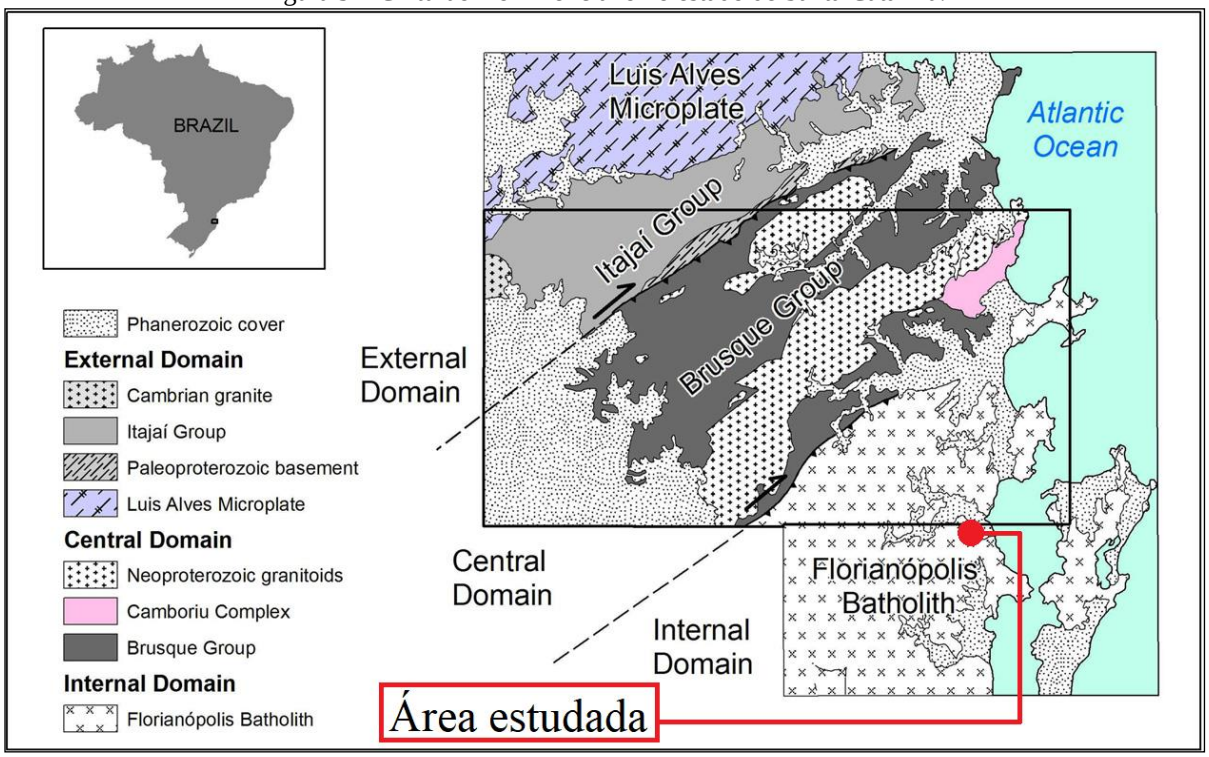
O local estudado está situado no Domínio Sul do Cinturão Dom Feliciano, mais especificamente em uma região de contato entre o Complexo Águas Mornas e o Batólito Florianópolis.

3.1 BATÓLITO FLORIANÓPOLIS

O Batólito Florianópolis caracteriza-se por rochas ígneas plutônicas, hipabissais e vulcânicas, com idade neoproterozóica (U-Pb 650-580 Ma; Janasi *et al.*, 2015). Juntamente as associações granito-gnáissico-migmatíticas do Complexo Águas Mornas, compõem o Domínio Sul, ou Interno, do Escudo Catarinense (Figura 9; Basei, 1985). Com aproximadamente 200 km de comprimento e 60 km de largura, o Batólito Florianópolis representa a maior unidade do Domínio Sul.

As rochas pertencentes ao Batólito Florianópolis compreendem os granitóides sin a tardi-transcorrentes, nos quais estão inclusos a Suíte Paulo Lopes e os Granitóides da Região de Porto Belo, os granitos Álcali-cálcicos pré a sin-colisionais da Suíte Intrusiva Maruim, e, por último, os granitos alcalinos tardi a pós-colisionais das suítes Pedras Grandes e Plutono-Vulcânica Cambirela em conjunto ao Granito Rio Chicão (Wildner *et al*., 2014).

Figura 9 – Cinturão Dom Feliciano no estado de Santa Catarina.



Fonte: Modificado de Basei *et al*. (2011)

3.2 COMPLEXO ÁGUAS MORNAS

O Complexo Águas Mornas, definido por Zanini *et al*. (1997), consiste em uma faixa descontínua de granitóides deformados, onde frequentemente são identificadas rochas gnáissicas e, de forma localizada, rochas migmatíticas, ambas de origem neoproterozóica com idades isocrônicas Rb-Sr e U-Pb de 650 ±24 e 624 ±16 Ma respectivamente (Basei, 1985). Esta unidade compreende uma associação composicionalmente diversificada de ortognaisses polifásicos (Zanini *et al*., 1997). Indicativos sugerem que esses ortognaisses foram derivados de uma sequência prévia de natureza gnáissico-migmatítica, que inclui paleossomas de composição básica a intermediária, como ortoanfibolito, metagabro, metabasalto e metadiorito, juntamente com gnaisses quartzo-dioríticos e granodioríticos.

Do ponto de vista geoquímico, Zanini *et al*. (1997) mostram que as rochas variam desde termos intermediários (SiO2 = 56%) até termos graníticos com SiO2 = 75%. Apresentam *trend* tipicamente calcioalcalinos e metaluminos. Os diagramas geotectônicos indicam que essas foram formadas em ambiente de arco continental.

3.3 SUÍTE INTRUSIVA MARUIM

Como estabelecido no mapeamento geológico da Folha Florianópolis (Zanini *et al*., 1997), esta suíte corresponde à uma associação de granitóides calcialcalinos formando um batólito zonado, com termos monzograníticos em seu interior e termos tonalíticos e quartzo-dioríticos nas porções marginais (Zanini *et al*., 1997). Ainda nesta publicação, a Suíte Intrusiva Maruim foi definida como compreendendo quatro unidades litológicas, sendo elas: Tonalito Forquilinha, Granodiorito Alto da Varginha, Granito Rio das Antas e Granito São Pedro de Alcântara.

Essa associação é intrusiva no Complexo Águas Mornas, fato evidenciado pela presença de xenólitos angulosos de natureza gnáissica nas fácies de bordo desta suíte, bem como pela existência de falhas nos contatos com o Complexo Águas Mornas. Com relação aos contatos entre as unidades do batólito, há variação desde contatos bruscos como enclaves de termos iniciais englobados por termos tardios, até contatos transicionais gradativos.

As diferentes fácies granitoides são progressivamente mais jovens e mais ricas em sílica, formando um complexo zonado. O Granito São Pedro de Alcântara, como estágio final, é predominantemente composto por monzogranitos porfiríticos. Suas características texturais, estruturais, petrográficas e litoquímicas sugerem uma origem magmática comum em relação aos termos tonalíticos e granodioríticos. Estes últimos são representados por rochas mesocráticas a melanocráticas, ricas em plagioclásio, hornblenda e biotita, correspondendo às frações quimicamente mais próximas da composição do magma original. Foram preservadas como resíduos dos primeiros pulsos magmáticos, nas porções mais externas do batólito ou na forma de megaenclaves parcialmente assimilados e/ou envoltos na massa granítica mais evoluída (Zanini *et al*., 1997).

3.3.1 Granito São Pedro de Alcântara

O Granito São Pedro de Alcântara é o membro mais proeminente da Suíte Intrusiva Maruim. Trata-se de uma rocha de cor cinza-escura, com grãos grandes e uma textura porfirítica. Possui fenocristais brancos de feldspato alcalino ou, às vezes, plagioclásio, que podem chegar a 1 a 1,5 cm de diâmetro. A textura porfirítica é de distribuição homogênea, embora ocasionalmente contenha inclusões não assimiladas de Tonalito Forquilha e Granodiorito Alto da Varginha (Zanini et al., 1997).

A mineralogia principal, como descrita por Zanini (1997), inclui k-feldspato, quartzo, plagioclásio e biotita, e com opacos, anfibólios e muscovita presentes em menor abundância.

Os constituintes da mineralogia acessória são zircão, titanita, allanita e apatita. Dentro desta unidade predominam a variedade petrográfica dos monzogranitos, variando desde quartzo-monzonitos à sienogranitos.

3.3.2 Granodiorito Alto da Varginha

Trata-se de rocha mesocrática de cor cinza, com estrutura maciça, mas que por vezes mostra minerais máficos orientados por fluxo, e com textura heterogranular seriada média a fina. Pode apresentar enclaves básicos a intermediários, microgranulares, de morfologia ovalada à fusiformes. Apesar de o granodiorito ser o termo de maior representatividade nesta litologia, há a presença subordinada de quartzo-monzonitos, quartzo-monzodioritos e monzogranitos (Zanini *et al*., 1997).

Sua mineralogia essencial é constituída por plagioclásio, k-feldspato e quartzo, com biotita e anfibólios como varietais e apatita, titanita, zircão e opacos como acessórios. Além da textura heterogranular, pode também apresentar textura porfirítica com cristais de plagioclásio atingindo até 4 milímetros. Frequentemente, os quartzos e máficos formam agregados de grãos e, localmente, desenvolvem-se arranjos intergranulares onde quartzo e feldspato alcalino envolvem parcialmente os cristais de plagioclásio e máficos.

A variação composicional desta unidade é evidenciada pela redução no teor de máficos e de plagioclásio, e consequente aumento nas proporções de k-feldspato e quartzo.

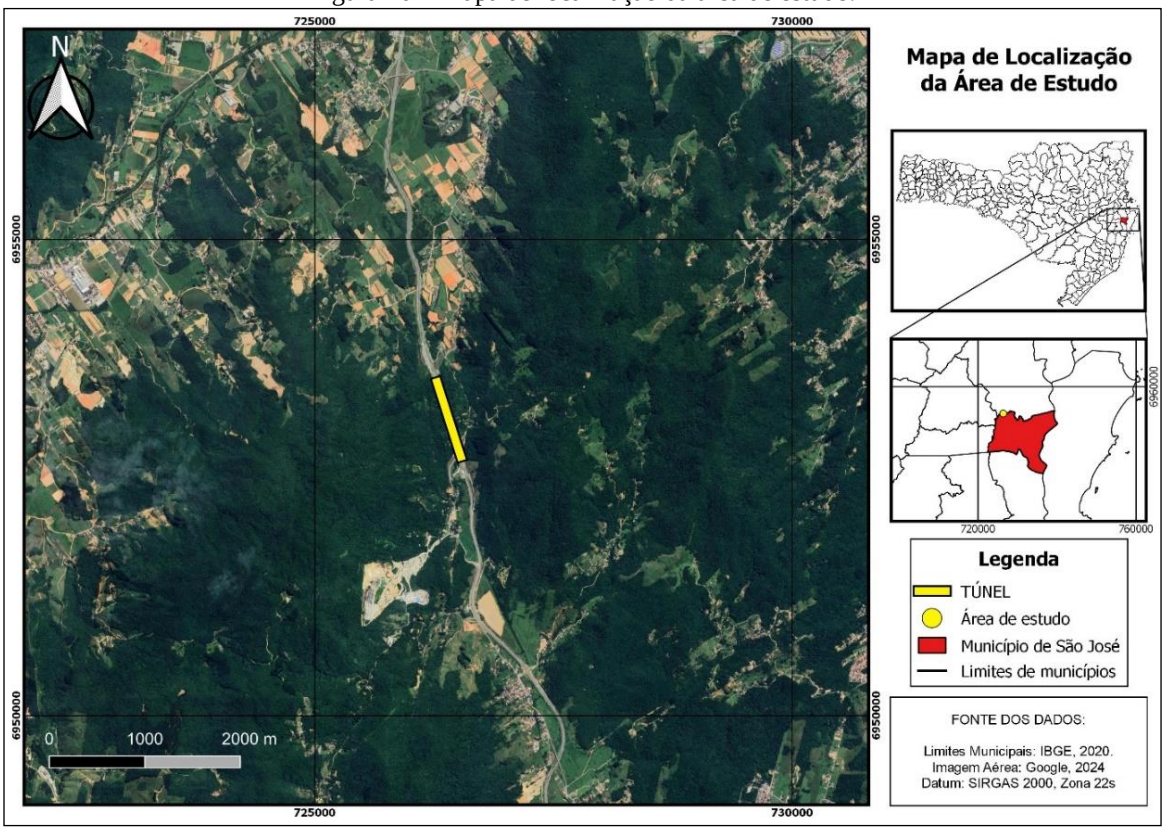
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E EMPREENDIMENTO DE ESTUDO

Este capítulo apresenta a localização da obra estudada no presente trabalho, bem como um resumo geral e descrições sucintas das rochas encontradas na área através das campanhas investigativas de projeto.

4.1 O EMPREENDIMENTO

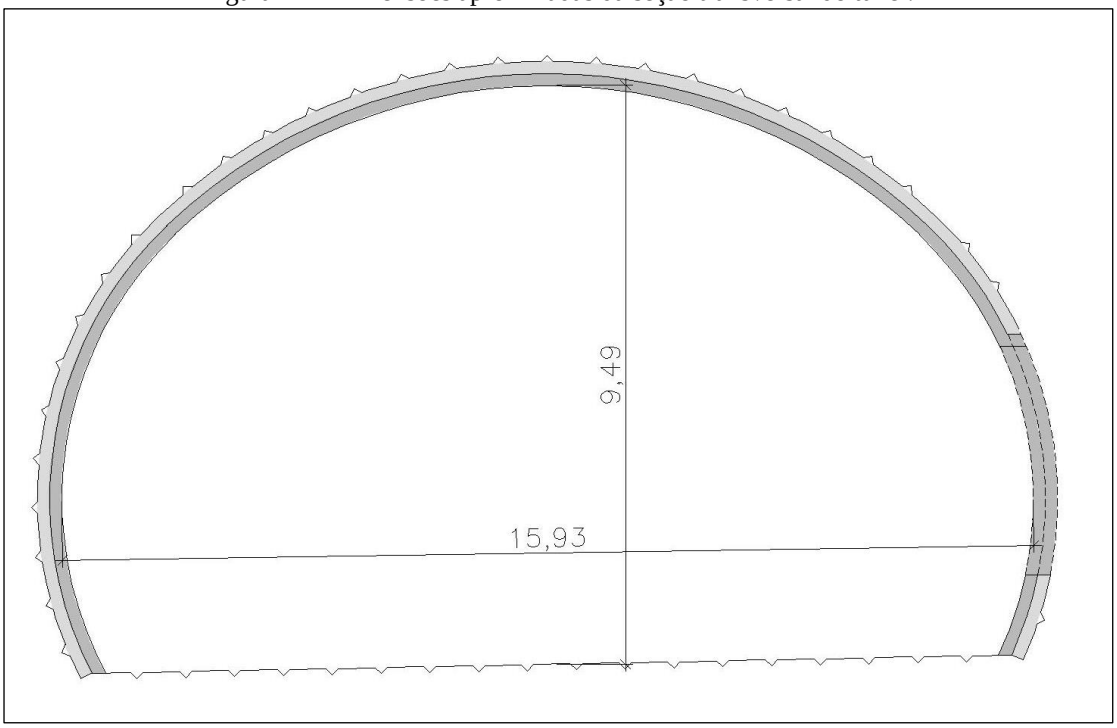
O túnel estudado (denominado “Túnel 4”) está situado na região litorânea de Santa Catarina, próximo da divisa entre os municípios de São José e Biguaçu (Figura 10). A obra foi implementada como parte do Contorno Viário de Florianópolis (BR-101), no km 207 da mesma rodovia. O Túnel 4 é um túnel duplo, com duas escavações separadas e paralelas de 820 metros de comprimento cada (pista norte e pista sul), divididas por um eixo central. A seção escavada tem aproximadamente 15,90 metros de largura e 9,50 metros de altura (Figura 11).

Figura 10 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor (2024).

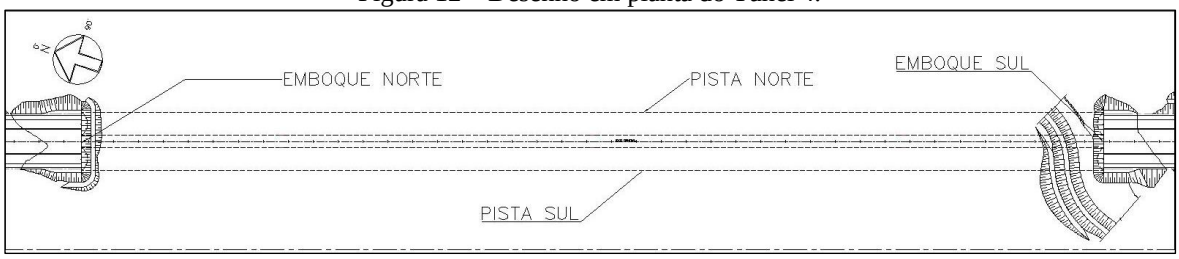
Figura 11 – Dimensões aproximadas da seção transversal do túnel.



Fonte: Documento interno, 2024.

Para facilitar o entendimento do leitor, o presente trabalho utilizará das denominações de projeto para se referir às diferentes regiões do túnel. Os emboques tratam-se das porções próximas à entrada ou início do túnel, tanto pela extremidade norte quanto sul (emboque norte e emboque sul). Pista norte e pista sul referem-se, respectivamente, ao túnel à leste e ao túnel à oeste do eixo central (Figura 12).

Figura 12 – Desenho em planta do Túnel 4.

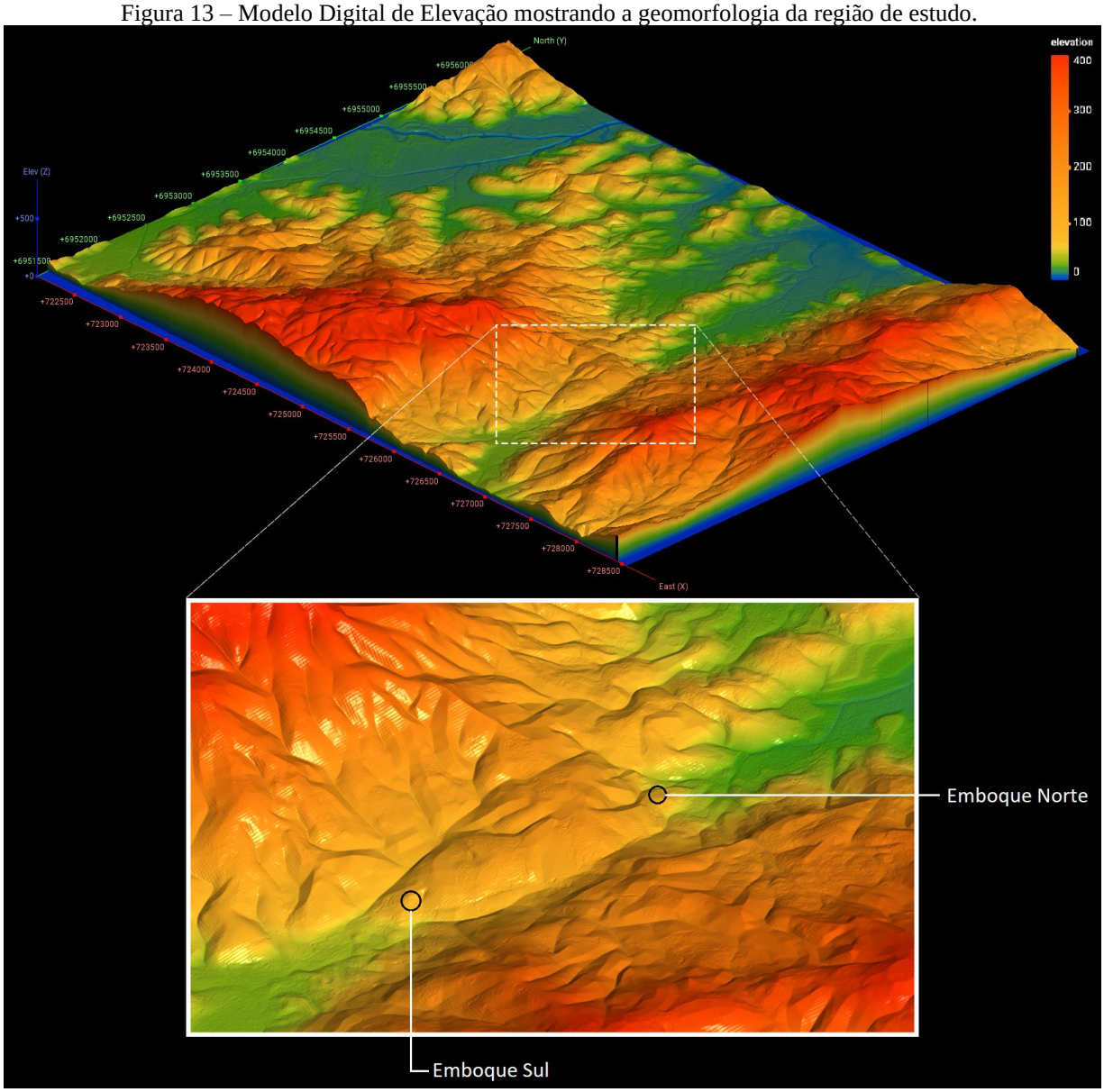


Fonte: Documento interno, 2024.

