

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**MODELO GEOMECÂNICO DA SEQUÊNCIA CANTO EM GALERIAS DA
MINERAÇÃO FAZENDA BRASILEIRO - BA**

Leonardo Alberto Sala

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis (orientador)

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Leonardo Alberto Sala

MODELO GEOMECÂNICO DA SEQUÊNCIA CANTO EM
GALERIAS DA MINERAÇÃO FAZENDA BRASILEIRO - BA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau Geólogo.

Orientador: Fabio Augusto Gomes Vieira Reis

Rio Claro - SP

2016

624.1513 Sala, Leonardo Alberto
S159m Modelo geomecânico da Sequência Canto em galerias da
Mineração Fazenda Brasileiro - BA / Leonardo Alberto Sala.
- Rio Claro, 2016
68 f. : il., figs., quadros, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade
Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

1. Mecânica de rochas. 2. Geomecânica. 3. Mineração
subterrânea. 4. Classificação geomecânica. 5. Engenharia
geotécnica. I. Título.

Leonardo Alberto Sala

MODELO GEOMECÂNICO DA SEQUÊNCIA CANTO EM GALERIAS DA MINERAÇÃO FAZENDA BRASILEIRO - BA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Leandro Ribes de Lima

Rodrigo Irineu Cerri

Rio Claro, 17 de Novembro de 2016.

Assinatura do aluno

Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, por ter guiado minha vida até este momento, iluminando meu caminho e abrindo portas para que eu pudesse crescer como pessoa e como profissional.

Agradeço à empresa Brio Gold por ter me dado uma oportunidade de estágio, onde pude coletar os dados necessário para a elaboração deste TCC. Este trabalho não seria possível sem o apoio em campo da equipe de geomecânica da Mineração Fazenda Brasileiro: Edinéia, João, Humberto, Diego e Ronaldo Andrade. Em especial, agradeço ao geólogo Leandro Ribes de Lima, co-orientador deste trabalho, pelos ensinamentos e conhecimentos passados ao longo deste projeto, e por todo apoio e amizade.

Não poderia deixar de agradecer meus pais, João Sala e Vânia Affonso, que sempre me apoiaram e me deram condições de hoje ser quem eu sou. Muito obrigado pela educação que me deram, lições e exemplos que nunca serão esquecidos, responsáveis pela formação do meu caráter. Agradeço também à minha irmã, Beatriz, e minha avó, Nair, pelo apoio e carinho; e ao meu primo, Geólogo Darcy Correa Neto, que me motivou a escolher este curso e me aconselhou em todos momentos difíceis que passei ao longo da graduação.

Outra pessoa que teve e tem fundamental importância na minha vida, e muito me apoiou neste trabalho, foi minha namorada, Rafaela Bressan. Muito obrigado por todo companheirismo, amor e carinho. Demonstrados não só nos bons momentos, mas também nos ruins. Agradeço também aos meus sogros, Waldir e Solange, que tanto torcem pelo meu sucesso.

Aos amigos da República Mansão e colegas de classe, que muito me ajudaram em conversas, conselhos e bons momentos de alegria: Diego di Bermudez (Cinderela), Caio Socchor (Boca), Marcos Tagliatti (Marquito), Antonio de Mello (Stopa), Vinícius Rocha (Chester), Samuel Siqueira (Bala), Lucas Carvalho (Nelson), Pedro Foster (Bolacha), Felipe Seguin (Merda), José Assis (Zé), Pedro Alcazas (Pedrão), Julio Silva (Julião), Renzo Belfort (Macaco), Lucas Ourique (Mumuco), Pedro Ferrari (Buero), Nikolas Konstantinow (Frank), Guilherme Carvalho (Quevedo), Rodrigo Calaboni (2D), Tomás Cardeña (Simba), Ana Zelia, Pedro Severino (Tupã), André Andrade (Biscoito), Andrey Meyer (Mofo), Rodolfo Bergamin (Baby), Tatiana Penteado (Xena), Rodrigo Cerri (Izzy).

Quero agradecer aos meus bons professores Cesar Moreira, Luiz Simões, Edson Gomes (*in memorian*), Norberto Morales, Joel Kuszmaul, Priscilla Nelson, Elizabeth Holley e ao meu professor e orientador Fábio Reis. Pessoas que me deram oportunidades, conselhos e muito me inspiraram na busca pelo conhecimento de geologia. Obrigado pelo aprendizado.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Uma vez escavada, uma galeria de mina subterrânea pode apresentar uma condição geotécnica diferente da esperada, com maior incidência de queda de blocos e potencial para rupturas em cunha. Quanto melhor caracterizado o comportamento geomecânico do maciço rochoso, mais preciso será o planejamento de lavra, otimizando a produção e reduzindo custos operacionais. O objeto de estudo deste trabalho foram cinco galerias da Mineração Fazenda Brasileiro, no município Barrocas-BA, pertencente à empresa Brio Gold; onde afloram rochas da Sequência Canto, inseridas em contexto de evolução transpressiva do Greenstone Belt Rio Itapicuru. Trata-se de uma sequência vulcânica ácida de elevado grau de fraturamento, intercalada com xistos carbonosos que preenchem e diminuem o atrito dos planos de descontinuidade, formando um maciço rochoso com elevado potencial para queda de blocos e rupturas em cunha. O diferencial deste trabalho foi a criação de uma metodologia de integração de diferentes sistemas de classificação em um único modelo geomecânico, através de fórmulas de correlação e retroanálises baseadas em observações de campo. O objetivo foi criar um modelo geomecânico pela integração de dados de análise geotécnica e mapeamento de classes geomecânicas. Seguindo observações em campo, as galerias foram preliminarmente divididas em janelas de mesmo padrão geológico-estrutural. Em cada janela, foi feito o mapeamento de falhas e caracterização das descontinuidades, analisando parâmetros como orientação espacial, frequência, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura e preenchimento. Os dados levantados nesta etapa foram aplicados às classificações geomecânicas *Rock Quality Designation* - RQD (PALMSTRON, 1982), *Rock Mass Rating* - RMR (BIENIAWSKI, 1989) e *Tunneling Quality Index* - Q (BARTON et al., 1974). Tais classificações, quando feitas ao longo das galerias de uma mina subterrânea, podem evidenciar uma segmentação de trechos pertencentes a uma mesma classe geomecânica. Quando estes dados são distribuídos espacialmente, permite-se criar um mapa de classes geomecânicas. Os mapas de integração de classes foram a base para a elaboração de um modelo geomecânico tridimensional, no software *Leapfrog Geo*, delimitando quatro domínios geomecânicos, classificados como Muito Bom, Bom, Razoável e Ruim. As análises geotécnicas foram feitas com o uso de softwares de tratamento de dados e simulação estabilidade, pertencentes à plataforma *Rocscience* (*Dips*, *Unwedge* e *RS2*), focando principalmente na identificação das principais famílias de descontinuidades, potencial de ruptura em cunha e distribuição de tensões ao redor da escavação. O resultado final foi satisfatório, sendo possível delimitar os domínios geomecânicos de pior qualidade, com direção E-W e rumo de mergulho para S, de maneira concordante aos contatos litológicos e principais foliações presentes no maciço.

PALAVRAS-CHAVE: GEOMECÂNICA; ENGENHARIA GEOTÉCNICA; MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA.