O traçado da escavação subterrânea atravessa o Morro da Rússia, presente num contexto geomorfológico de configuração montanhosa, com predomínio de terrenos acidentados e declivosos. No relevo é observável a presença de zonas de fraqueza resultando em faixas de maior erodibilidade, associadas a planos de fraturas, falhas e diques. Tais faixas se manifestam como sulcos extensos no terreno, ou lineamentos, que condicionam os principais

vales e as drenagens primárias e secundárias. Estas faixas discretas tendem a seguir direções NE e NNE, relacionadas aos eventos tectônicos que atuaram nas rochas da região em suas gêneses. Os morros da região têm altitudes de até 600 metros, sendo que o Morro da Rússia tem aproximadamente 180 metros de altura (Figura 13).

Figura 13 – Modelo Digital de Elevação mostrando a geomorfologia da região de estudo.

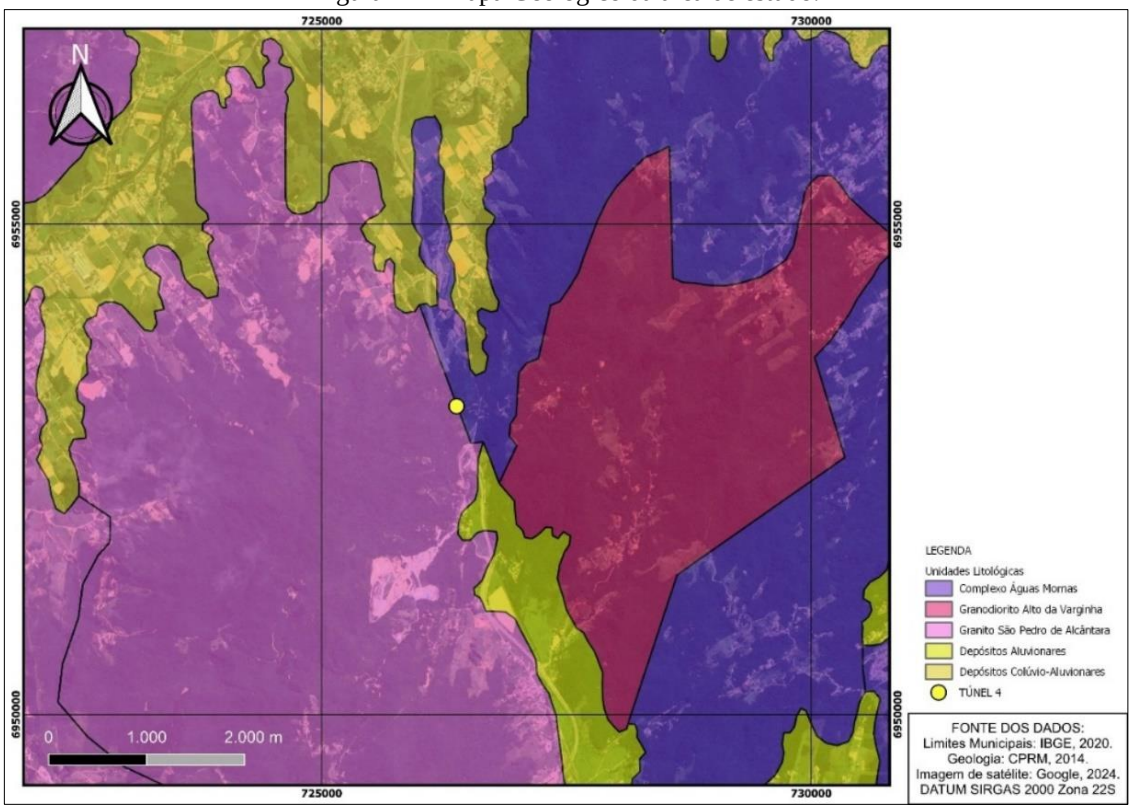


Fonte: Autor (2024)

As rochas presentes no túnel e suas proximidades, como dito anteriormente, pertencem à suítes graníticas e complexos metamórficos. De acordo com o mapeamento da Wildner *et al*. (2014) para o estado de Santa Catarina, na escala 1:500000, o túnel passa diretamente no contato

entre o Complexo Águas Mornas e o Granito São Pedro de Alcântara, e adjacente ao Granodiorito Alto da Varginha (Figura 14).

Figura 14 – Mapa Geológico da área de estudo.



Fonte: Autor, adaptado de CPRM (2014).

Como parte das investigações para o projeto executivo, foram realizados 12 furos de sondagem mista. Foram feitos dez furos nos emboques do túnel (verticais e com 30 metros de profundidade em média) e dois próximos ao ponto médio do traçado (com 65 metros de profundidade, e uma delas transversal).

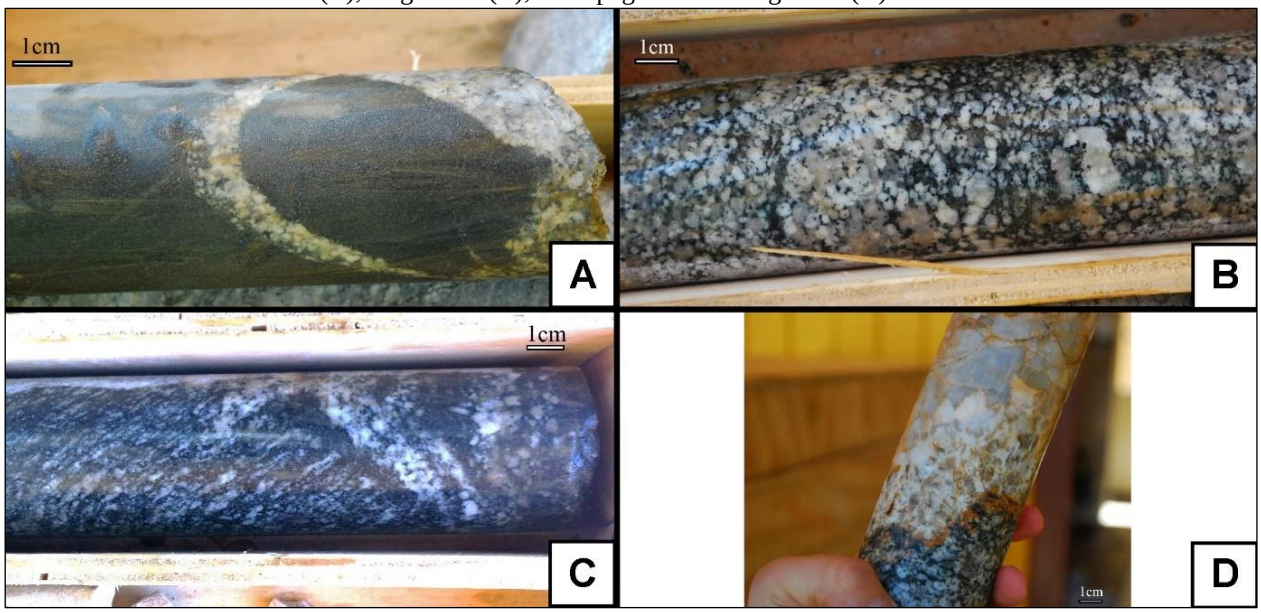
De acordo com os boletins de sondagem, foi possível identificar 4 litotipos diferentes no maciço rochoso em questão: migmatito, gnaisse, granito e diabásio. Nos relatórios disponibilizados não foram especificadas à quais unidades estas rochas pertenciam.

- Migmatito: rocha de cor cinza com porções brancas, rosadas e, ocasionalmente, esverdeadas (Figura 15c). Apresenta estrutura migmatítica com bandas centimétricas à métricas (determinadas como melanossoma e leucossoma) e textura nematoblástica. A melanossoma apresenta granulação muito fina a média, e mineralogia composta por quartzo, piroxênio, anfibólio, biotita e plagioclásio. Já as porções leucossomáticas possuem granulação fina a grossa e mineralogia composta por quartzo, plagioclásio, K-feldspato e pequenas concentrações de

anfibólio. Frequentemente demonstra presença de veios milimétricos preenchidos por epidoto ou material quartzo-feldspático, além de veios pegmatíticos centimétricos. Foi identificada nos testemunhos uma predominância de fraturas com 30 e 90 graus de mergulho.

- Gnaisse: rocha de cor cinza com porções esbranquiçadas, estrutura foliada e textura nematoblástica. Sua granulação é média a grossa. A mineralogia é composta por quartzo, plagioclásio, K-feldspato, piroxênio, anfibólio e biotita. Comumente apresenta veios pegmatíticos e veios com epidoto.
- Granito: rocha de coloração cinza com porções rosadas e esverdeadas, e amareladas quando alteradas (Figura 15b). Sua estrutura é maciça e a textura é fanerítica variando entre equigranular fina a média e equigranular média a grossa. A mineralogia presente é composta por quartzo, plagioclásio, k-feldspato, biotita piroxênio e anfibólio. Frequentemente apresenta fraturas oxidadas e veios pegmatíticos (Figura 15d).
- Diabásio: rocha cor cinza escuro com porções esverdeadas (Figura 15a). Estrutura maciça e textura fanerítica equigranular muito fina a fina. Mineralogia composta por quartzo, plagioclásio, piroxênio, anfibólio e biotita. Apresenta com frequência elevado grau de fraturamento, e fraturas oxidadas e/ou preenchidas com material argiloso.

Figura 15 – Testemunhos obtidos das sondagens realizadas na área de estudo. Diabásio e granito (A); Granito (B); Migmatito (C); Veio pegmatítico em granito (D).

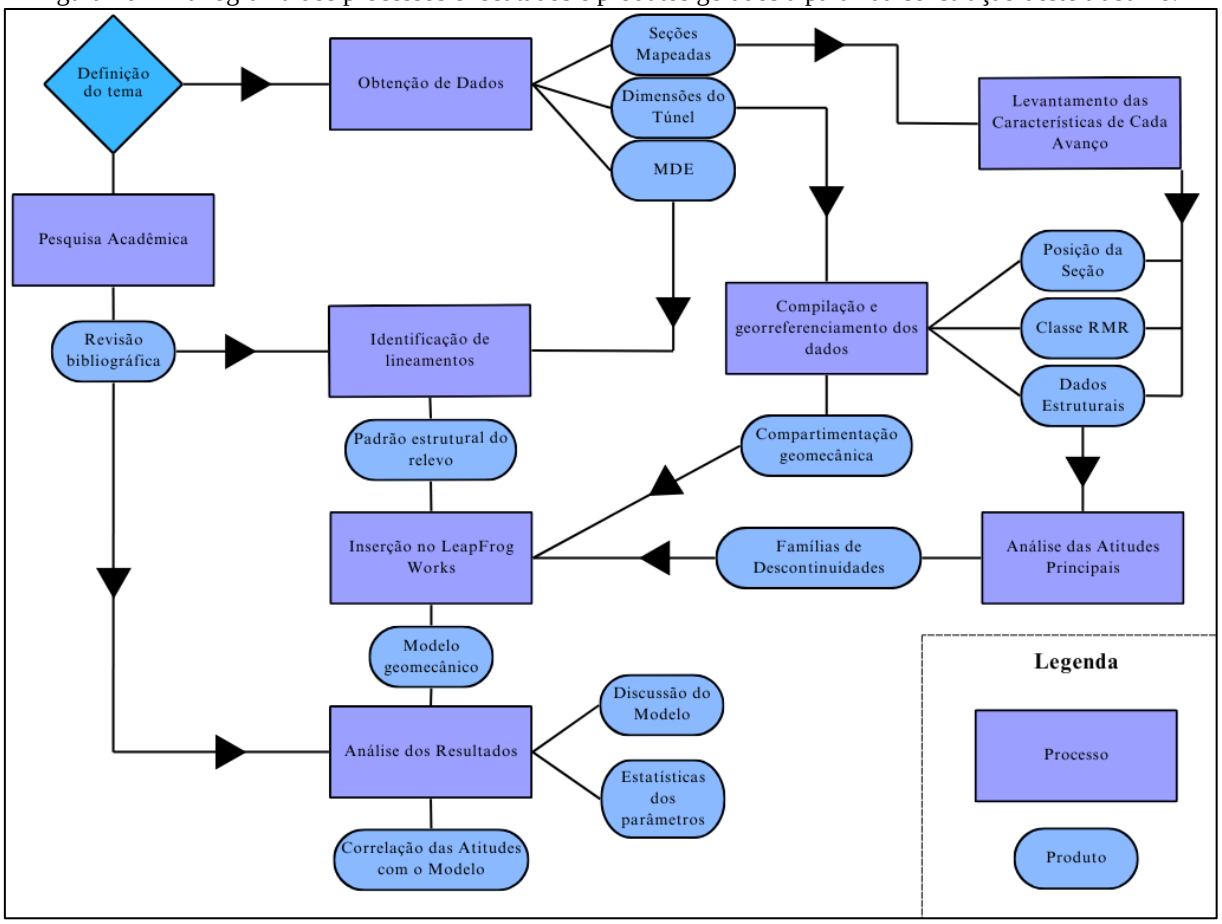


Fonte: Documento interno, 2024.

5 METODOLOGIA

Com a definição do tema escolhido para este trabalho, foram adotadas as metodologias de revisão bibliográfica, obtenção de dados, processamento de dados e construção e análise do modelo. Estas metodologias serão detalhadas nesta seção, bem como ilustradas no fluxograma abaixo (Figura 16).

Figura 16 – Fluxograma dos processos executados e produtos gerados a partir da construção deste trabalho.



Fonte: Autor (2024).

5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia agregada é referente à natureza das unidades geológicas principais presentes na área estudada, bem como os grupos maiores às quais pertencem. Ademais, trabalhos nas áreas de geotecnia, mecânica de rochas, túneis e escavações subterrâneas foram utilizados como referência para o embasamento teórico. Esta etapa contribuiu para a identificação dos lineamentos e a separação dos mesmos de acordo com suas orientações,

característica tal que é relacionada à natureza do histórico tectônico e da gênese do embasamento. As análises dos resultados utilizaram informações relacionadas à geotecnia de túneis, com foco em correlacionar as condições observadas no maciço rochoso aos fatores geológicos.

5.2 OBTENÇÃO DE DADOS

Essa etapa consistiu em compilar todos os dados, arquivos e documentos, tanto referentes ao projeto do túnel quando ao local de estudo, necessários para a realização do trabalho. Tendo em vista que todos os modelos dependem da qualidade das informações obtidas, a obtenção dos dados é essencial para a execução das etapas seguintes.

Os dados coletados com relação ao projeto do túnel em questão e o memorial da execução da escavação, foram disponibilizados pela Construtora Aterpa S.A, a principal fonte de dados para a realização deste trabalho. Consistem principalmente em boletins de sondagem, projetos (geométricos, geotécnicos e estruturais) do Túnel 4 e mapeamentos de frente de escavação. Os boletins de sondagem (12 no total) foram utilizados, bem como o registro fotográfico dos testemunhos, para a caracterização petrográfica do maciço escavado. Com os projetos, foram obtidas as informações de comprimento, largura e altura da seção, caimento, distância entre o eixo de cada pista e as coordenadas de cada um dos emboques. Os mapeamentos geomecânicos das seções contém os dados referentes aos avanços individuais, como a posição da frente de escavação, distância entre cada avanço, medidas estruturais das descontinuidades e a classificação geomecânica (pontuação RMR final e os valores de cada parâmetro). No total, foram compilados 604 mapeamentos geomecânicos, os quais contém 1422 medidas planares, sendo 803 na pista sul e 619 na pista norte.

Também foram utilizados dados de domínio público, na forma de modelos digitais de elevação, poligonais das unidades geológicas e imageamento aéreo. Os mapas de localização e geológico elaborados para este trabalho foram feitos com base nos limites municipais de Santa Catarina, imagens do Google *Satellite* e os polígonos em shapefile do mapeamento geológico da CPRM. Foi utilizado o Modelo Digital do Terreno (MDT) do ano de 2010, disponibilizado pela Secretaria de Desenvolvimento Social (SDS) de Santa Catarina através do portal SIGSC, para a análise dos lineamentos.

5.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

Com os dados obtidos na etapa anterior, o processamento se deu inicialmente pela digitalização dos mapeamentos geomecânicos utilizando o Microsoft Excel. Estes foram organizados de maneira sistemática, constando cada um de seus parâmetros, o tamanho do avanço (ponto inicial e final), as medidas estruturais e seu código identificador. Tendo em vista que o modelo estrutural e a compartimentação geomecânica serão construídos separadamente na etapa seguinte, os valores da qualidade geomecânica e os dados estruturais foram dispostos em planilhas diferentes e em formato .csv. Estas medidas não foram especificadas quanto ao tipo de descontinuidade (juntas, falhas, planos de foliação, etc.) em suas documentações, portanto não serão diferenciadas nas análises do presente trabalho. Vale ressaltar que os mapeamentos de frente de escavação foram obtidos diretamente por um geólogo em campo, portanto envolvem um grau de interpretação, dado que o profissional prioriza as estruturas que melhor representam o padrão estrutural do maciço rochoso. Ainda, em alguns casos, determinados avanços não apresentam medidas estruturais.

Em seguida foi necessário georreferenciar cada um dos avanços, para que seja possível inserir os dados no LeapFrog Works e visualizá-los em suas posições corretas. De acordo com as informações de projeto, o túnel é retilíneo e possui caimento constante. Partindo destes princípios, este processo foi simplificado consideravelmente. Utilizando o *software* Autocad Civil 3D, foram plotadas duas linhas representando as pistas sul e norte, em suas respectivas coordenadas e de mesmo comprimento, caimento e direção. Estas linhas foram seccionadas em segmentos correspondentes às distâncias entre os avanços e em seguida as coordenadas N, E e Z de cada segmento foram extraídas para uma planilha. Ao final, estas coordenadas foram unidas a seus respectivos avanços, obtendo-se assim o georreferenciamento por avanço do Túnel 4.

Para realizar as análises das medidas em estereograma, os dados estruturais foram inseridos no software DIPS. O próprio programa permite a delimitação das famílias de descontinuidade, através da visualização dos contornos de densidade. As áreas de maior densidade dentro do estereograma são selecionadas e todos os polos ali localizados são categorizados como fazendo parte de uma família. Em seguida, são gerados pelo programa os polos e planos médios.

5.4 CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO MODELO

Esta etapa consistiu inicialmente em inserir e organizar os produtos obtidos na etapa anterior em ambiente 3D, no LeapFrog Works. Este programa é a principal área de trabalho e interface utilizada, pois é onde toda a modelagem e compartimentação foram feitas.

Dentro deste ambiente, foram inseridas as medidas estruturais georreferenciadas. Como a delimitação das famílias de descontinuidades foi feita em outro software, foi necessário delimitá-las novamente dentro do LeapFrog através da ferramenta de seleção dentro do próprio estereograma gerado pelo programa. Com isso, as famílias foram diferenciadas por cores e dispostas na cena 3D para as análises posteriores.

Para criar o modelo tridimensional que representa o túnel, foram inseridos no LeapFrog Geo os dados geométricos, topográficos e geomecânicos do túnel (arquivos em formato .csv). Com as informações de cunho espacial o próprio programa gerou a forma do túnel, que neste caso foi feito através da ferramenta de "furos de sondagem". Os dados geomecânicos, pela maneira que foram organizados, são designados às suas posições corretas no modelo 3D. Para que se pudesse apresentar os valores de todos os parâmetros, a pontuação final do RMR e a classe dos avanços de maneira mais visual, foram criados intervalos de cores correspondentes aos valores discretos de cada categoria (Figura 17). As cores mais quentes representam valores menores e, consequentemente, pior qualidade geomecânica, e as cores mais frias representam os valores maiores, ou qualidade geomecânica mais alta.

Figura 17 – Exemplo de como os intervalos foram delimitados, alocando uma cor para cada pontuação.

Show	Min		Colour		Max	Data
☑	inf	<		<	8.0	2.99%
☑	8.0	≤		<	13.0	17.41%
☑	13.0	≤		<	17.0	47.93%
☑	17.0	≤		<	20.0	31.01%
☑	20.0	≤		≤	inf	0.66%

Fonte: Autor, 2024.

Com a junção da representação dos planos de descontinuidade e a compartimentação do túnel nos parâmetros do RMR, foi obtido o modelo geomecânico 3D.

A parte de análise do modelo foi feita tanto através do LeapFrog quanto do Excel. Em ambiente 3D foram feitas principalmente análises visuais para os parâmetros geomecânicos, verificando sua disposição espacial e correlacionando em partes com a geomorfologia e condicionantes geológicos. Também foi possível realizar uma comparação entre as estimativas das classes geomecânicas de projeto e as classes realmente encontradas durante a escavação. Para averiguar a existência de uma correlação direta entre as estruturas planares e as classes geomecânicas estabelecidas, foi conduzida uma análise estereográfica das descontinuidades do maciço rochoso. As medidas de orientação das estruturas foram segmentadas conforme as classes geomecânicas das respectivas compartimentações. Para as estatísticas e os gráficos foi utilizado o Excel, permitindo a verificação da frequência dos valores de pontuação RMR, bem como a distribuição dos parâmetros dentro de cada uma das classes geomecânicas.