ABSTRACT

Once excavated, an underground mine gallery can show an unexpected geomechanics condition with a higher incidence of falling blocks and potential for wedge failures. The better characterized the geomechanical rock mass behavior, the better the accuracy will be for mine planning, optimizing production and reducing operation costs. The studied objects of this research were five galleries of Fazenda Brasileiro Mining, in Barrocas-BA, belonging to the company Brio Gold. The study area is composed of rocks from Canto Sequence, formed in a transpressive evolution context at Rio Itapicuru Greenstone Belt. It is an acid volcanic sequence, very fractured, interbedded with graphite schists that infills the discontinuity plans, reducing friction forces. This scenario results in high wedge failure and falling blocks potential. The differential of this work was the creation of a methodology that integrates different classifications systems in a single geomechanical model, through correlation equations and retro analysis based on field observations. This work is aimed to create a geomechanical model through the integration of geotechnical analysis and geomechanical classes maps. The galleries were preliminarily divided into windows with same geological-structural patterns, following field observations criterion. In each window, fault mapping and discontinuity characterization were made, analyzing parameters such as spatial orientation, frequency, spacing, persistence, roughness, aperture and infilling material. The collected data at this stage was applied to rock mass classifications: Rock Quality Designation - RQD (PALMSTRON, 1982), Rock Mass Rating - RMR (BIENIAWSKI, 1989) e Tunneling Quality Index - Q (BARTON et al., 1974). Such classifications, when made along underground mine galleries, may show a segmentation of parts belonging to the same rock mass class. When this data is spatially distributed, it is possible to create geomechanical class maps. The integration maps, using RMR and Q, allowed the three-dimensional geomechanical model elaboration, on the Leapfrog Geo software, delimiting four geomechanical domains, classified as Very Good, Good, Fair and Poor. The geotechnical analysis were made using data processing and stability simulation softwares from the Rocscience platform (Dips, Unwedge, RS2), focusing mainly the discontinuity sets identification, wedge failure potential, and stress distribution around the excavation. The final results were satisfactory, being possible to delimit the worst quality geomechanical domains, with strike E-W and dip direction S, according to the lithological contacts and main rock mass foliations.