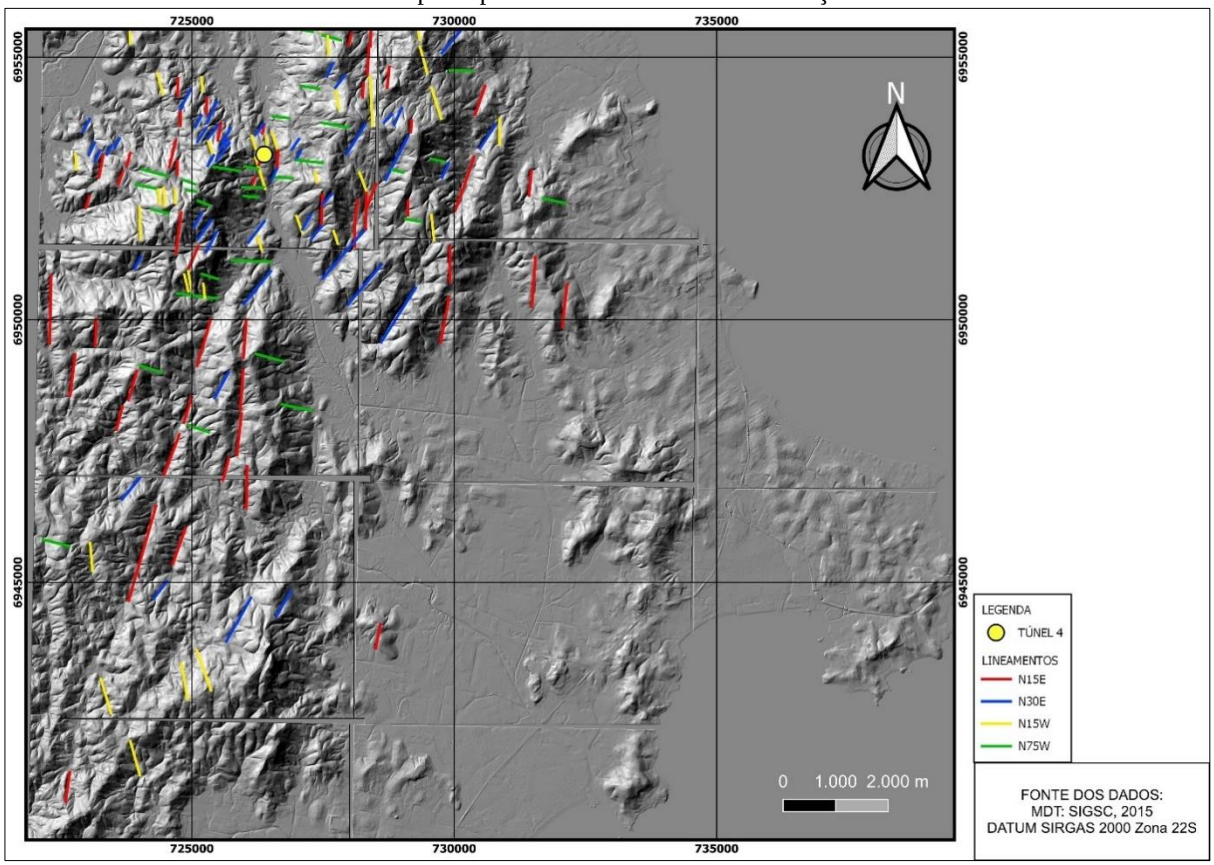
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das análises das estruturas regionais e locais, das atitudes medidas, do modelo estrutural, da compartimentação geomecânica e das análises comparativas dos parâmetros e classes geomecânicas.

6.1 ANÁLISE DE LINEAMENTOS

Com o MDT, utilizando o *software* QGIS, gerou-se o relevo sombreado e foram traçados os lineamentos principais (Figura 18), definidos por trechos de drenagens retilíneos, possíveis indicadores de sistemas de fraturas (lineamentos negativos).

Figura 18 – Mapa da região de São José com MDT em relevo sombreado (iluminação artificial N315 à 45º) com as principais famílias de lineamentos traçadas.

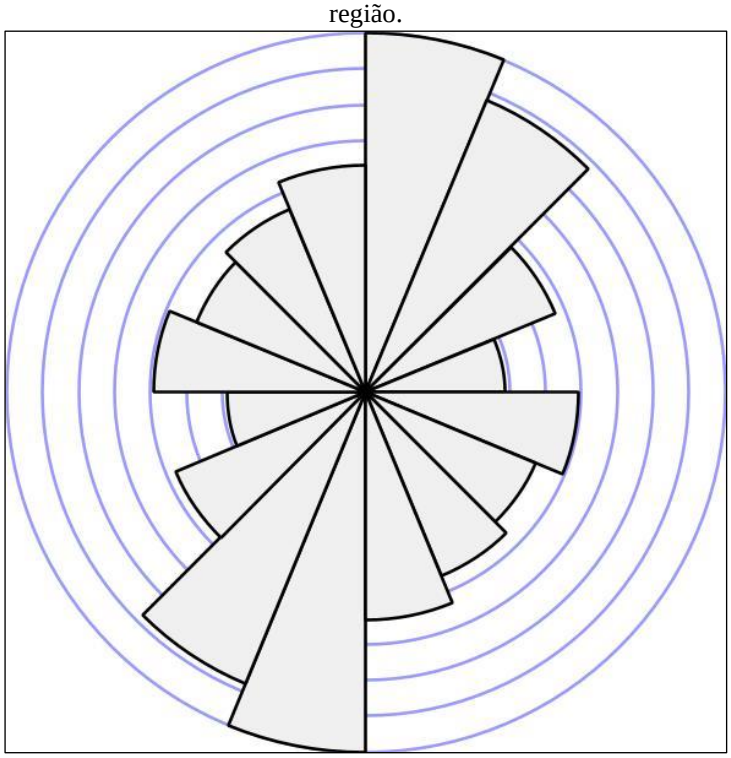


Fonte: Autor (2024)

Considerando os lineamentos de maior expressividade, predominam estes orientados à N e NE (Figura 19). As duas famílias principais (linhas vermelhas e azuis, respectivamente)

tem orientação N15E e N30E, a primeira apresentando a maior persistência, com lineamentos de mais de 500 metros de extensão. Possivelmente marcam os diques de diabásio do Enxame Florianópolis, que ao longo do litoral de Santa Catarina, no Escudo Catarinense, apresentam esta orientação média (FREITAS, 2022). Subordinadamente, observa-se a presença de lineamentos nas direções N15W e N75W (linhas verdes e amarelas, respectivamente), as quais demonstram menor continuidade. Estes possivelmente estão ligados ao padrão estrutural dos maciços graníticos e gnáissicos, condicionados por sua gênese tectônica.

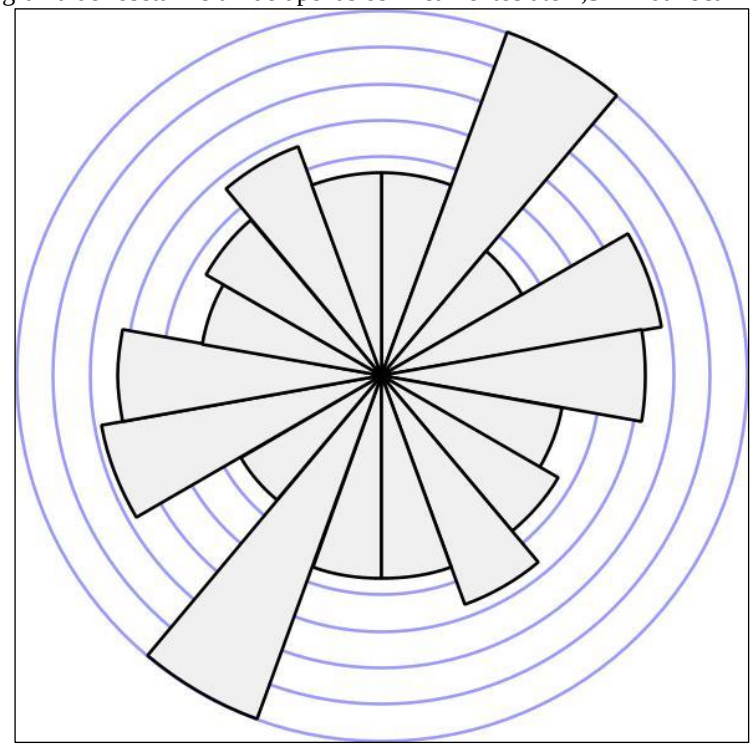
Figura 19 – Diagrama de roseta mostrando a distribuição das principais direções dos lineamentos traçados na região.



Fonte: Autor (2024)

À fim de obter uma visualização mais detalhada dos lineamentos mais próximos ao local do Túnel 4, foi feita uma análise levando em consideração apenas os lineamentos traçados em um raio de 1,5 km da obra, conforme a (Figura 20). Nota-se uma predominância mais expressiva de lineamentos orientados à N30E, N70E e E-W.

Figura 20 – Diagrama de roseta incluindo apenas os lineamentos até 1,5 km da localização do Túnel 4.



Fonte: Autor (2024).

6.2 MODELO ESTRUTURAL

A seguir apresentam-se as análises em estereograma de todas as medidas obtidas e as famílias de descontinuidade delimitadas, bem como a visualização em ambiente 3D das mesmas.

6.2.1 Caracterização das famílias de descontinuidades

Com isso, foram identificados os pontos com maior concentração de medidas, delimitadas em um cone de 15º. Foram delimitadas 3 famílias, das quais duas são subverticais (F1 e F2) e uma é sub-horizontal (F3; Figura 21). As descontinuidades pertencentes à F1 e F2 apresentam mergulhos iguais e direções com aproximadamente 90º entre si, indicando que provavelmente fazem parte de um sistema de juntas ou fraturas ortogonais. A Tabela 1 expõe as características de cada família delimitada.

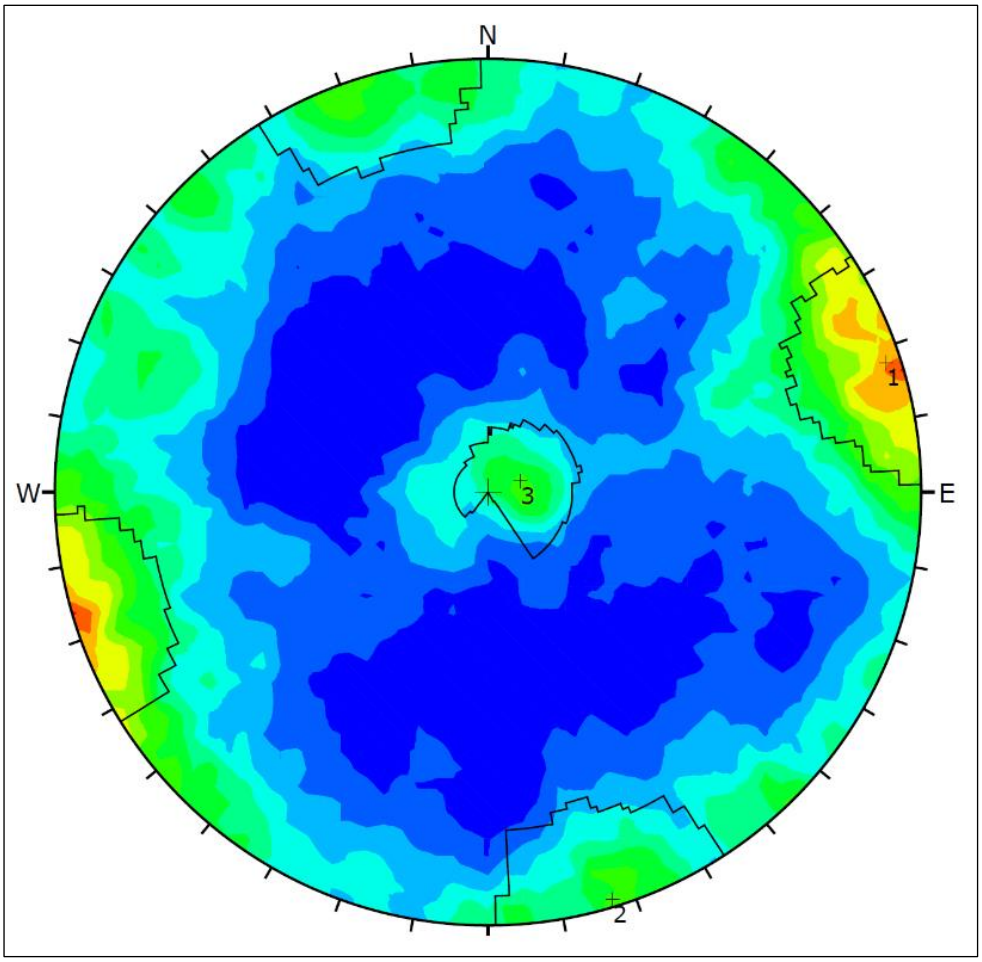
Tabela 1: Atitudes dos planos médios e tamanho amostral das principais famílias de descontinuidades definidas.

Família	Azimute	Mergulho	Quadrante do mergulho	Total de medidas
F1	160	88	SW	265
F2	254	89	NW	122
F3	159	8	SW	90

Fonte: Autor (2024)

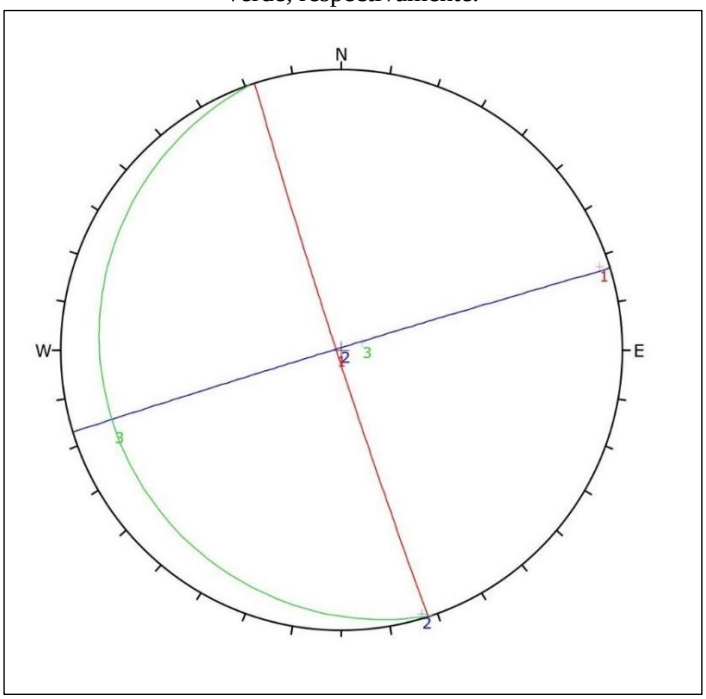
De acordo com esta separação e com as análises feitas nos diagramas de roseta, nota-se que as famílias F1 e F2 apresentam direções compatíveis com os lineamentos direcionados à N15W e N70E. F1 e F2, dessa forma, possivelmente estão mais diretamente relacionadas à configuração estrutural particular dos maciços granítico-gnáissicos.

Figura 21 – Estereograma com contornos de densidade dos polos dos planos das medidas, gerado no DIPS, mostrando as famílias de descontinuidades presentes no maciço e as três famílias delimitadas para a inserção no modelo.



Fonte: Autor (2024).

Figura 22 – Planos médios das três famílias de descontinuidades definidas. F1, F2 e F3 em vermelho, azul e verde, respectivamente.



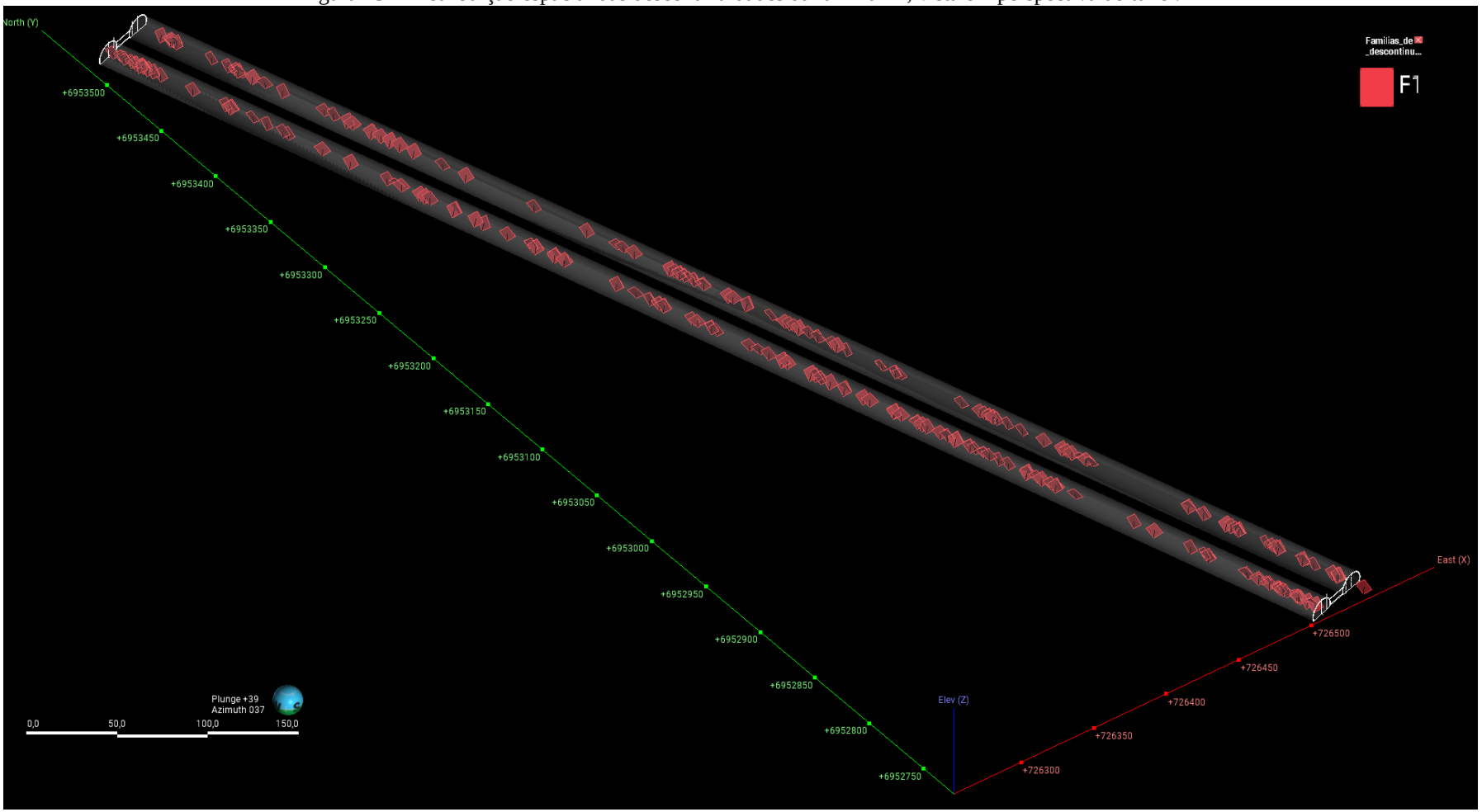
Fonte: Autor (2024)

Cabe salientar que, salvo as três famílias de descontinuidades, há dispersão significativa nas medidas. Isto foi observado principalmente nas regiões de alto mergulho do estereograma da Figura 21. Em virtude disso, ainda poderiam ser delimitadas outras famílias de descontinuidade. Porém as mesmas, por conter menor volume de medidas, não teriam boa representatividade das condições gerais das estruturas encontradas no maciço.