KEY WORDS: GEOMECHANICS, GEOTECHNICAL ENGINEERING,
UNDERGROUND MINING

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização da área de estudo.....	12
Figura 2. Cráton São Francisco ilustrando a distribuição espacial dos terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos, destaque para o Greenstone Belt do Rio Itapicuru.....	14
Figura 3. Esquema ilustrando segmento do orógeno Paleoproterozóico preservado no Cráton São Francisco, destaque para o Bloco Serrinha.....	15
Figura 4. Mapa geológico do <i>Greenstone Belt</i> do Rio Itapicuru.....	15
Figura 5. Perfil geológico esquemático das principais sequências da porção sul do GBRI, destaque para Sequência Canto.	17
Figura 6. Coluna tectono-estratigráfica da Sequência Canto, destaque para os domínios estudados no trabalho.	18
Figura 7. Esquema da posição dos Blocos Arqueanos antes da colisão do Paleoproterozóico.	20
Figura 8. Modelo estrutural da porção sul do GBRI.	22
Figura 9. Fluxograma das etapas do trabalho.	23
Figura 10. Foto de uma das galerias estudadas, e perfil ilustrando suas dimensões.	24
Figura 11. Espaçamento médio das famílias de descontinuidade.	28
Figura 12. Exemplo de cálculo de J_v e RQD volumétrico.	29
Figura 13. A) Gráfico de correlação entre índices N e RCR. B) Gráfico de correlação entre índices N e RCR em menor escala, com redução dos eixos, para melhor visualização da regressão linear proposta.	44
Figura 14. Comparação de diferentes descrições para uma mesma janela da galeria C42. Bom segundo RMRbásico, Razoável segundo Q, Ruim segundo critério de observação de campo no mapa de integração.	48
Figura 15. Modelo geomecânico tridimensional elaborado a partir de mapas de integração de classes RMR e Q, calibrado com observações de campo.....	51
Figura 16. Estereograma e diagrama de roseta dos domínios geomecânicos Bom e Muito Bom, delimitados nos mapas de integração e modelo tridimensional. Atitude plano principal 253/82, máximo de polos 073/08, n = 40.	53
Figura 17. Estereograma e diagrama de roseta dos domínios geomecânicos Razoável e Ruim, delimitados nos mapas de integração e modelo tridimensional. Atitude plano principal 176/45, máximo de polos 356/45, n = 87.	53
Figura 18. Gráfico de comparação dos valores RQD obtidos nas janelas dos domínios geomecânicos Bom e Muito Bom, e Razoável e Ruim dos mapas de integração.....	55
Figura 19. Gráfico de comparação dos valores de rugosidade RMR obtidos nas janelas dos domínios geomecânicos Bom e Muito Bom, e Razoável e Ruim dos mapas de integração.	55
Figura 20. Análise estrutural e cinemática em projeção estereográfica elaborada no software <i>Dips 7.0</i>	57
Figura 21. Modelo tridimensional da galeria e das possíveis cunhas, elaborado no software <i>Unwedge</i>	58
Figura 22. Modelo de tensões, destaque para influência das descontinuidades na distribuição heterogênea das forças ao redor da galeria. Traços roxos: juntas inclinadas; Traços verdes: juntas subverticais; Traços laranjas: foliação e falhas.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Síntese das principais características geológicas e feições geotécnicas que podem influenciar o comportamento geomecânico dos domínios da Sequência Canto.	19
Quadro 2. Galerias selecionadas para o estudo.	24
Quadro 3. Parâmetros geomecânicos, extraídos do Projeto Conceitual da Mineração Fazenda Brasileiro.	27
Quadro 4. Quadro de classificação RQD.....	29
Quadro 5. Parâmetros e pesos atribuídos segundo método RMR.	31
Quadro 6. Detalhamento do parâmetro de condição das descontinuidades.	32
Quadro 7. Classificação do maciço rochoso baseada no método RMR.	32
Quadro 8. Pesos atribuídos ao parâmetro J_n	34
Quadro 9. Pesos atribuídos ao parâmetro J_r	34
Quadro 10. Pesos atribuídos ao parâmetro J_a	35
Quadro 11. Pesos atribuídos ao parâmetro J_w	35
Quadro 12. Classificação do maciço rochoso baseada no sistema Q.	35
Quadro 13. Correlações entre RMR e Q.	36
Quadro 14. Resultado da classificação Q, e pesos dos parâmetros adotados.	40
Quadro 15. Resultado da classificação RMR básico, e pesos dos parâmetros adotados.	41
Quadro 16. Condicionantes geológicos utilizados para definição de contatos que dividem uma mesma janela em duas classes geomecânicas do método Q.	43
Quadro 17. Condicionantes geológicos utilizados para definição de contatos que dividem uma mesma janela em duas classes geomecânicas do método RMR.	43
Quadro 18. Condicionantes geológicos utilizados para definição de contatos que dividem uma mesma janela em dois domínios geomecânicos nos mapas de integração.	47
Quadro 19. Quadro de equivalência de descrições baseada no uso de equação de correlação.	49
Quadro 20. Quadro de comparação de descrições, segundo diferentes métodos, e critérios utilizados para determinação da descrição utilizada nos mapas de integração.	50
Quadro 21. Parâmetros físicos e fator de segurança das cunhas.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	12
3.1	Localização, vias de acesso e infraestrutura	12
3.2	Geologia regional	13
3.3	Geologia local.....	16
3.4	Geologia estrutural	19
4	MÉTODOS E ETAPAS DO TRABALHO	23
4.1	Seleção das galerias estudadas	23
4.2	Reconhecimento preliminar e individualização de janelas.....	24
4.3	Levantamento sistemático de descontinuidades	25
4.4	Caracterização geotécnica-estrutural	25
4.5	Mapeamento de falhas	25
4.6	Definição dos Parâmetros Geomecânicos	26
4.7	Classificações Geomecânicas	27
4.7.1	RQD Volumétrico.....	27
4.7.2	Rock Mass Rating (RMR)	30
4.7.3	Rock Tunnelling Quality Index (Q).....	33
4.8	Correlação entre Q e RMR	36
4.9	Mapas de classes geomecânicas	37
4.10	Modelo tridimensional.....	38
4.11	Análise estrutural e cinemática.....	38
4.12	Análises geotécnicas e simulação de estabilidade	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Classificações geomecânicas e mapas de classes RMR e Q	40
5.2	Correlação entre Q e RMR	43
5.3	Mapas de integração	45
5.4	Modelo tridimensional.....	51
5.5	Análise estrutural.....	52
5.6	Análise dos parâmetros geotécnicos.....	54
5.7	Análise de estabilidade de cunhas	56
5.8	Influência das descontinuidades no modelo de tensões.....	58
6	CONCLUSÕES.....	60
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	APÊNDICE 1	65
	APÊNDICE 2	66
	APÊNDICE 3	67
	APÊNDICE 4	68