6.2.2 Representação tridimensional

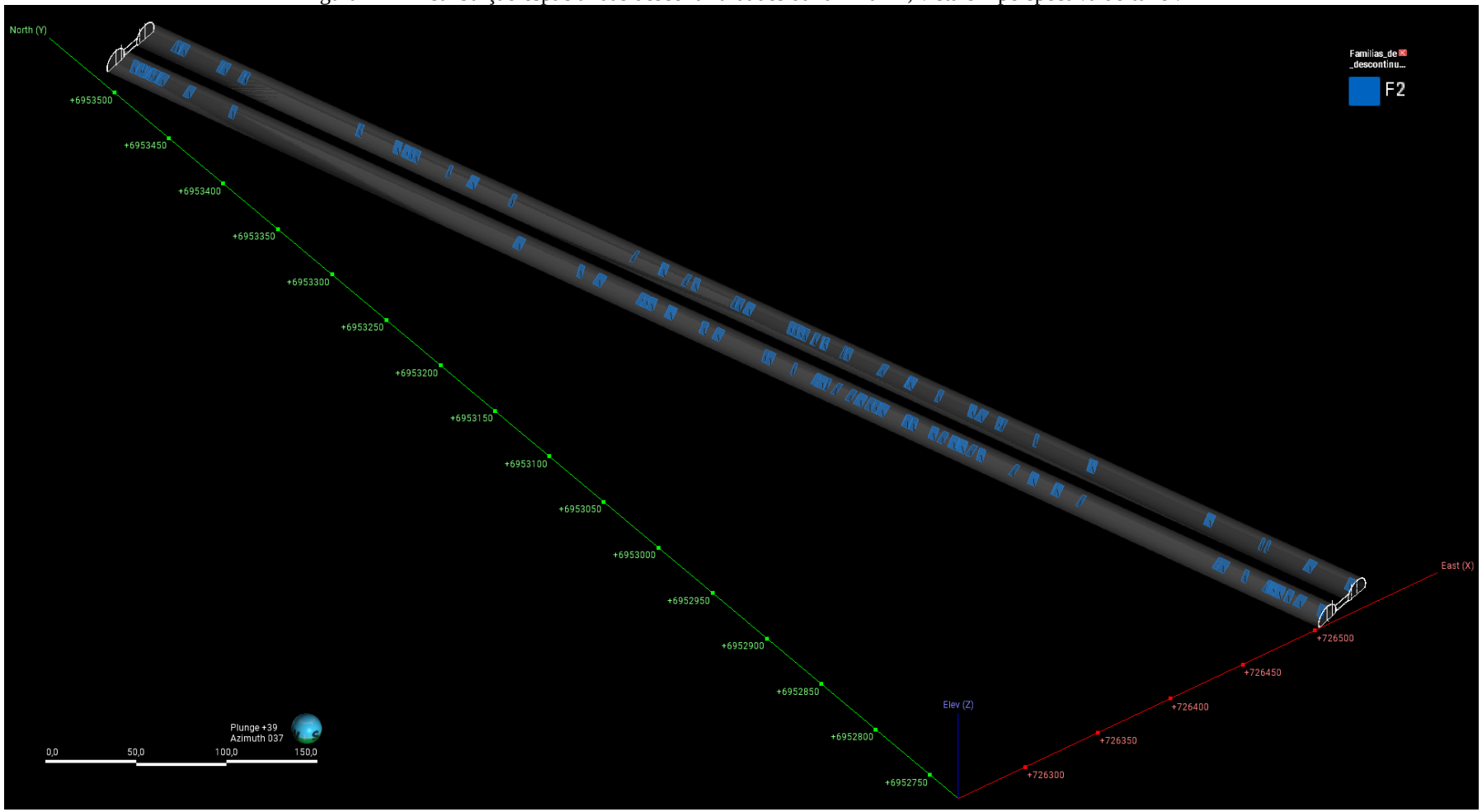
Após a inserção dos dados estruturais no LeapFrog Works, as atitudes foram classificadas seguindo a delimitação das principais famílias de descontinuidades determinadas na etapa anterior. Observa-se que a família F1 (Figura 23), além de uma maior expressividade, também apresenta uma distribuição mais constante ao longo do comprimento do túnel. Isso é evidenciado principalmente nas regiões próximas aos emboques. Quanto à família F2 (Figura 24), é visto concentrações maiores no centro do túnel e diretamente nos emboques, e menor nas porções entre estas duas. A família F3 (Figura 25) ocorre de maneira agrupada e com grandes intervalos sem nenhuma medida, se concentrando principalmente no emboque sul e no centro do túnel.

Figura 23 – Distribuição espacial das descontinuidades da família F1, vista em perspectiva do túnel.



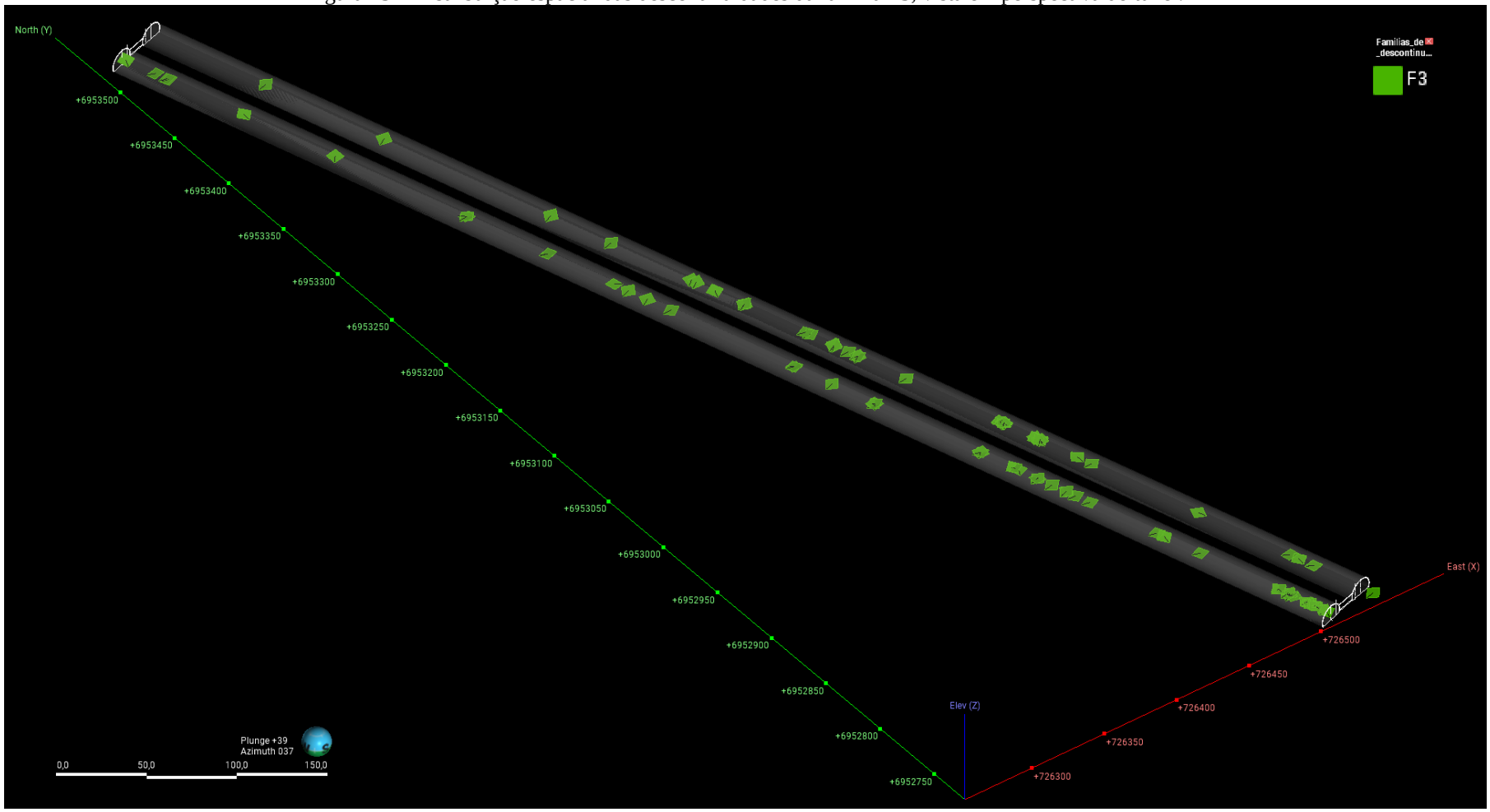
Fonte: Autor (2024)

Figura 24 – Distribuição espacial das descontinuidades da família F2, vista em perspectiva do túnel.



Fonte: Autor (2024)

Figura 25 – Distribuição espacial das descontinuidades da família F3, vista em perspectiva do túnel.

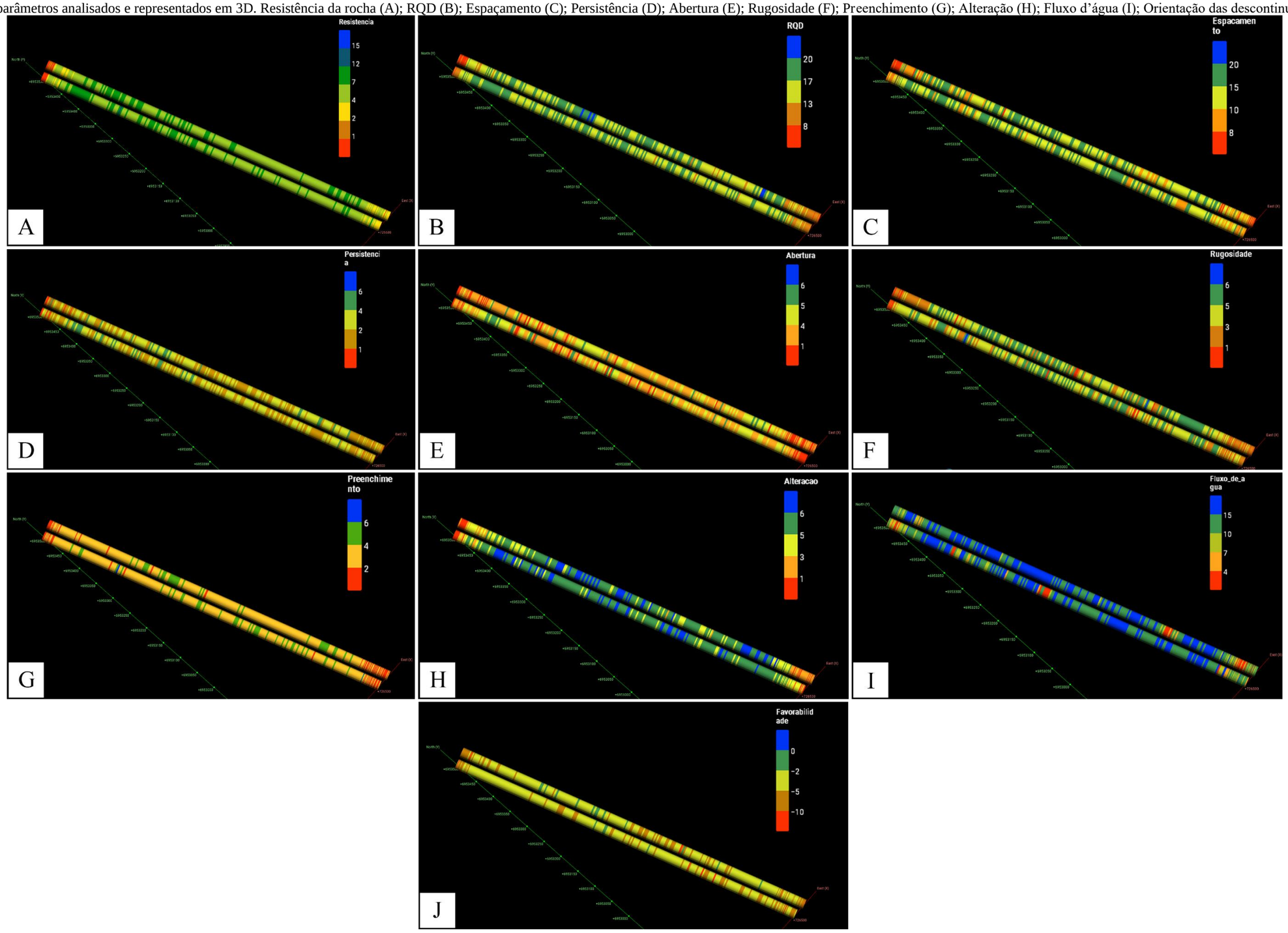


Fonte: Autor (2024)

6.3 COMPARTIMENTAÇÃO GEOMECÂNICA

A seguir serão apresentados os valores dos parâmetros compilados e inseridos no modelo. As análises serão realizadas a partir de vistas retiradas do LeapFrog Works, onde estes dados foram inseridos para demonstrar sua distribuição espacial dos mesmos. Para proporcionar ao leitor uma visualização comparativa, a imagem da Figura 26 representa todos os parâmetros lado à lado. Em seguida, são apresentados os parâmetros individualmente e em maior detalhe.

Figura 26: Todos os parâmetros analisados e representados em 3D. Resistência da rocha (A); RQD (B); Espaçamento (C); Persistência (D); Abertura (E); Rugosidade (F); Preenchimento (G); Alteração (H); Fluxo d'água (I); Orientação das descontinuidades (J).

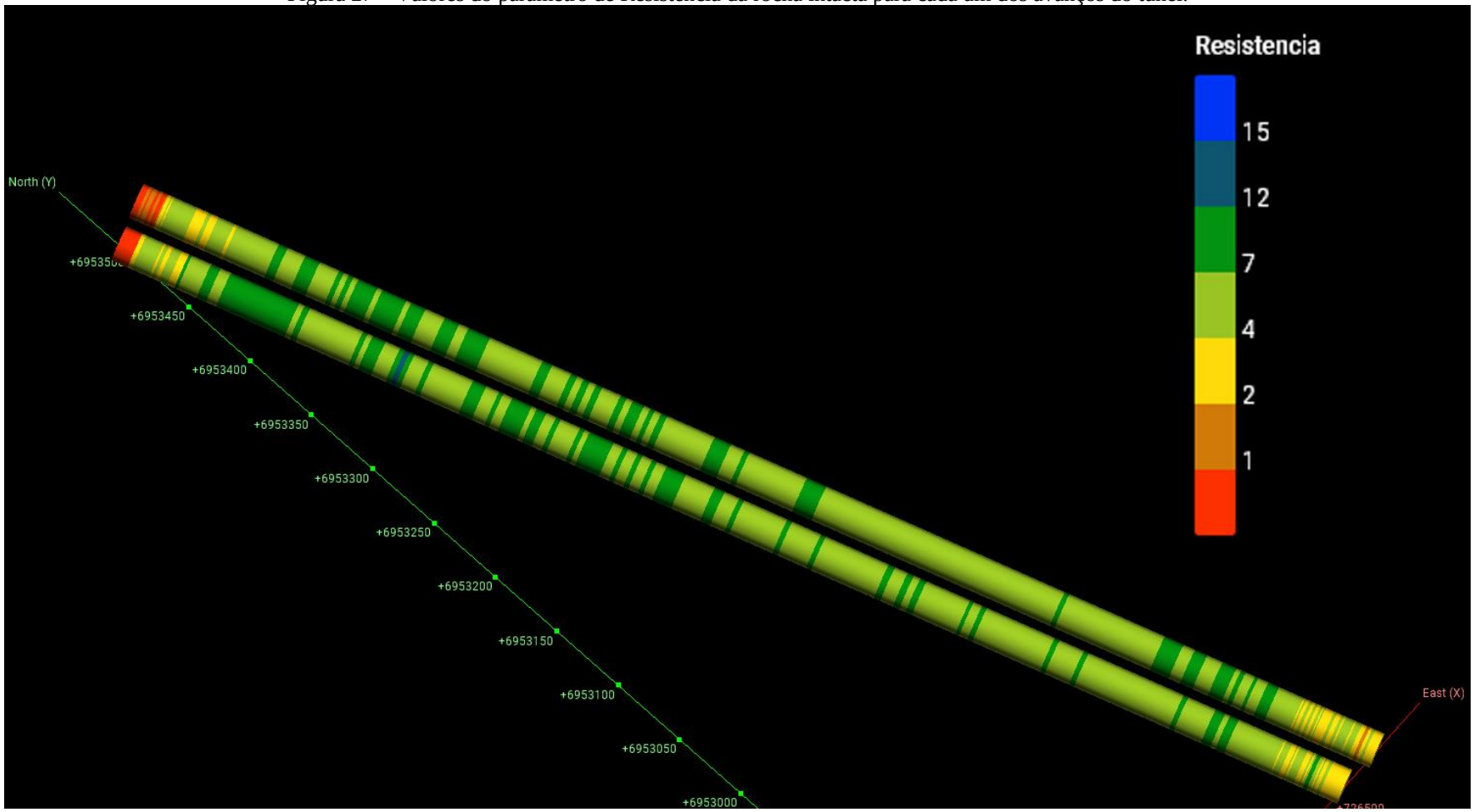


Fonte: Autor, 2024.

6.3.1 Resistência da rocha intacta

O material encontrado no maciço apresenta pontuações predominantes de 4 e 7 no parâmetro de resistência intacta, indicando resistências de 25 à 100 MPa. Estes valores se intercalam do emboque norte até o centro do túnel, mas apresentam intervalos maiores de pontuação 4 em direção ao emboque sul. Nas regiões próximas aos emboques do túnel estes valores caem, principalmente no emboque norte, ficando entre 2 e 0 (Figura 27).

Figura 27 – Valores do parâmetro de Resistência da rocha intacta para cada um dos avanços do túnel.

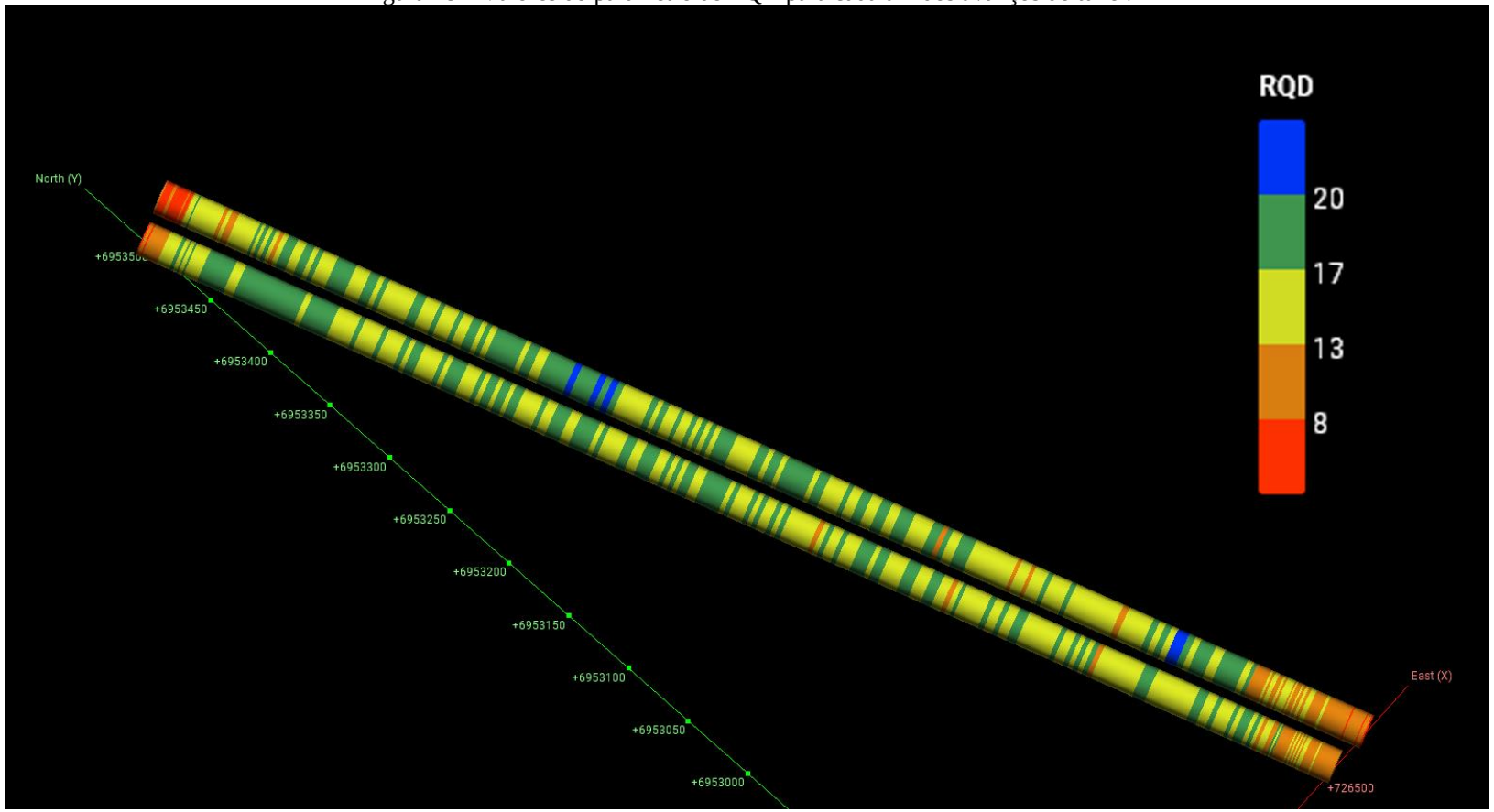


Fonte: Autor (2024)

6.3.2 RQD

As pontuações predominam em torno de 13 e 17, ou seja, um RQD estimado entre 50% e 90%, com alguns valores atípicos acima de 90%, apresentando intercalação frequente ao longo de toda extensão do túnel. As regiões dos emboques apresentam valores baixos de 8 à 3 (Figura 28).

Figura 28 – Valores do parâmetro de RQD para cada um dos avanços do túnel.