1 INTRODUÇÃO

Uma mina subterrânea só pode ser aberta após um criterioso estudo de viabilidade que leva em conta não apenas os teores de minério, mas também a qualidade da rocha a ser escavada. A abertura de uma galeria é afetada por muitas incertezas, dificultando a estimativa de orçamento e tempo de execução do projeto. Quanto melhor caracterizado o comportamento geomecânico do maciço rochoso, mais preciso será o planejamento de lavra, otimizando a produção e reduzindo custos operacionais.

Para isso, torna-se necessário o mapeamento geológico-geotécnico das galerias, a fim de se identificar os litotipos e estruturas que compõem o maciço, além do agrupamento das rochas de comportamento semelhante perante a escavação. Para este agrupamento é comum a utilização de classificações qualitativas, dando diferentes pontuações para cada atributo considerado. Isto facilita a comunicação entre os profissionais de diferentes áreas, como geólogos e engenheiros, responsáveis pela elaboração do projeto de escavação e suporte (SINGH; GOEL, 1999). Classificações puramente qualitativas, sem a utilização de notas, geram resultados subjetivos pois dependem da interpretação do profissional que a está executando. Não existem parâmetros concretos para tais classificações, de forma que a correlação de diferentes projetos se torne mais difícil (GOEL et al., 1995; PALMSTRON; BROCH, 2006). Atribuir uma nota numérica contribui para a organização e evolução do conhecimento baseado no conhecimento empírico, construído através da comparação entre estudos de caso (GOODMAN, 1989; SINGH; GOEL, 1999; FIORI; CARMIGNANI, 2001).

O primeiro sistema de classificação de maciços rochosos para projetos de escavação de túneis foi feito há 70 anos (TERZAGUI, 1946). Muitas outras classificações foram elaboradas, sendo os sistemas mais populares atualmente: RQD - *Rock Quality Designation* (DEERE et al., 1966), RMR - *Rock Mass Rating* (BIENIAWSKI, 1973), Q - *Tunneling Quality Index* (BARTON et al., 1974).

Tais classificações, quando feitas ao longo das galerias de uma mina subterrânea, podem evidenciar uma segmentação de trechos pertencentes a uma mesma classe geomecânica. Quando estes dados são distribuídos espacialmente, permite-se criar um mapa de classes geomecânicas. Nestes mapas, é comum a integração de dois ou mais métodos de classificação para aumentar a acuracidade do modelo geomecânico.

A Mineração Fazenda Brasileiro situa-se no nordeste da Bahia, no município de Barrocas. É uma das maiores minas subterrâneas em atividade no Brasil, com mais de

200 km de galerias, atingindo 1070 m de profundidade. A segurança dos colaboradores é de extrema importância, para tanto deve-se assegurar a estabilidade das galerias. A grande maioria das galerias foram desenvolvidas nas rochas da Sequência Fazenda Brasileiro, um maciço de boa qualidade, sendo raros os problemas geotécnicos.

Recentemente, importantes mineralizações têm sido descobertas e exploradas nas rochas da Sequência Canto, sotoposta à Sequência Fazenda Brasileiro. Segundo Chauvet et al. (1997) e Assis (2011), a Sequência Canto trata-se de um pacote de rochas vulcanossedimentares félsicas, com elevada presença de material carbonoso intensamente fraturado, que reduz o atrito entre blocos de rocha, nos planos de foliação, juntas e falhas. Neste cenário, as rupturas em cunha e queda de blocos são mais frequentes, fazendo-se necessário o tratamento com suportes e telas para assegurar a estabilidade das galerias. A instalação de suportes e telas nos tetos e paredes das galerias, além de ser onerosa, demanda um período de inatividade na galeria, o que prejudica a produção da mina.

Diante disto, torna-se necessário o modelo geomecânico para identificar quais as zonas de fraqueza do maciço rochoso, à fim de evita-las durante o desenvolvimento de novas galerias na Sequência Canto.