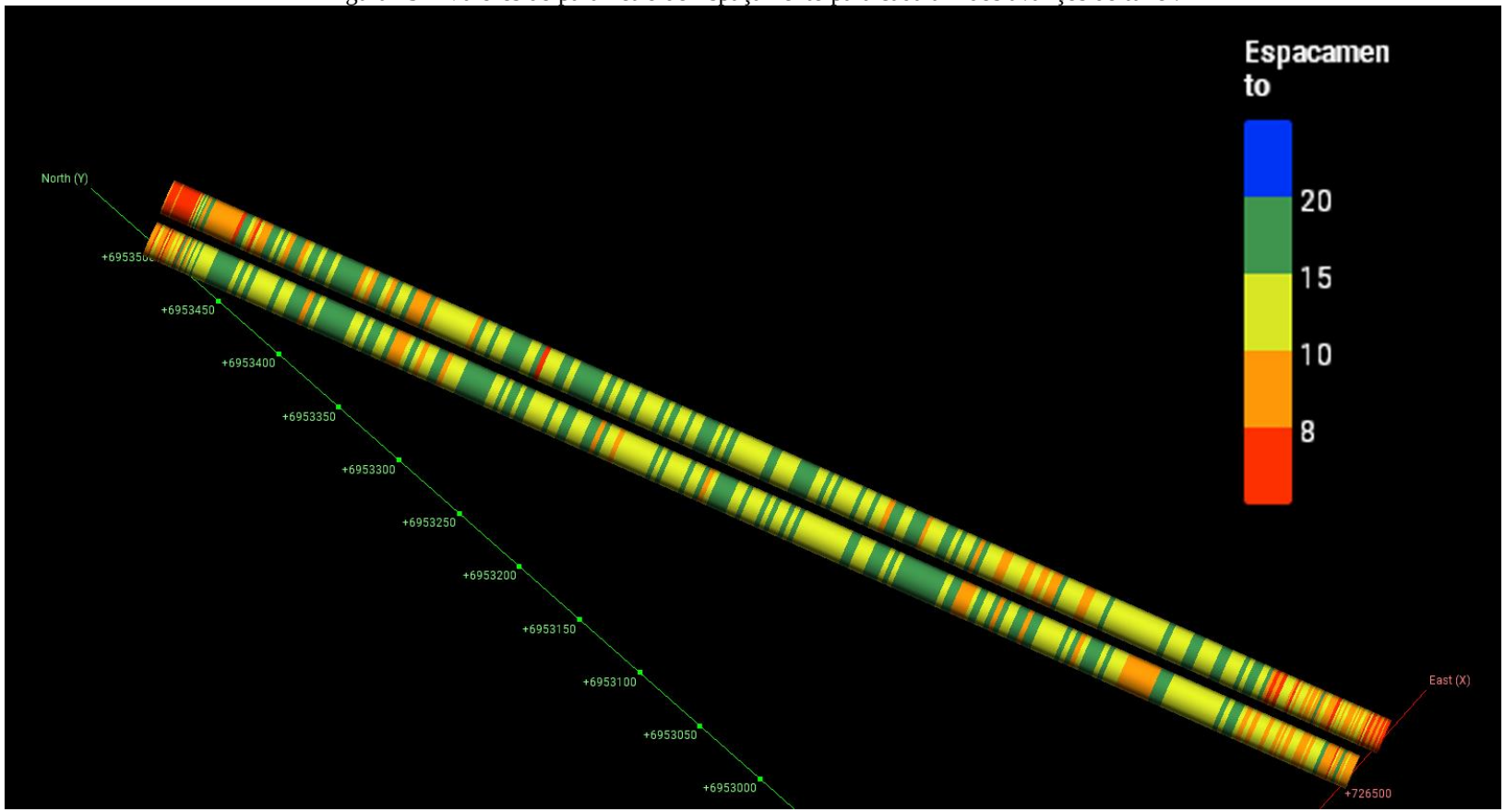


Fonte: Autor (2024)

6.3.3 Espaçamento das descontinuidades

Valores de 10 e 15 são os mais representativos, com valores mais baixos de 8 e 5 presentes esporadicamente nas regiões centrais do túnel. Os menores valores estão localizados nos emboques da pista norte (Figura 29).

Figura 29 – Valores do parâmetro de Espaçamento para cada um dos avanços do túnel.

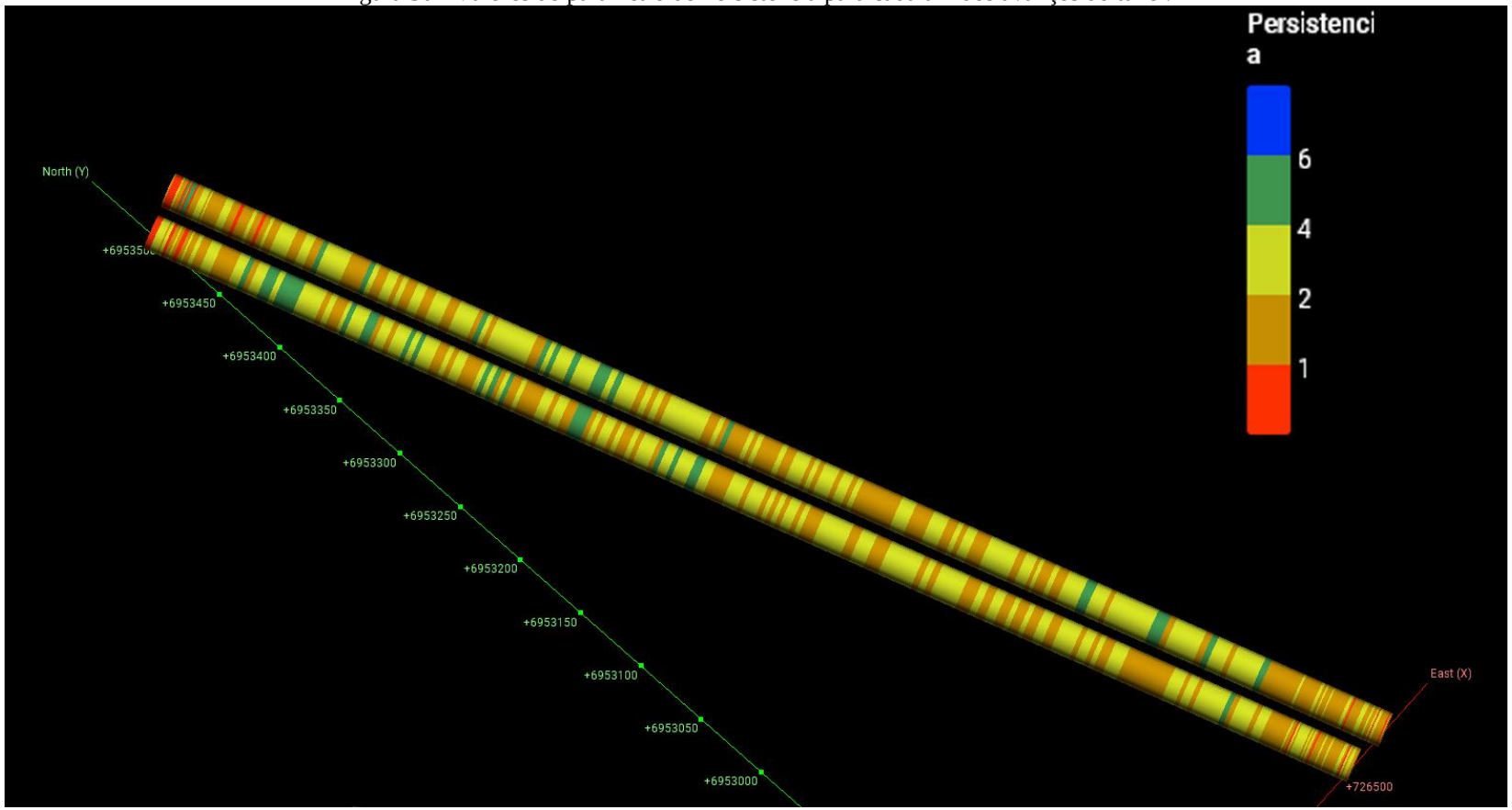


Fonte: Autor (2024)

6.3.4 Persistência

O maciço de modo geral demonstra valores baixos, com a pontuação mais alta sendo 4 e com baixa representatividade. Predomina uma alternância entre valores de 2 e 1 (Figura 30).

Figura 30 - Valores do parâmetro de Persistência para cada um dos avanços do túnel.

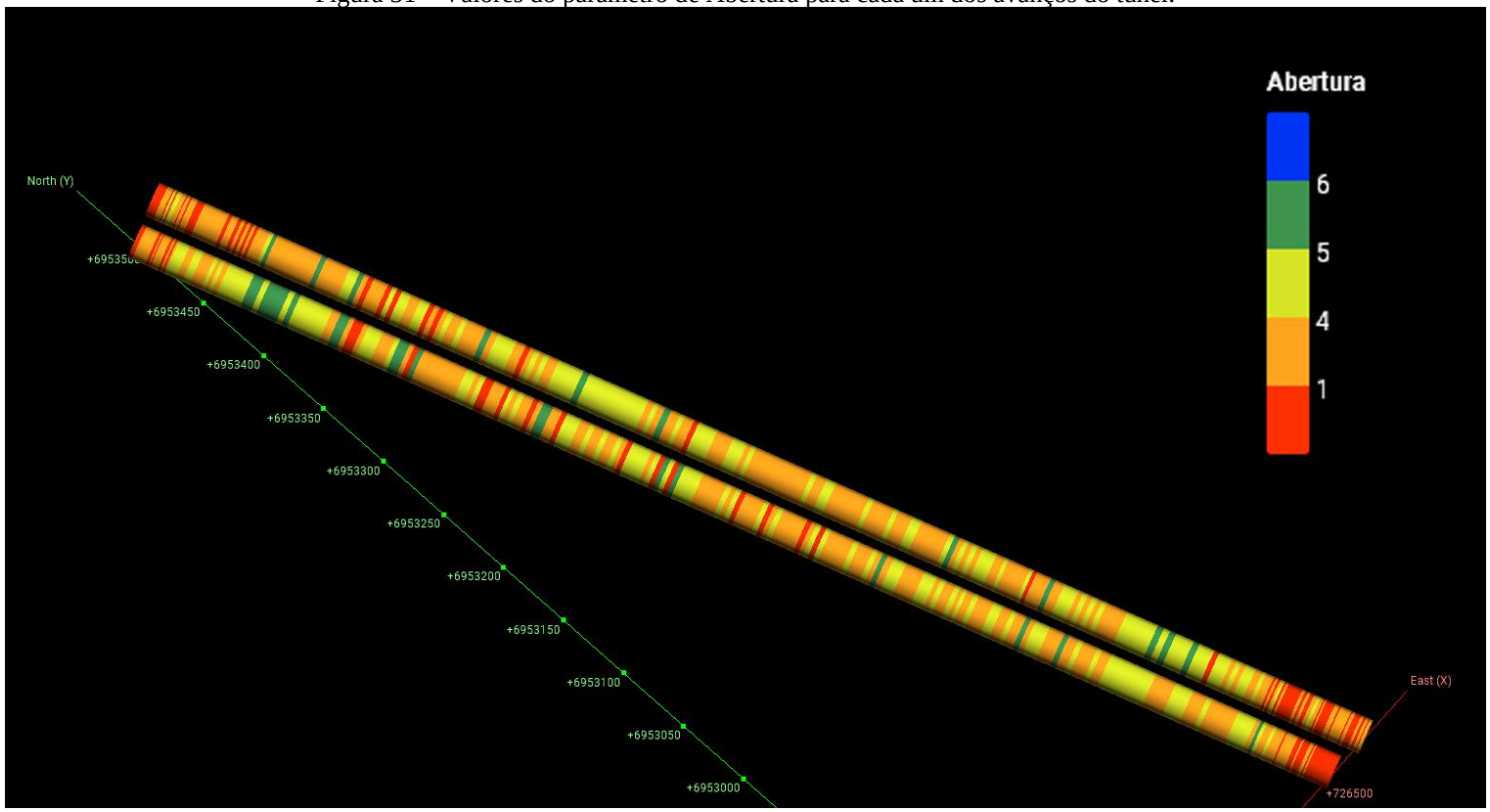


Fonte: Autor (2024)

6.3.5 Abertura

Reflete uma pontuação mediana à baixa em quase todo maciço. Observa-se que as pontuações de 1 e 4 são predominantes, que incluem descontinuidades com 1 a 5 milímetros de abertura. Além disso, valores iguais a 0 aparecem nos emboques e, de forma esporádica, ao longo do desenvolvimento do túnel (Figura 31).

Figura 31 – Valores do parâmetro de Abertura para cada um dos avanços do túnel.

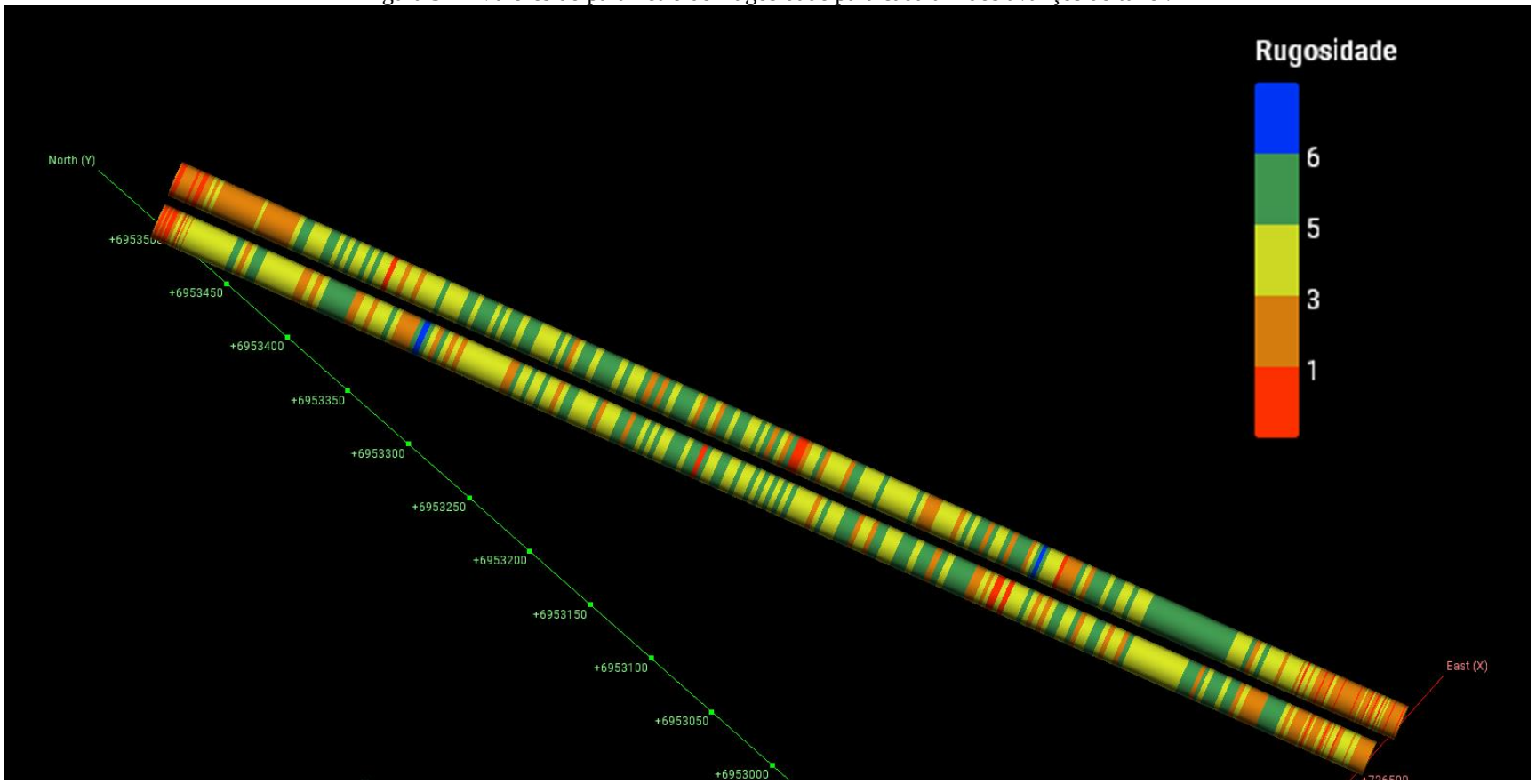


Fonte: Autor (2024)

6.3.6 Rugosidade

Predominam as pontuações de 3 e 5, indicando descontinuidades rugosas a levemente rugosas, e maiores quantidades descontinuidades planas nos emboques e esporadicamente no centro do túnel (Figura 32).

Figura 32 – Valores do parâmetro de Rugosidade para cada um dos avanços do túnel.

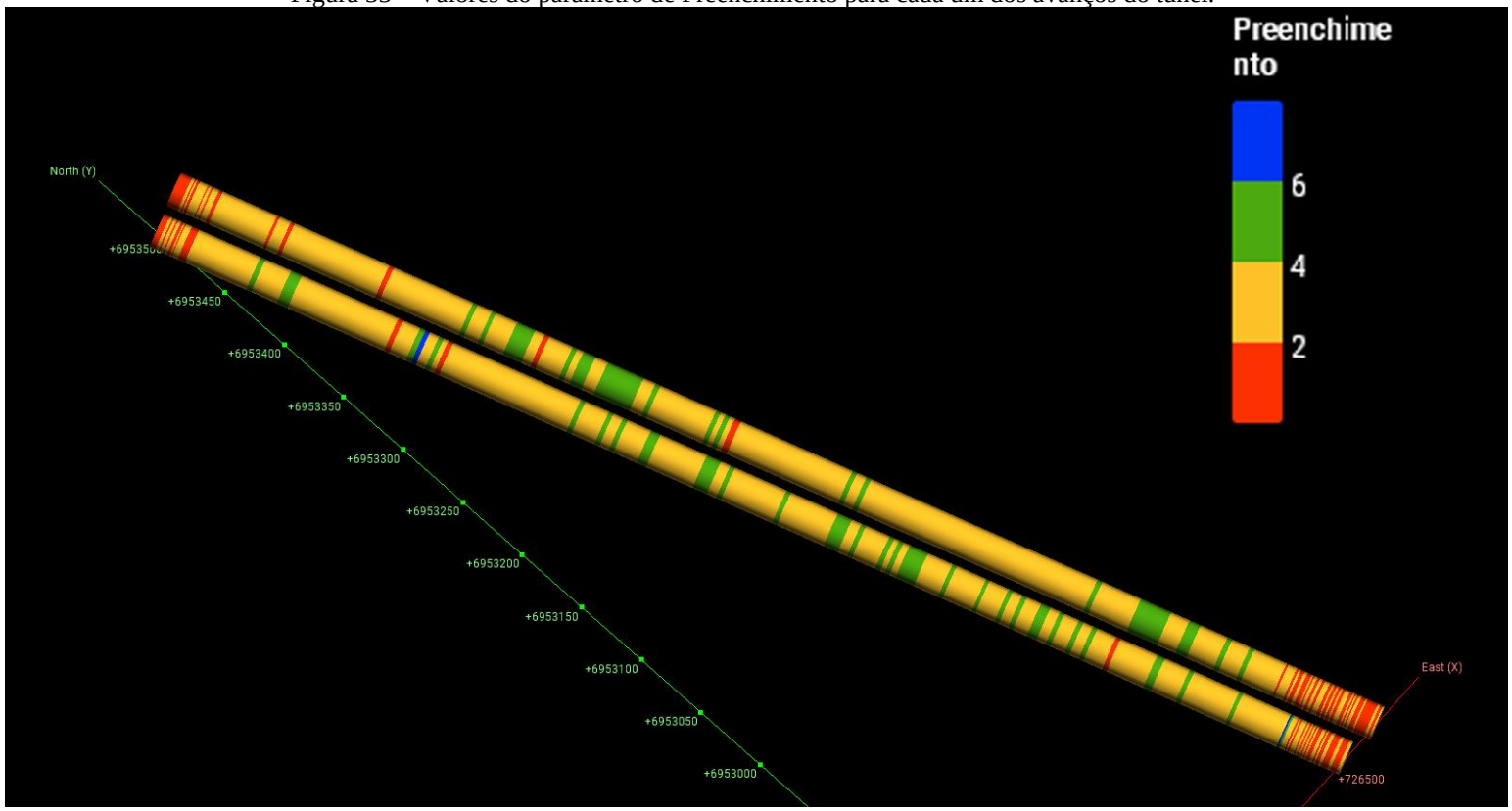


Fonte: Autor (2024)

6.3.7 Preenchimento

Tem-se um padrão contínuo de pontuação 2 em praticamente todo o túnel, periodicamente interrompido por pequenos intervalos de pontuação 4. Nos emboques se concentram os valores mais baixos, evidenciando maior presença de material mole preenchendo as descontinuidades (Figura 33).

Figura 33 – Valores do parâmetro de Preenchimento para cada um dos avanços do túnel.

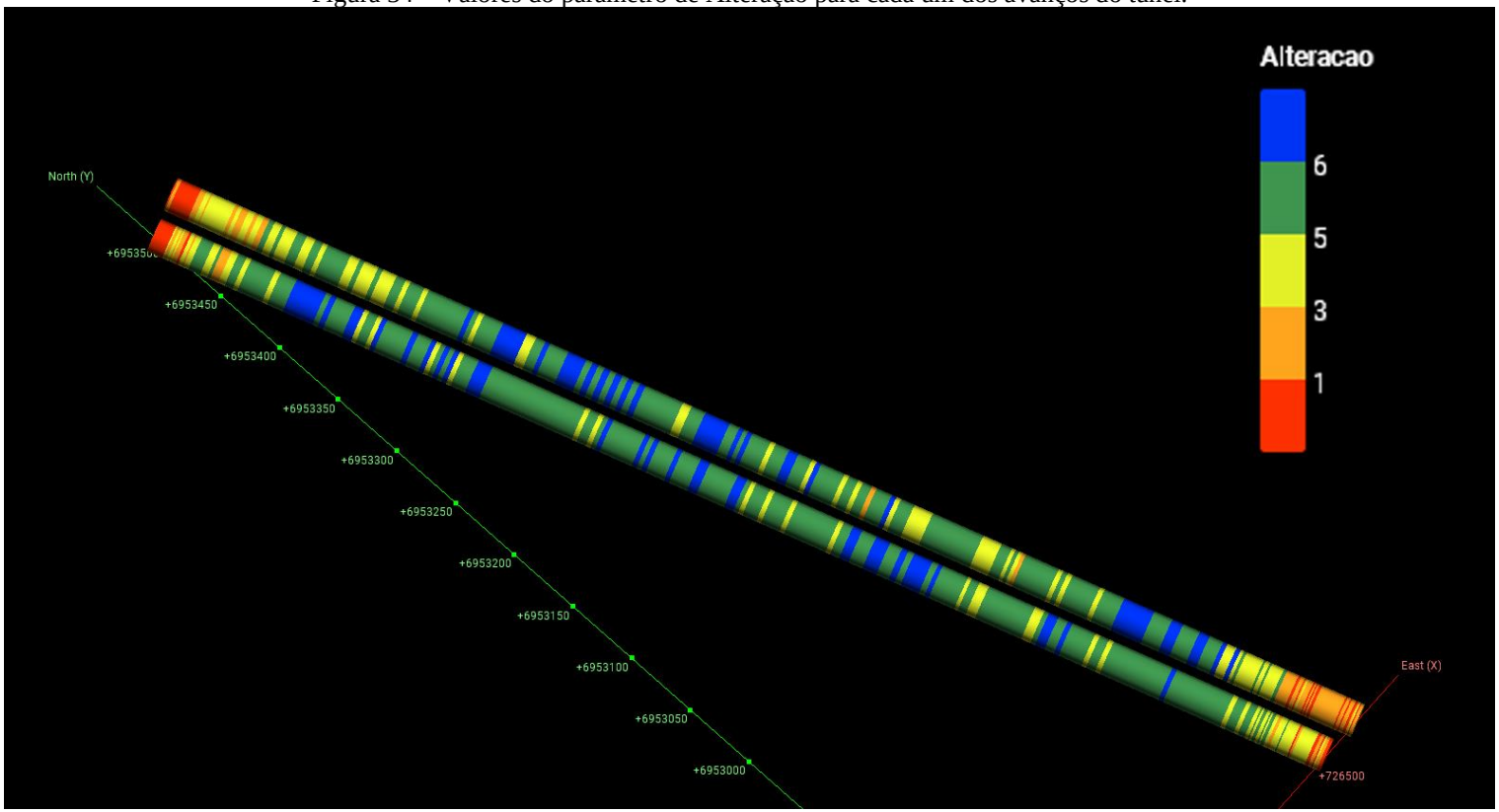


Fonte: Autor (2024)

6.3.8 Alteração

Quanto à alteração das descontinuidades observa-se que, ainda que em alternância, os valores se concentram nos intervalos médios à superiores do parâmetro, caracterizados por material moderadamente alterado à rocha sã. Novamente, os emboques apresentam as pontuações mais baixas, principalmente no emboque norte (Figura 34).

Figura 34 – Valores do parâmetro de Alteração para cada um dos avanços do túnel.

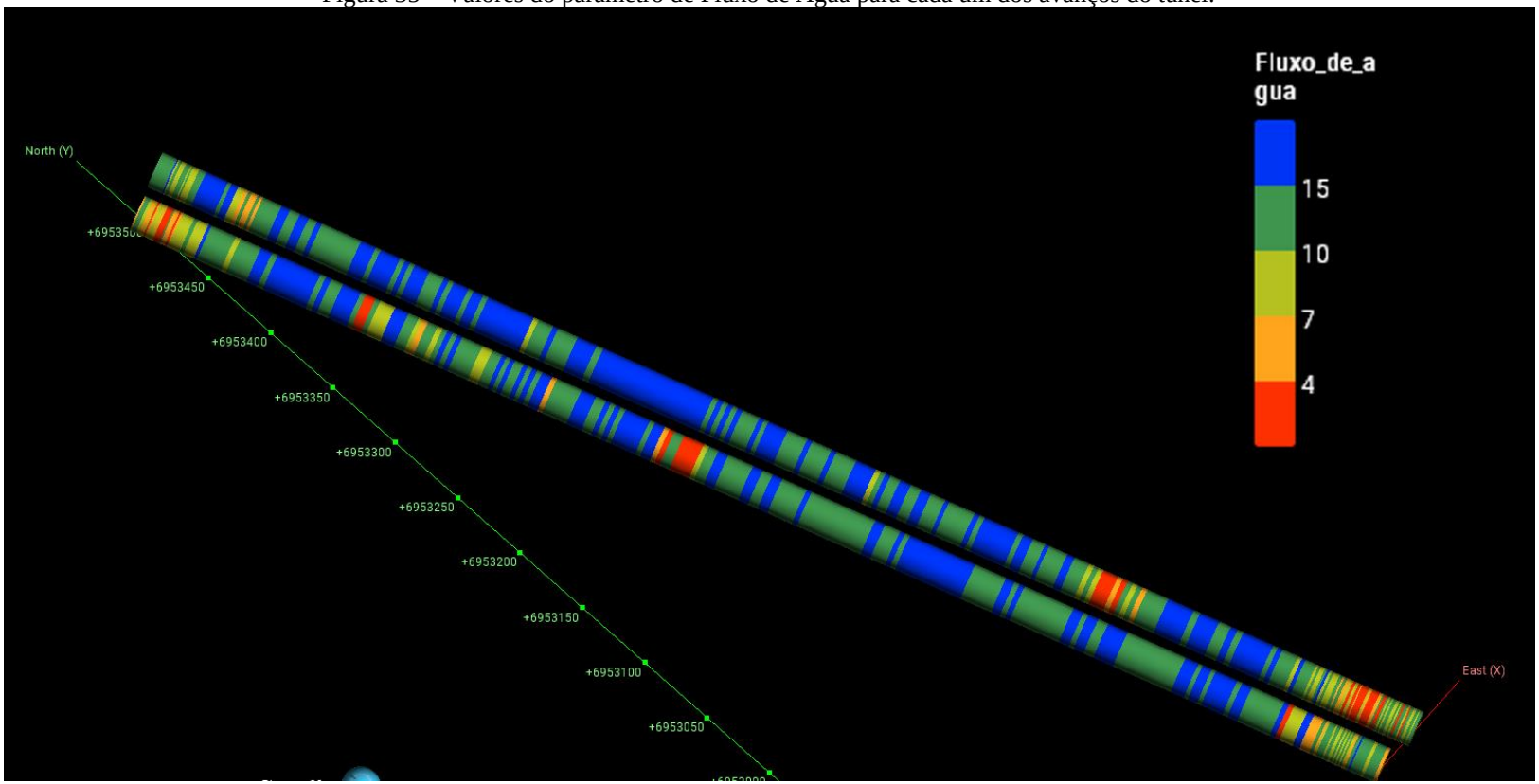


Fonte: Autor (2024)

6.3.9 Fluxo de Água

Em geral o maciço apresenta valores altos, com boa parte dos avanços sendo em condições secas à úmidas. Ao contrário dos parâmetros anteriores, as pontuações baixas para fluxo de água não estão restritas apenas aos emboques e, mesmo que em parcelas menores, há intervalos nas porções centrais do túnel com estes valores atípicos (Figura 35).

Figura 35 – Valores do parâmetro de Fluxo de Água para cada um dos avanços do túnel.

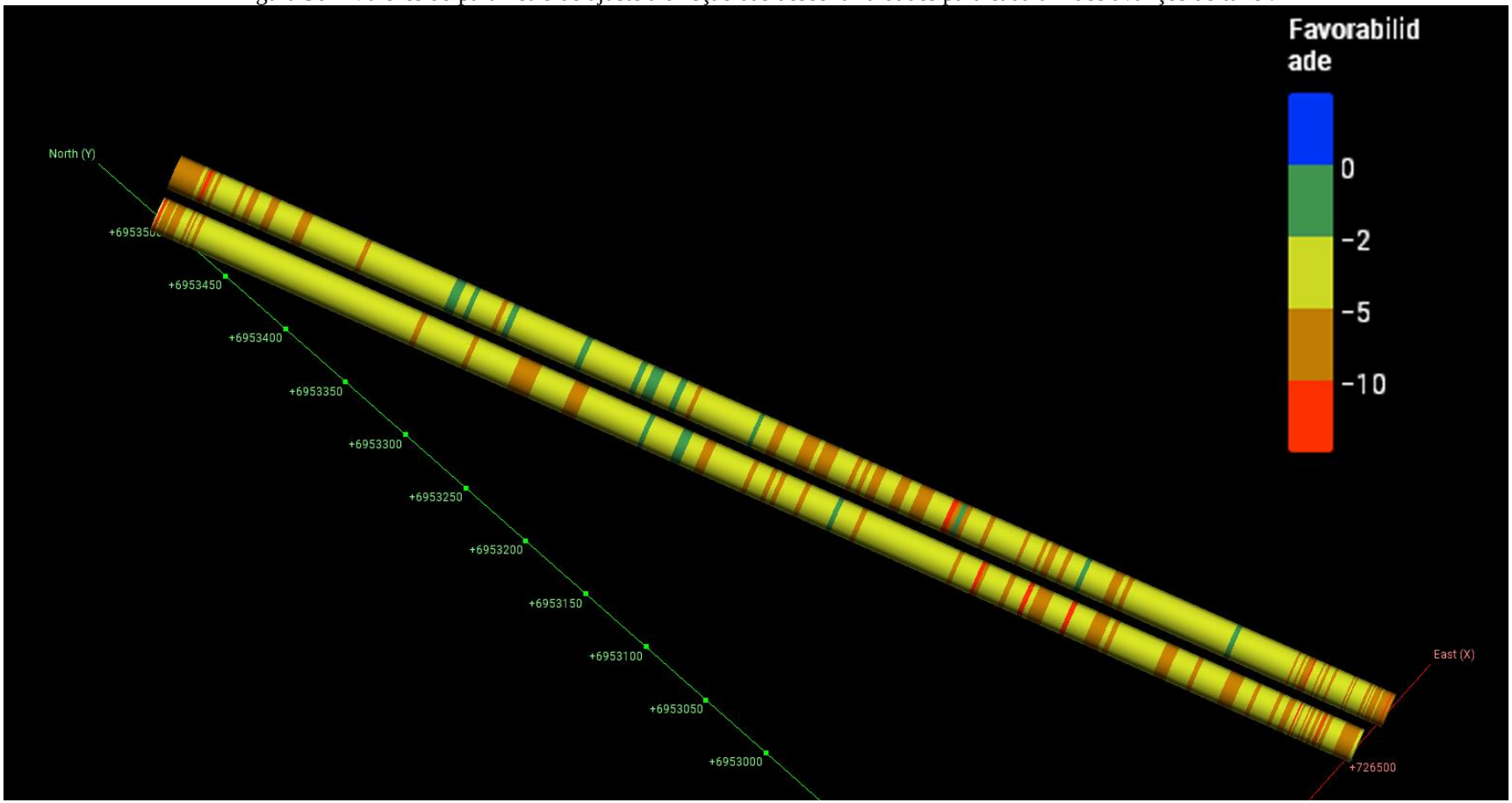


Fonte: Autor (2024)

6.3.10 Favorabilidade da direção das descontinuidades

Observa-se que a maioria dos avanços teve valores medianos no ajuste para a pontuação final. As condições encontradas foram classificadas principalmente como razoáveis à desfavoráveis (Figura 36)

Figura 36 – Valores do parâmetro de ajuste à direção das descontinuidades para cada um dos avanços do túnel.



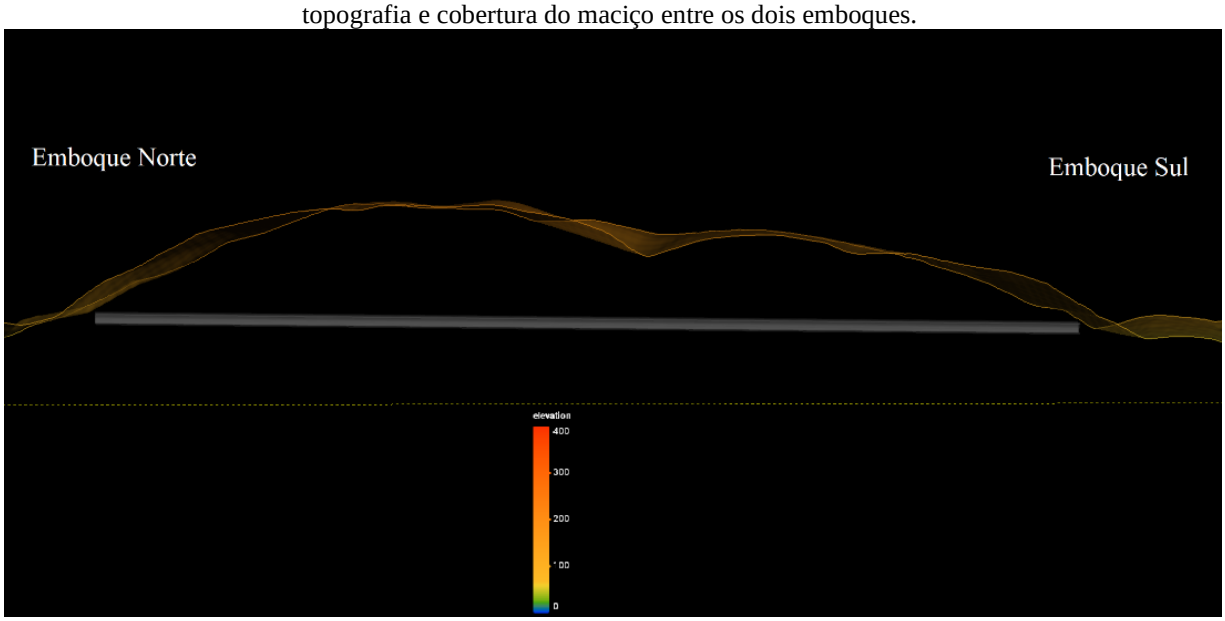
Fonte: Autor (2024)

6.3.11 Condicionantes geológicos

É possível observar que, como esperado, as regiões dos emboques do túnel apresentam pontuações baixas em todos os parâmetros avaliados. Esse comportamento é atribuído ao fato de que os emboques estão localizados diretamente no manto de alteração do maciço rochoso do morro, uma zona caracterizada por material de comportamento mecânico inferior, em comparação às porções centrais do túnel. Parâmetros como RQD, resistência da rocha intacta e grau de alteração, que são diretamente proporcionais à integridade da rocha sã. Contudo, observa-se uma variação nos padrões dos valores dos parâmetros entre os dois emboques. No emboque norte, as pontuações majoritariamente são muito baixas, mas essa condição se estende por uma curta distância. Em contrapartida, o emboque sul apresenta valores relativamente mais altos que o emboque norte, embora estes se mantenham constantes por uma extensão mais longa.

Com o conjunto de informações do presente estudo, não é possível determinar de forma conclusiva a causa desse comportamento diferenciado entre os emboques. Entretanto, ao observar a morfologia do relevo no emboque sul, pode-se especular que tenha permitido um maior acúmulo e espessamento do saprólito, aprofundando-o em direção ao centro do morro. Além disso, nota-se a presença de um lineamento que atravessa diretamente a área do emboque norte (Figura 38), criando um curso de drenagem superficial que provavelmente intensifica o intemperismo do maciço naquela região, promovendo uma alteração mais acentuada e uma redução da integridade da rocha.

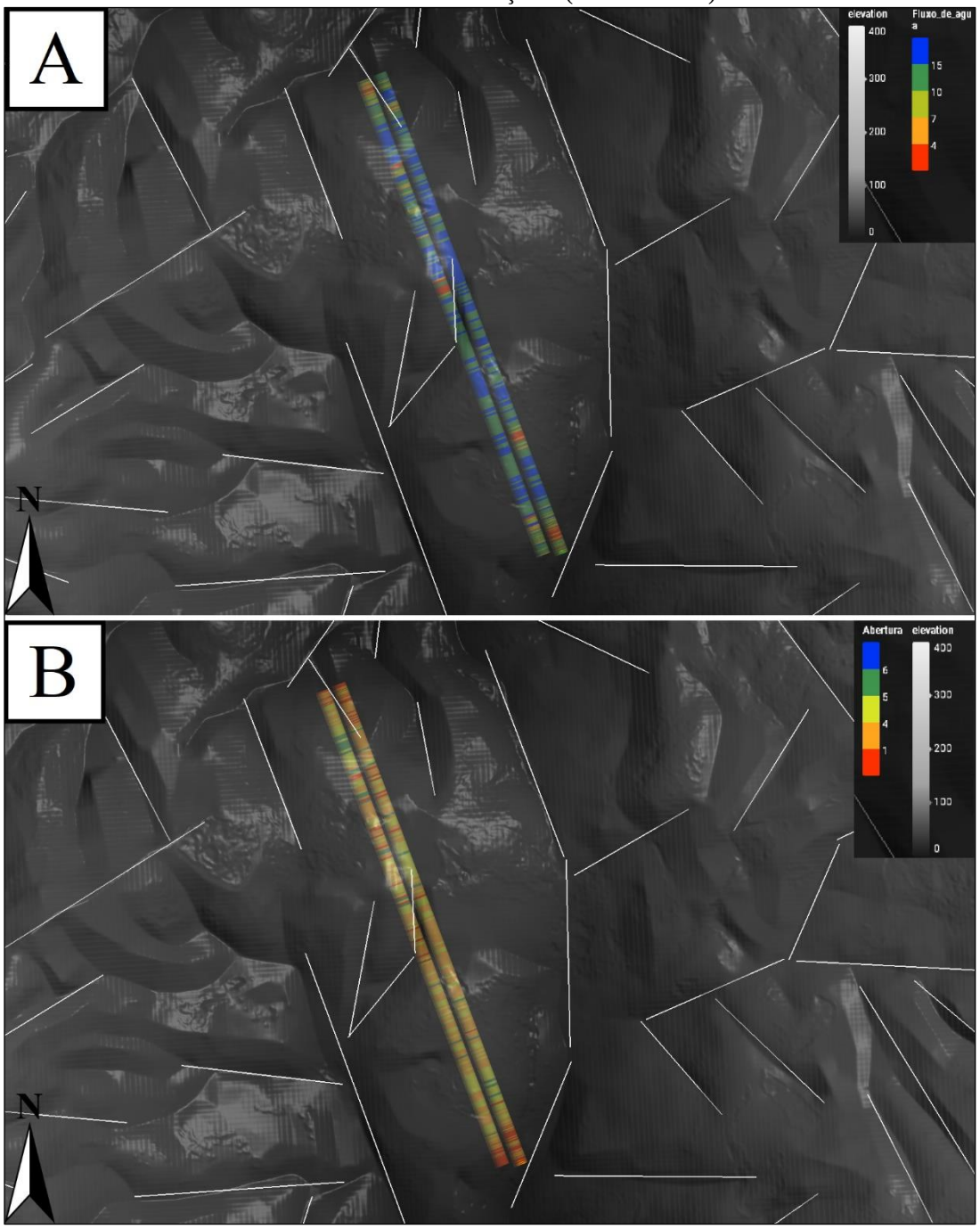
Figura 37 – Perfil longitudinal do Morro da Rússia, incluindo o traçado do Túnel 4, mostrando a diferença na topografia e cobertura do maciço entre os dois emboques.



Fonte: Autor (2024)

No parâmetro de Fluxo de Água, é visto que há alguns avanços na região central da pista sul com valores baixos anômalos, delimitados por frentes de pontuação alta (Figura 35). Uma condição relativamente similar também é encontrada em regiões próximas no parâmetro de abertura (Figura 31). Ao analisar o padrão de lineamentos presentes no maciço, nota-se que há presença de cursos de drenagem retilíneos orientados de maneira que cruzam o traçado do túnel (Figura 38). Este lineamento também pode ser visto na Figura 37, marcado por um baixo estrutural no centro do perfil do morro.

Figura 38 – Compartimentação do túnel em parâmetros de Fluxo de Água (A) e Abertura (B), juntamente ao MDE e os lineamentos traçados (linhas brancas).



Fonte: Autor (2024)

A presença desse lineamento pode indicar uma provável causa para a redução dos valores observados nessa região do túnel. Considerando que o lineamento representa uma zona de fraqueza no maciço, é plausível que ele inclua descontinuidades de maior expressividade, as quais atravessam o maciço e interceptam o traçado do túnel nesse setor. Além disso, por ser

uma feição que condiciona a drenagem do morro, é justificável afirmar que ocorre maior infiltração de água nas descontinuidades inclusas no lineamento, favorecendo a condução de água em direção ao maciço naquela região.