Este trabalho se propôs a desenvolver uma metodologia que integrasse métodos tradicionais de classificação de maciços rochosos com novas geotecnologias, como os softwares de análise geotécnica (*Rocscience*) e modelamento tridimensional (*Leapfrog Geo*). Tais ferramentas tem ganhado espaço nas universidades, centros de pesquisa e empresas. Metodologias como esta proposta neste trabalho, têm extrema importância para a implementação das geotecnologias, aliadas ao conhecimento empírico dos métodos mais tradicionais de classificação geomecânica de maciços rochosos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é desenvolver um modelo geomecânico do maciço rochoso aflorante em 5 galerias desenvolvidas na Sequência Canto, pela integração de análises geotécnicas e mapeamento de classes geomecânicas RMR (BIENIAWSKI, 1989) e Q (BARTON et al., 1974). O objetivo específico é propor um método para integração das classificações geomecânicas RMR e Q.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

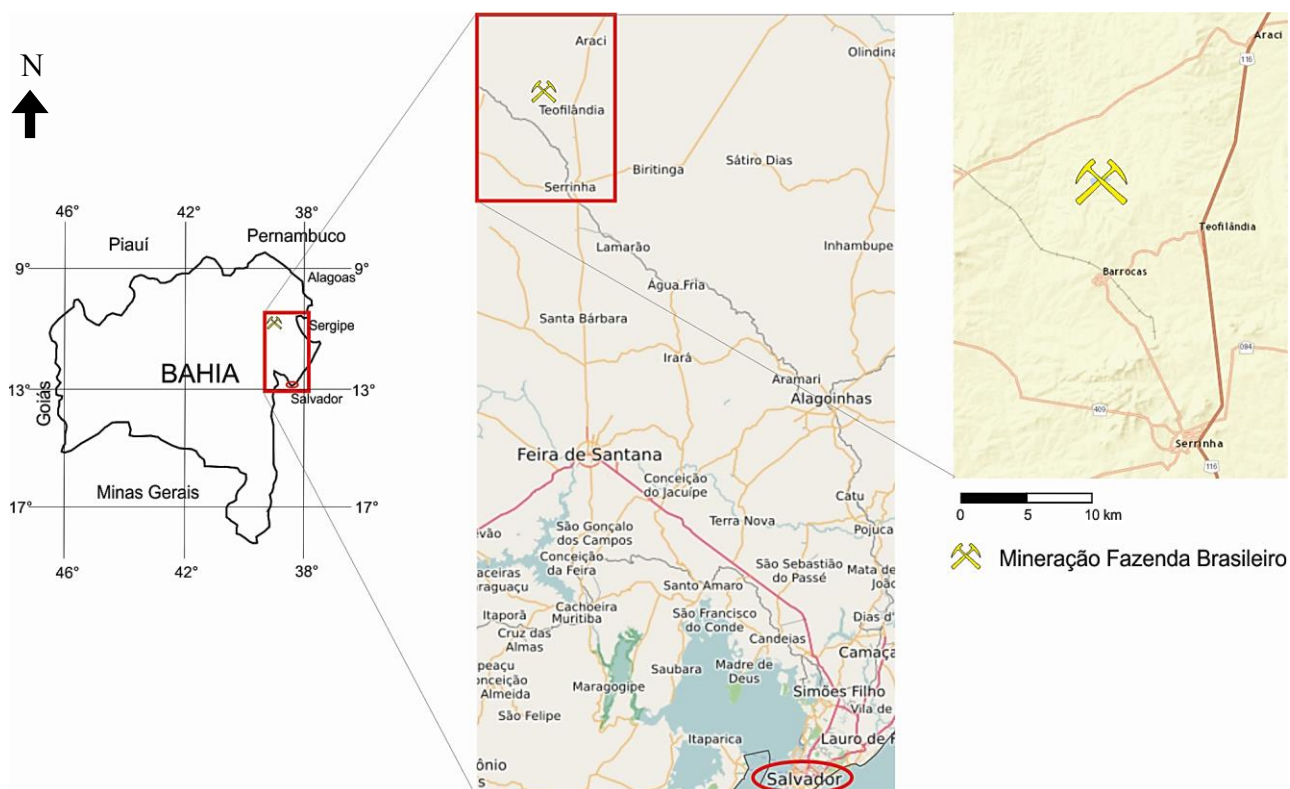
3.1 Localização, vias de acesso e infraestrutura

A Mineração Fazenda Brasileiro localiza-se na porção nordeste do Estado da Bahia, no município de Barrocas. A mina fica entre os municípios de Teofilândia, Araci, Serrinha (Figura 1).