Concomitantemente, há hipóteses que podem levar a conclusões contrárias. Primeiro, não há informações suficientes para verificar o mergulho das estruturas desse lineamento, portanto o mesmo pode não cruzar o túnel na região suposta. Outro fator é a baixa correlação entre os valores de fluxo d'água, abertura e alteração das descontinuidades naquela região (Figura 31, Figura 34 e Figura 35). Considerando que os dois primeiros apresentam valores reduzidos, seria esperado que o parâmetro de alteração apresentasse também pontuações baixas, uma vez que a infiltração constante de água tende a promover a ação do intemperismo químico nas descontinuidades.

6.4 ANÁLISE DA PONTUAÇÃO RMR E CLASSES GEOMECÂNICAS

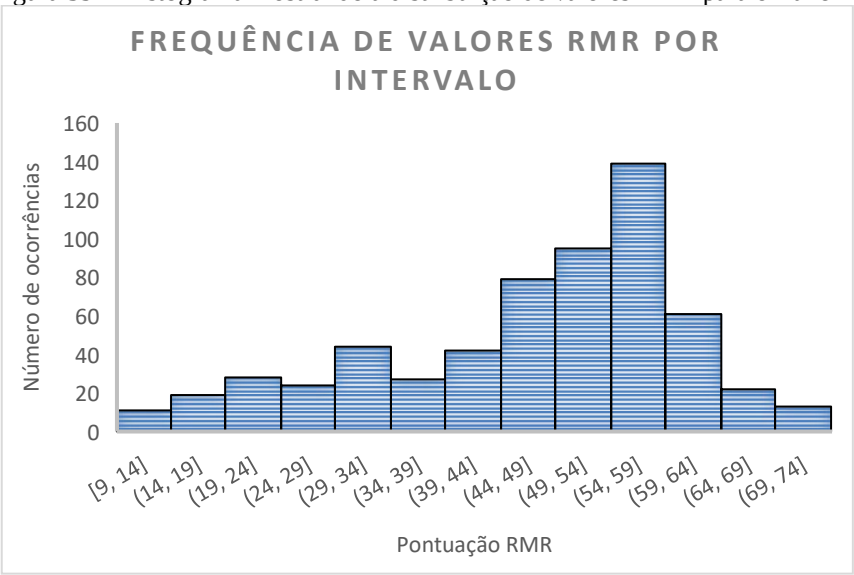
Analisando estatisticamente os valores das pontuações RMR para todos os avanços, observa-se que o maciço apresenta qualidade normal, ou seja, é um maciço de Classe III em grande parte da extensão do Túnel 4, conforme a Tabela 2 e Figura 39. Além disso, não foi observado condições de qualidade de maciço em Classe I, com o maior valor RMR encontrado sendo 74.

Tabela 2: Estatística geral dos valores RMR para todo o Túnel 4.

	Média	**Desvio Padrão**	**Moda**
Pontuação RMR	47,50	14,01	56

Fonte: Autor (2024)

Figura 39 – Histograma mostrando a distribuição de valores RMR para o Túnel 4.



Fonte: Autor (2024)

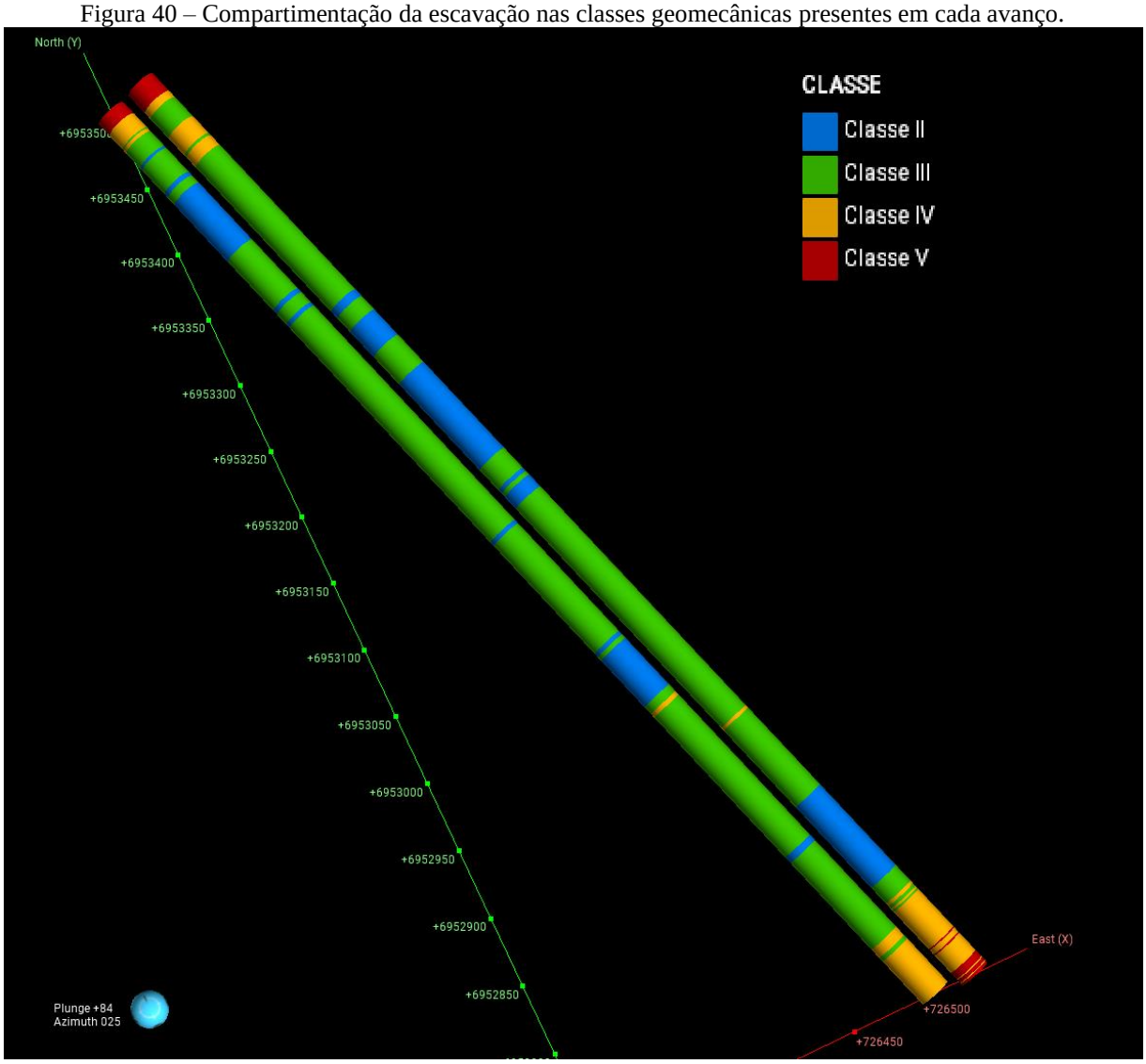
Com relação à distribuição destes valores, foi possível identificar que, como esperado, as regiões de piores qualidades de maciço são os emboques. No emboque norte, observa-se uma predominância de avanços em Classe V, com transição para Classe III em um trecho relativamente curto. Já o emboque sul apresenta menor frequência de avanços em Classe V, sendo caracterizado por uma ocorrência mais expressiva da Classe IV. Ao longo da extensão do túnel, verifica-se uma alternância entre as classes III e II, com a classe III predominando em intervalos contínuos extensos. A Classe II ocorre de forma intercalada, com intervalos menores e descontínuos, sendo mais representativa na pista norte. A Tabela 3 mostra a representatividade de cada uma das classes escavadas, e a Figura 40 mostra a disposição espacial das mesmas.

Tabela 3: Classes encontradas na escavação e seus comprimentos correspondentes, total e para as pistas individuais.

Classe do Maciço	Comprimento (PN) (m)	Comprimento (PS) (m)	Comprimento Total (m)
Classe V	28,64	10,79	39,43
Classe IV	92,54	65,94	158,48
Classe III	508,22	620,23	1128,45
Classe II	198,12	120,54	318,66

Fonte: Autor (2024).

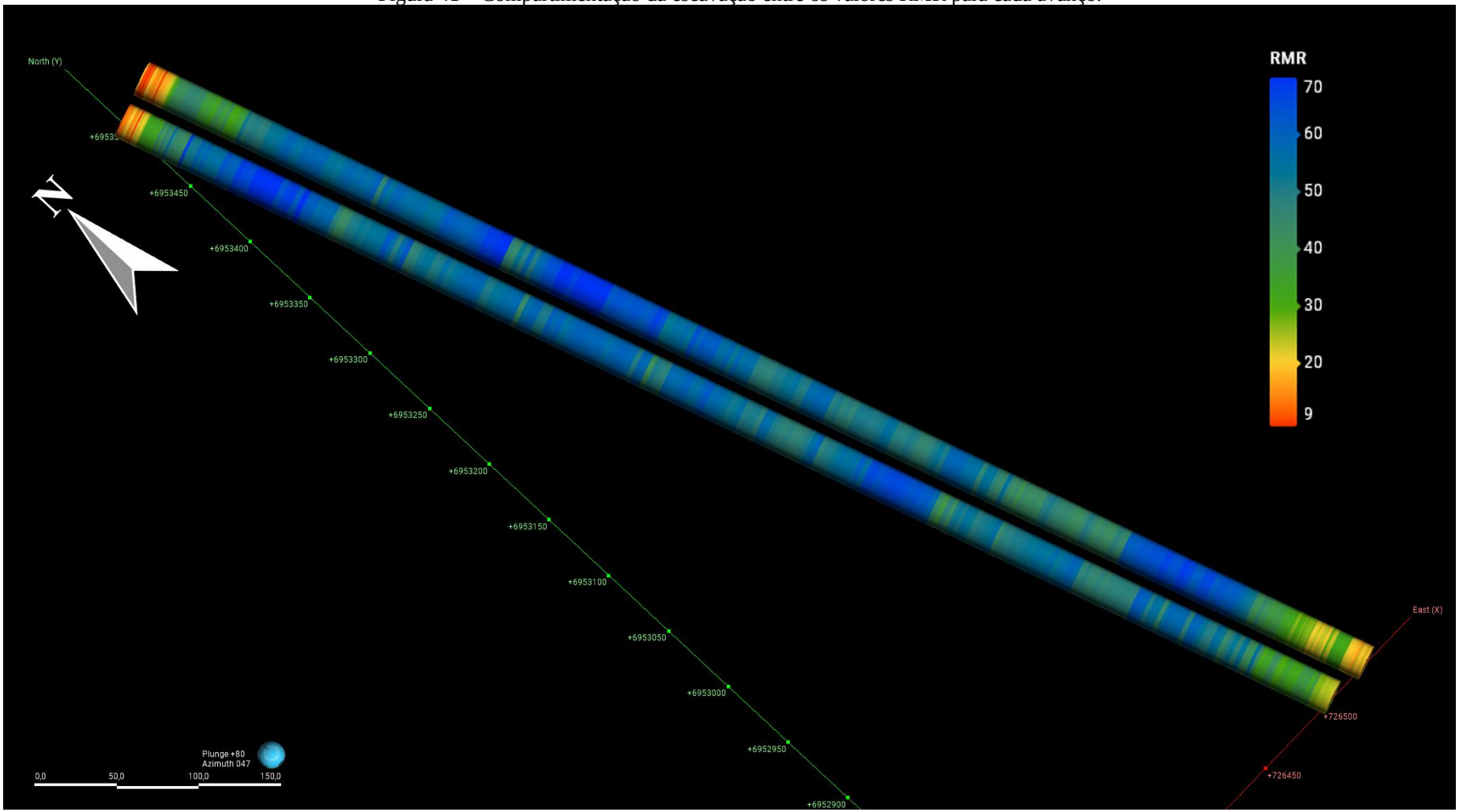
Figura 40 – Compartimentação da escavação nas classes geomecânicas presentes em cada avanço.



Fonte: Autor (2024)

Ao verificar a classificação do maciço em maior detalhe, através da compartimentação do túnel em suas pontuações RMR por avanço, nota-se que as classes IV e III apresentam valores mais uniformemente distribuídos, enquanto as classes V e II tendem a permanecer em intervalos relativamente mais restritos (Figura 41).

Figura 41 – Compartimentação da escavação entre os valores RMR para cada avanço.



Fonte: Autor (2024)

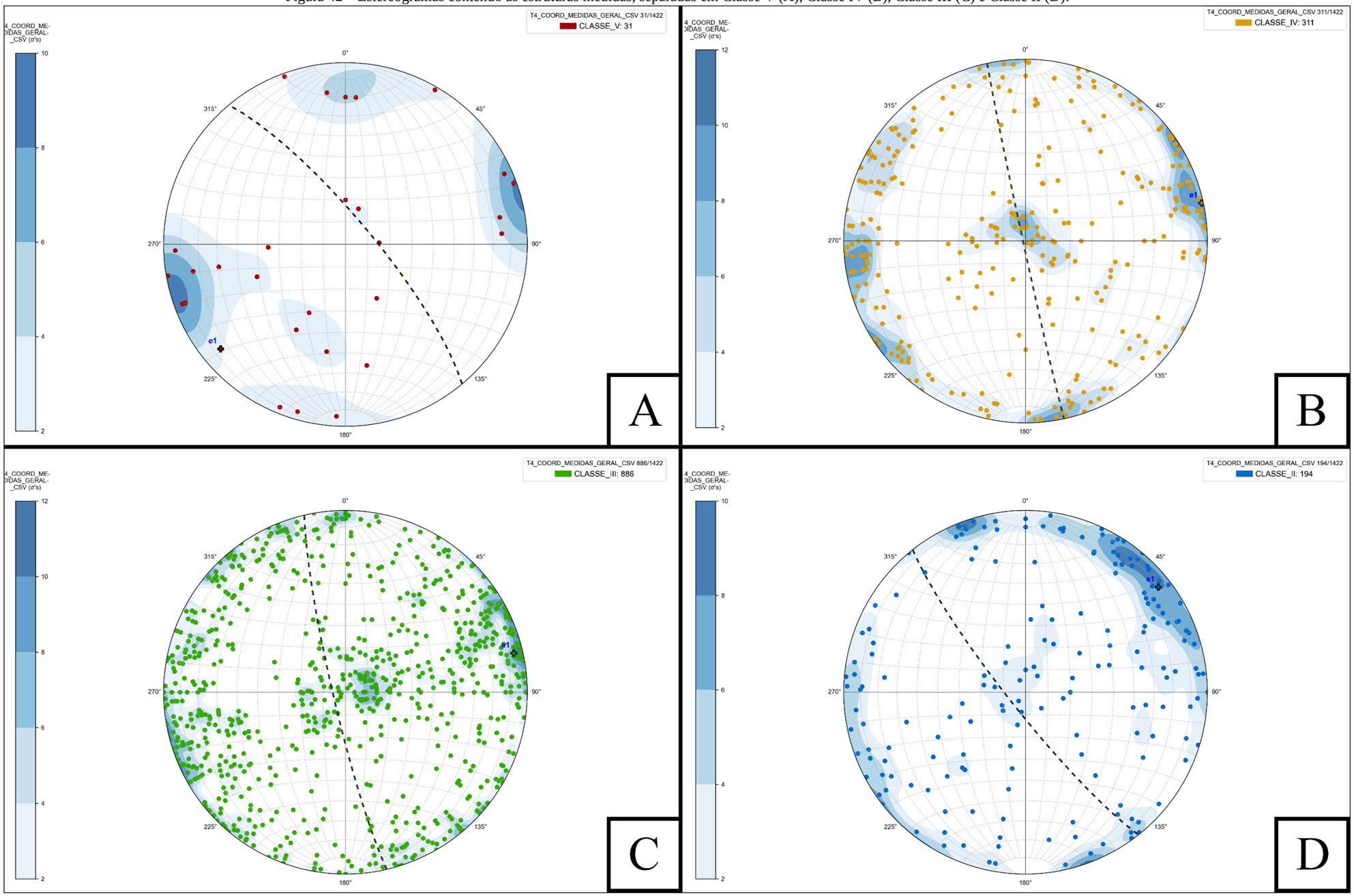
6.4.1 Análise estrutural das classes geomecânicas

Os resultados da análise no estereograma indicam que não há padrões estruturais exclusivos para cada classe geomecânica claramente definidos (Figura 42). Embora sutilmente perceptível, observa-se a presença difusa de ao menos uma das famílias de descontinuidades F1, F2 ou F3 em cada uma das quatro classes geomecânicas.

Essa ausência de correlação pode ser atribuída a fatores intrínsecos à classificação geomecânica aplicada. Classes mais amplas, como as classes II e III, cobrem extensões significativas ao longo do túnel, incluindo um número maior de estruturas que geram dispersão das orientações das descontinuidades no estereograma. Já a Classe V, por exemplo, tem baixa representatividade no maciço escavado, trazendo um menor número total de estruturas.

Outra possível causa dessa baixa correlação é o fato de que parâmetros relacionados à natureza do material, como alteração e resistência da rocha intacta, e aos aspectos qualitativos das descontinuidades (rugosidade, abertura, fluxo d'água, etc.) contribuíram de forma mais significativa para a determinação das classes do maciço do que o parâmetro de ajuste à direção das descontinuidades, o qual é diretamente ligado com as atitudes das estruturas medidas.

Figura 42 – Estereogramas contendo as estruturas medidas, separadas em Classe V (A), Classe IV (B), Classe III (C) e Classe II (D).



Fonte: Autor (2024).

6.4.2 Distribuição dos valores dos parâmetros RMR nas classes geomecânicas

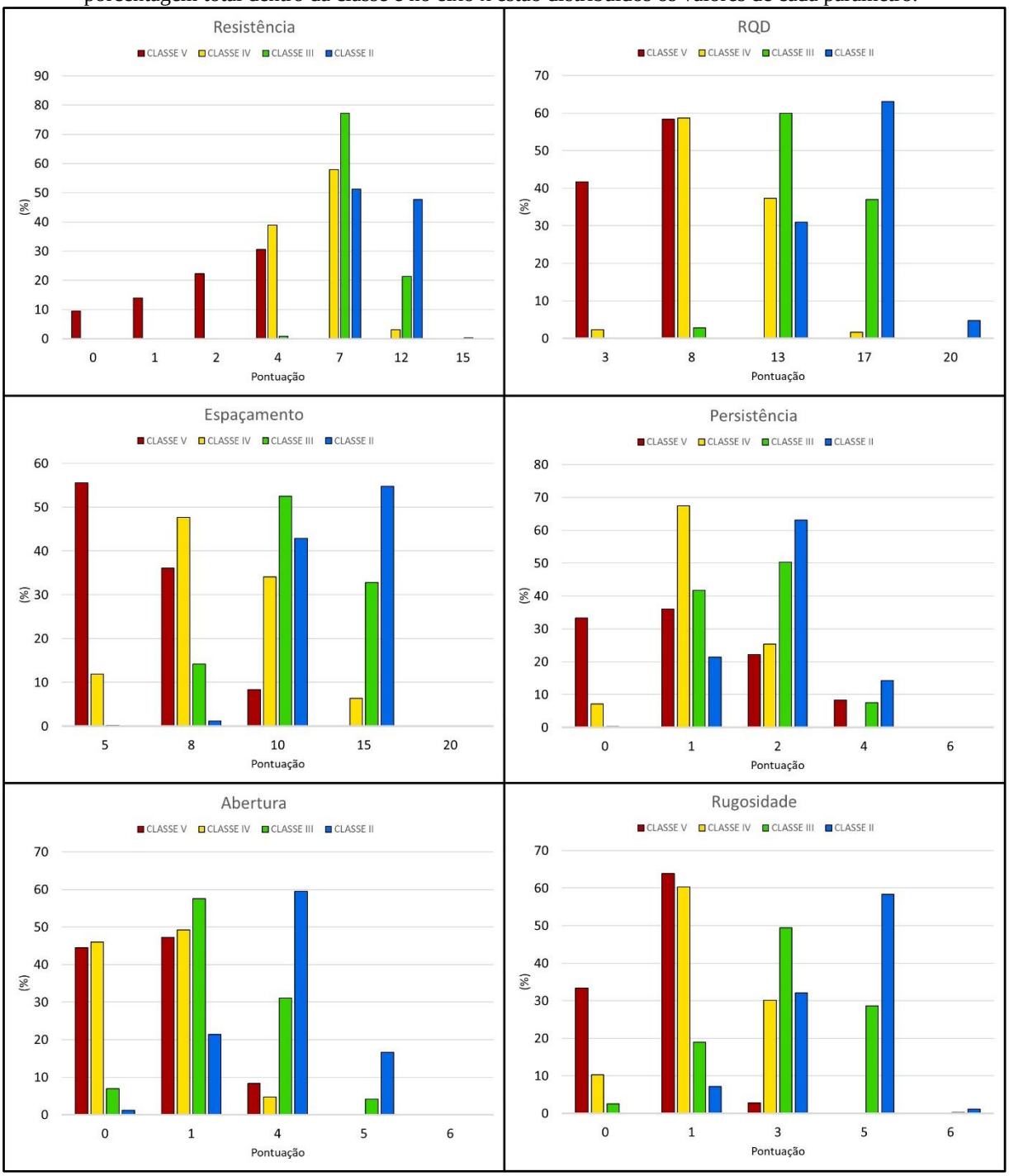
Os gráficos a seguir representam a distribuição dos valores dos parâmetros do RMR para as quatro classes geomecânicas, onde o eixo y corresponde à porcentagem que cada pontuação teve dentro dos parâmetros individuais (Figura 43 e Figura 44). Os dados foram estruturados desta forma para atenuar a influência da significativa discrepância na quantidade de dados entre as diferentes classes.

A Classe V de modo geral, como esperado, possui a maior representatividade nos valores baixos em todos os 10 parâmetros do RMR. Os parâmetros que mais refletem essa baixa qualidade são a resistência da rocha intacta, o RQD e o grau de alteração, que tendem a atingir apenas as pontuações baixas nessa classe. Os parâmetros de espaçamento, preenchimento, abertura, rugosidade e o ajuste da direção das descontinuidades apresentam valores baixos, com uma tendência a valores intermediários. Valores ligeiramente mais altos são observados para os parâmetros de persistência das descontinuidades e infiltração d'água.

As classes IV e III representam segmentos intermediários da classificação geomecânica, com parâmetros que apresentam maior variação e dispersão. A Classe IV abrange valores geralmente medianos e raramente altos, e apresenta pontuações baixas nos parâmetros de abertura e infiltração d'água. Já a Classe III, embora também mostre uma distribuição ampla, tende a alcançar pontuações mais elevadas nos parâmetros de alteração, RQD, resistência e infiltração d'água, sugerindo uma qualidade estrutural superior. No entanto, ambas as classes ainda exibem valores relativamente baixos em abertura e persistência das descontinuidades.

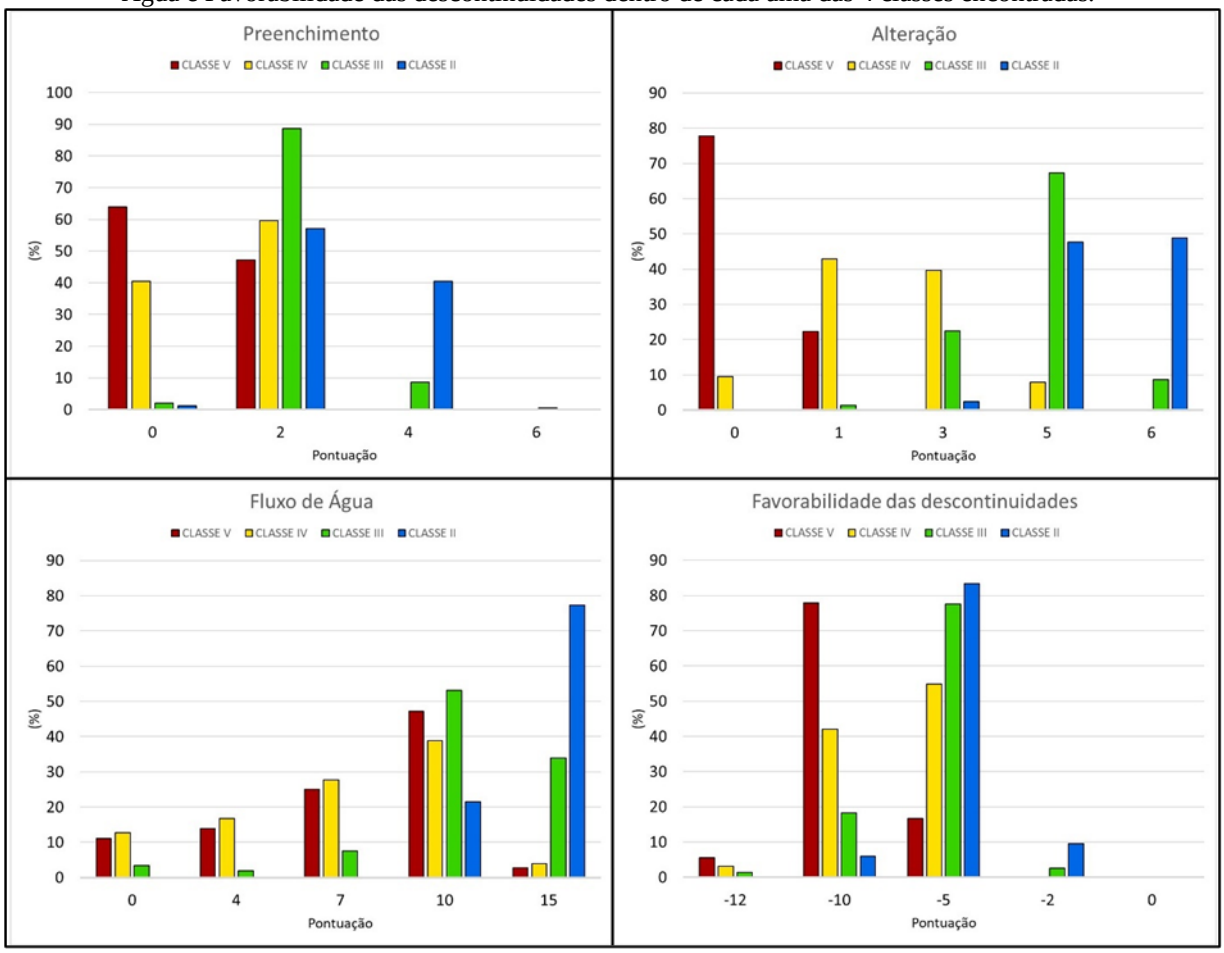
Na Classe II predominam pontuações altas na maioria dos parâmetros. Infiltração d'água, alteração, RQD e rugosidade demonstram alta frequência de valores elevados. Os parâmetros de persistência, abertura e preenchimento das descontinuidades se mantêm contidos em valores médios à altos.

Figura 43 – Gráficos ilustrando o perfil de distribuição dos parâmetros de Resistência, RQD, Espaçamento, Persistência, Abertura e Rugosidade dentro de cada uma das 4 classes encontradas. O eixo y representa a porcentagem total dentro da classe e no eixo x estão distribuídos os valores de cada parâmetro.



Fonte: Autor (2024)

Figura 44 – Gráficos ilustrando o perfil de distribuição dos parâmetros de Preenchimento, Alteração, Fluxo de Água e Favorabilidade das descontinuidades dentro de cada uma das 4 classes encontradas.



Fonte: Autor (2024)

Tendo em vista que as classes V e IV apresentaram as piores pontuações nos parâmetros de resistência, RQD e alteração, pode-se afirmar que representam perfil geomecânico típico de solos e material saprolítico. As classes III e II exibem valores mais elevados nesses parâmetros, indicado que correspondem, respectivamente, a maciços de rocha alterada e maciços de rocha sã. Contudo, alguns parâmetros observados não se demonstram tão exclusivos à determinadas classes. Nos parâmetros de preenchimento e favorabilidade, observa-se que as quatro classes compartilham uma distribuição menos segregada. Em relação a parâmetros como persistência e fluxo de água, a classe V se destaca, apresentando valores próximos ao máximo.

6.5 COMPARATIVO DE PROJETO

Como parte do projeto executivo deste túnel, foi elaborada uma compartimentação geomecânica estimada, baseada nas informações obtidas por meio das campanhas de sondagem, ensaios no material e análises interpretativas da geologia local. Essa compartimentação visa antecipar a qualidade do material a ser escavado, para que se possa planejar materiais, custos, segurança e fluxo de trabalho necessários para a execução das atividades de escavação e suporte do túnel. Entretanto, à medida que o material é escavado, verifica-se que, devido a própria natureza desta estimativa, as classes geomecânicas apresentam variação em relação à esta previsão. Com o intuito de apenas verificar as diferenças entre as condições estimadas e as condições reais encontradas no túnel, assim como a magnitude dessa disparidade, a seguir é apresentado um comparativo entre as duas.

No geral, os resultados indicam uma diferença significativa entre a compartimentação geomecânica projetada e as condições efetivamente encontradas no maciço ao longo da escavação do túnel (Tabela 4). Observa-se que o maciço apresenta uma expressividade menor das classes IV e II do que o estimado em projeto, e relativamente similar da classe V. A maior disparidade ocorre na classe III, com acima de 560 metros além do que foi estimado. Pode-se afirmar então que o projeto conta com uma estimativa mais conservadora em relação às classes de baixa qualidade, assumindo que o durante a escavação o maciço apresentaria maior quantidade de material em classe V e IV, e menos conservadora para a classe II, levando em consideração que o maciço apresentaria grandes comprimentos de rocha em qualidade mais alta.

Tabela 4: Extensão de cada classe geomecânica prevista para o Túnel 4.

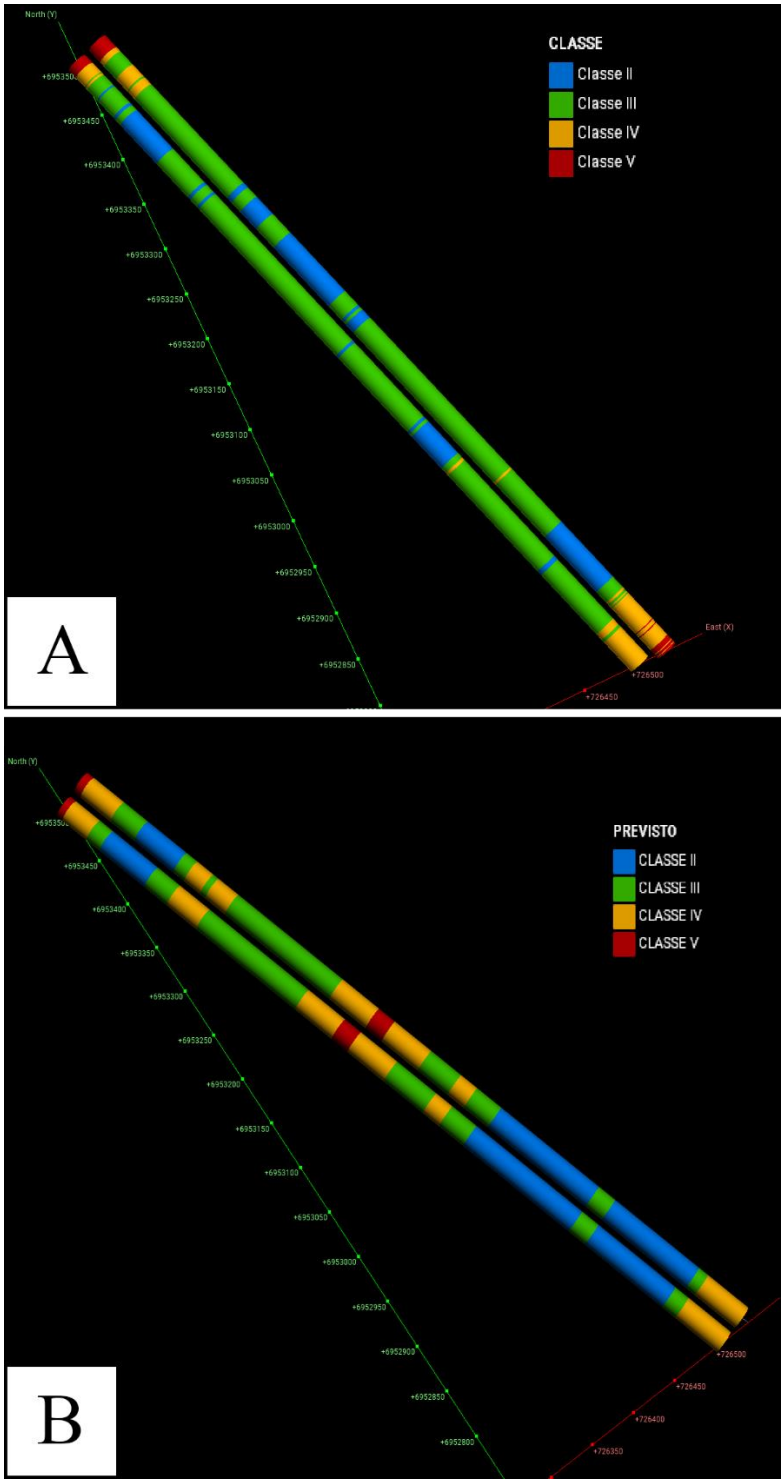
Classe do Maciço	Comprimento (PN)(m)	Comprimento (PS) (m)	Comprimento Total (m)	Comprimento (m) (Real – Projeto)
Classe V	28	27	55	-15,57
Classe IV	242,50	229	471,50	-313,02
Classe III	278,50	283	561,50	566,95
Classe II	272,50	271,50	554	-235,34

Fonte: Autor (2024)

Quanto à distribuição espacial dessas classes, observa-se que a extensão das classes é muito mais contínua (Figura 45), por conta do grau de incerteza em relação à posição e tamanho destas na etapa de confecção do projeto do túnel. Há presença de classes IV e V não apenas nas

regiões de emboque, mas também na porção central do túnel. Isso se deve à interpretação geológica, a qual apontou a presença de uma zona cisalhada atravessando essa área.

Figura 45 – Comparativo entre a compartimentação geomecânica real (A) e a prevista em projeto (B)para o Túnel 4.



Fonte: Autor (2024)

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho engloba a modelagem estrutural e compartimentação geomecânica do maciço rochoso escavado para a construção do Túnel 4, presente no Contorno Viário da Grande Florianópolis. Foram analisados 604 mapeamentos de frente de escavação e 1422 medidas estruturais. A seguir, serão apresentadas as conclusões obtidas a partir das análises e seus resultados, bem como sugestões para futuros trabalhos.

7.1 CONCLUSÕES

As análises realizadas com as medidas estruturais a partir dos estereogramas permitiram observar a existência de um padrão nas atitudes no qual estão presentes 3 principais famílias de descontinuidades, duas delas indicando sistema de juntas ou fraturas ortogonais e subverticais, e uma subhorizontal. Estas, de acordo com a análise regional e local da trama de lineamentos, demonstram uma relação direta com a trama estrutural dos maciços graníticos, gnáissicos e migmatíticos da região. Também foi observado que as três famílias apresentam distribuição espacial irregular ao longo do traçado do túnel.

A compartimentação geomecânica apresenta variações significativas nos parâmetros geomecânicos quando analisados ao todo, porém revela que há um padrão na distribuição de pontuações baixas à medianas. As regiões dos emboques do túnel apresentam pontuações consistentemente baixas nos parâmetros avaliados, o que se deve ao fato de estarem localizadas no manto de alteração do maciço rochoso, caracterizado por material de comportamento mecânico inferior. Os parâmetros de RQD, resistência da rocha intacta e grau de alteração, que estão diretamente relacionados à integridade da rocha sã, refletem essa condição nas áreas dos emboques. Ainda, observou-se variação entre os emboques, sendo que o emboque norte apresenta pontuações muito baixas, mas em uma área reduzida, enquanto o emboque sul tem valores mais elevados e com uma extensão maior. Possíveis causas estão relacionadas à morfologia do relevo no emboque sul.

Foi observado também a influência do padrão de lineamentos nos valores dos parâmetros encontrados no túnel. Estes no emboque norte podem ter contribuído para uma maior degradação do maciço, e na porção central do túnel indicam também justificar os valores anômalos nos parâmetros de fluxo de água e abertura.

A análise estatística das pontuações RMR ao longo do Túnel 4 indica que o maciço possui qualidade classificada majoritariamente como Classe III. Não foram observados avanços de Classe I. As regiões de pior qualidade estão concentradas nos emboques, com o emboque norte apresentando predominância de Classe V, e o emboque sul caracterizado por uma maior presença da Classe IV. A distribuição das classes ao longo do túnel revela alternância entre Classe III e II, com a Classe III predominando em extensões mais contínuas. As classes IV e III têm uma distribuição mais uniforme, enquanto as classes V e II aparecem em intervalos mais restritos.

Foi verificada ausência de correlação clara entre os padrões estruturais e as classes geomecânicas, que pode ser atribuída a disparidade de extensão total entre as classes e a influência dos parâmetros referentes à natureza mecânica do material na pontuação RMR final em detrimento do parâmetro de ajuste à direção das descontinuidades.

Os gráficos de distribuição dos parâmetros do RMR demonstram variações significativas nas quatro classes geomecânicas do Túnel 4. Como esperado, as classes V e IV apresentam pontuações menores em todos os parâmetros, bem evidentes na resistência, RQD e alteração, perfis típicos de solos e saprólito. As classes III e II apresentam valores medianos a altos para todos os parâmetros. Alguns parâmetros, como preenchimento e favorabilidade, não apresentam distinções tão marcantes entre as classes, enquanto a persistência e o fluxo de água se destacam mais na Classe V.

Vale ressaltar os dados cruciais para a realização deste trabalho (mapeamentos e medidas estruturais) são por natureza interpretativos e nem sempre fidedignos à realidade. Os resultados do modelo, da compartimentação e das análises estão sujeitos à este grau de incerteza.

7.2 SUGESTÕES

A partir de observações feitas durante a realização deste trabalho, sugere-se que trabalhos futuros façam:

- Análises estatísticas de regressão linear múltipla, com intuito de quantificar a contribuição individual de cada parâmetro para a pontuação RMR final e, por consequência, para as diferentes classes geomecânicas.
- Construir um modelo geomecânico em blocos a partir da interpolação dos parâmetros utilizando o LeapFrog Works. Tal modelo permitiria a estimativa da classificação geomecânica além das extremidades do túnel e a delimitação

de zonas geomecânicas, que, associadas à visualização tridimensional favoreceriam ainda mais o entendimento das condições do maciço.

- Análises no âmbito de avaliações da produtividade, estimativa de custos e material utilizado no túnel, e as correlacionando com as classes e os parâmetros geomecânicos.
- Realizar análises cinemáticas de blocos, a fim de verificar a estabilidade do maciço rochoso à queda de blocos e rupturas.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, G. **Túneis escavados em solo por máquina tuneladora: conceituação, comportamento do maciço e modelagem numérica** / G. Aguiar -- versão corr. -- São Paulo, 2017. 148 p.

BARTON et al. **A New Method for Quantitative Geological Classification of Rock Masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1974.

BASEI, M. A. S. **O Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina**. 1985. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

BASEI, M. A. S et al. **Tectonic evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano belt, Santa Catarina, Southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 32, n. 4, p. 324-350, 2011.

BIENIAWSKI, Z. T. **Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling**. In: Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics. 1974.

BIENIAWSI, Z.T. **Engineering Rock Mass Classficiations: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. Pensilvânia, Estados Unidos, 1989.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering classification of jointed rock masses**. 1989.

DEERE, D. U. **Technical description of rock cores**. Rock Mechanics Engineering Geology, 1 (16-22). 1964.

DEERE, D. U.; DEERE, D. W. **The RQD index in practice**. Proc. Symp. Rock Class. Engineering Purposes, ASTM Special Technical Publications 984, Philadelphia, (91-101). 1988.

FREITAS, A.F. **Avaliação da estabilidade através da projeção estereográfica e classificação RMR e SMR de um talude rochoso no Morro da Cruz, Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2022. 80p.

GOULART, Djonathan. **Análise e correlação de propriedades físicas e mecânicas de rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra Geral**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2019.

HOEK, E., BROWN, E.T. (1980), **Underground Excavations in Rock**, The Institution of Mining and Metallurgy, London.

ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1978) **Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368, 1978

JANASI, V.A.; BITENCOURT, M.F.; MARTINS, L.M.; SHAULIS, B.; STERN, R. **Low-δ18O shallow-level Neoproterozoic A-type granites from the Florianópolis Batholith, South Brazil**. Hutton Symposium on Granites and related rocks, Florianópolis, Brasil, 2015

KENTWELL, D. J. **Destroying the distinction between explicit and implicit geological modelling.** Proceedings Mining Geology, 2019.

LISLE, R. J.; LEYSHON, P. R. **Técnicas de projeção estereográfica para geólogos e engenheiros civis**. Editora da UFSC, 2018.

NIEHUES, B. **Caracterização, parametrização e análise da estabilidade de um talude rochoso do contorno rodoviário de Florianópolis, em São José - SC**. 2019. 92p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SILVA, J. P. C. **Modelações Geológico-Geotécnico Tridimensionais**. 2023. Instituto Superior De Engenharia Do Porto. 149 p.

SINGH, B.; GOEL, R. K. **Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides**. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011.

SIVAKUGAN, N.; SHUKLA, S. K; DAS, B. M. **Rock Mechanics: an introduction**. Taylor & Francis Group, 2013.

THORNTON, J. M., MARIETHOZ, G., & BRUNNER, P. **A 3D geological model of a structurally complex alpine region as a basis for interdisciplinary research**. *Scientific Data*, *5*. 2018.

TURK, G., AND O'BRIEN, J. 2002. **Modelling with implicit surfaces that interpolate**. ACM Transactions on Graphics 21, 4 (October), 855–873.

WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J.A.; BINOTTO, R.B.; IGLESIAS, C.M.F.; LAUX, J.H. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

WYLLIE, D.C.; MAH, C.W. **Rock Slope engineering: Civil and Mining**. 4th ed. London: UK Spon Press, 2004. 425p

ZANINI, L.F.P.; BRANCO, P.M.; CAMOZZATO, E. & RAMGRAB, G.E. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Folhas Florianópolis (SH.22-Z-D-V) e Lagoa (SH.22-Z-D-VI), Escala 1:100,000.** CPRM, Brasília, 1997. 252p.