Partindo do Aeroporto Internacional de Salvador, a distância a ser percorrida até a Mineração Fazenda Brasileiro é de 210 km, passando pelas rodovias BR 324 e BR 116. Quando feito de carro, o percurso dura cerca de 3 horas e 20 minutos.

O acesso à Mineração Fazenda Brasileiro deve ser feito pela rodovia BR 324, partindo de Salvador, até o município de Feira de Santana, cerca de 107 km. Em Feira de Santana, o acesso mais fácil à BR 116 é pela Avenida Eduardo Froés da Mota, um anel viário que contorna a cidade, cerca de 7 km. A partir daí, devem ser percorridos 86 km da rodovia BR 116 até o município de Teofilândia. O acesso de Teofilândia à mineração é feito por estrada não pavimentada em boas condições e bem sinalizada, com extensão de 10 km.

Figura 1. Localização da área de estudo.



3.2 Geologia regional

A Mineração Fazenda Brasileiro está inserida na porção oriental do Cráton São Francisco, marcado pela ação destacada de processos do Ciclo Transamazônico (HASUI et al., 2011).

O Cráton São Francisco abrange principalmente os estados da Bahia e Minas Gerais (ALMEIDA, 1977), porém os terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos que constituem o cráton afloram em duas partes distintas: norte-nordeste da Bahia e sul de Minas Gerais.

Os terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos aflorantes na Bahia são divididos em quatro compartimentos litotectônicos denominados de Bloco Gavião, Bloco Serrinha, Bloco Jequié e Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá (BARBOSA et al., 2003; BARBOSA; DOMINGUEZ, 1996; BARBOSA; SABATÉ, 2002, 2004; ALKMIN, 2004). Os compartimentos ocorrem imbricados e alongados preferencialmente na direção N-S, e constituem a raiz de um orógeno preservado. A área de estudo está inserida no Bloco Serrinha (Figura 3).

O Bloco Serrinha tem um formato oval de área aproximada de 21000 km², é composto por ortognaisses migmatizados arqueanos e sequências vulcano sedimentares de fácies xisto verde intrudidas por numerosos corpos de granitos Paleoproterozóicos (BARBOSA et al, 2003; ALVES DA SILVA, 1994).

O minério explotado pela Mineração Fazenda Brasileiro está presente em rochas de uma destas sequências vulcano sedimentares de fácies xisto verde, o *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru - GBRI (Figura 2).

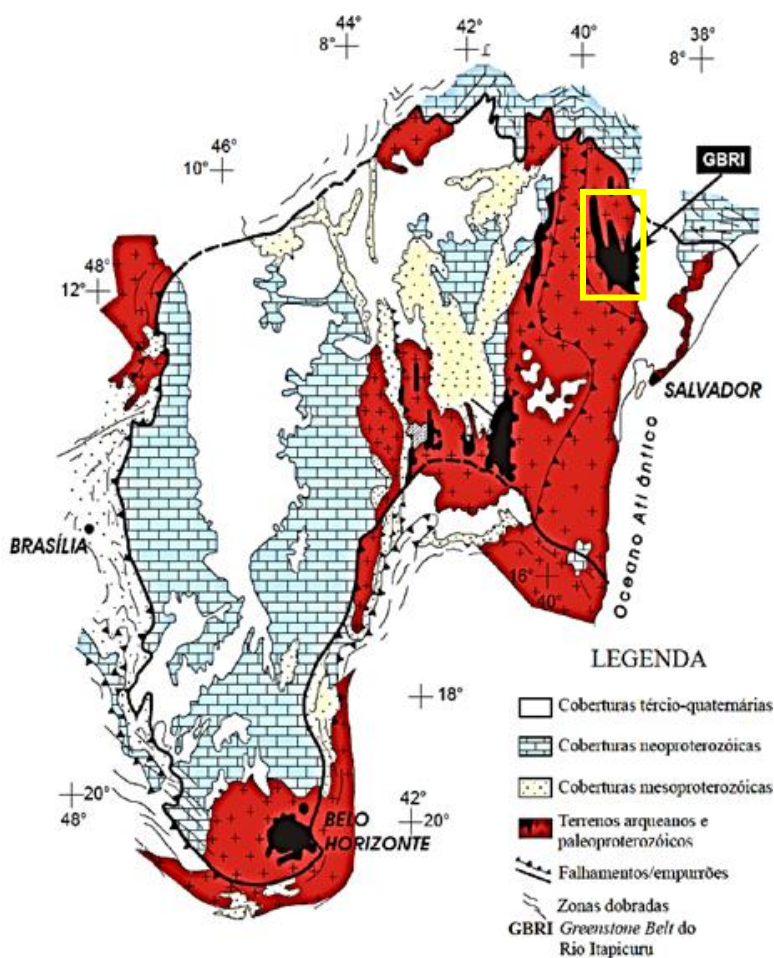
O *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru (GBRI) é composto por rochas supracrustais sobrepostas ao embasamento gnáissico-migmatítico denominado Complexo Santa Luz (KISHIDA, 1979; SILVA, 1983). O GBRI possui em sua porção norte uma orientação preferencialmente N-S, que é inflexionada em sua porção meridional, assumindo uma orientação E-W (Figura 4).

Segundo Kishida (1979) e Silva (1992), as rochas supracrustais deste terreno possuem cerca de 9,5 Km de espessura, estão associadas à rochas intrusivas (diques, sills, corpos graníticos e ultramáficos), e são subdivididas em três unidades: Unidade Vulcânica Máfica (UVM), Unidade Vulcânica Félsica (UVF), Unidade Sedimentar (US).

A Sequência Canto, alvo de estudo deste trabalho, insere-se na unidade UVF. Trata-se do pacote intermediário do GBRI, estando sotoposta à US e sobreposta à UVM. Caracteriza-se por rochas intermediárias a félsicas de composição andesítica a dacítica

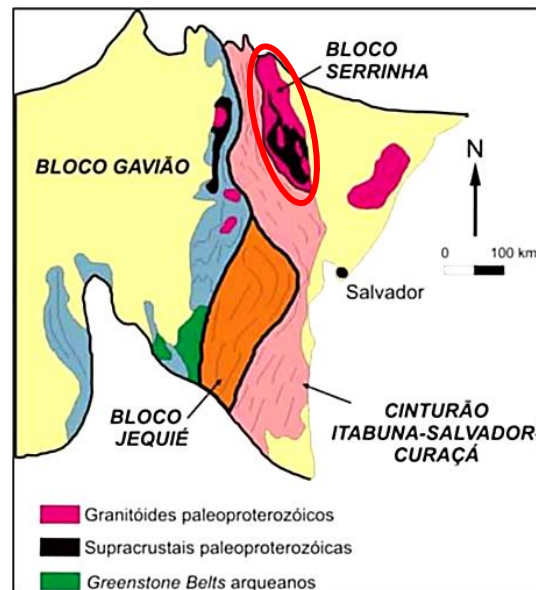
cálcio-alcálica. Apresenta feições piroclásticas, representadas por tufos, *lapillis* e aglomerados (BARBOSA; SABATÉ, 2004; SILVA et al., 2001; ASSIS, 2011). De acordo com Alves da Silva (1990), a Sequência Canto é composta por estas rochas piroclásticas, além de metavulcanossedimentares, situadas em uma calha sinformal.

Figura 2. Cráton São Francisco ilustrando a distribuição espacial dos terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos, destaque para o Greenstone Belt do Rio Itapicuru.



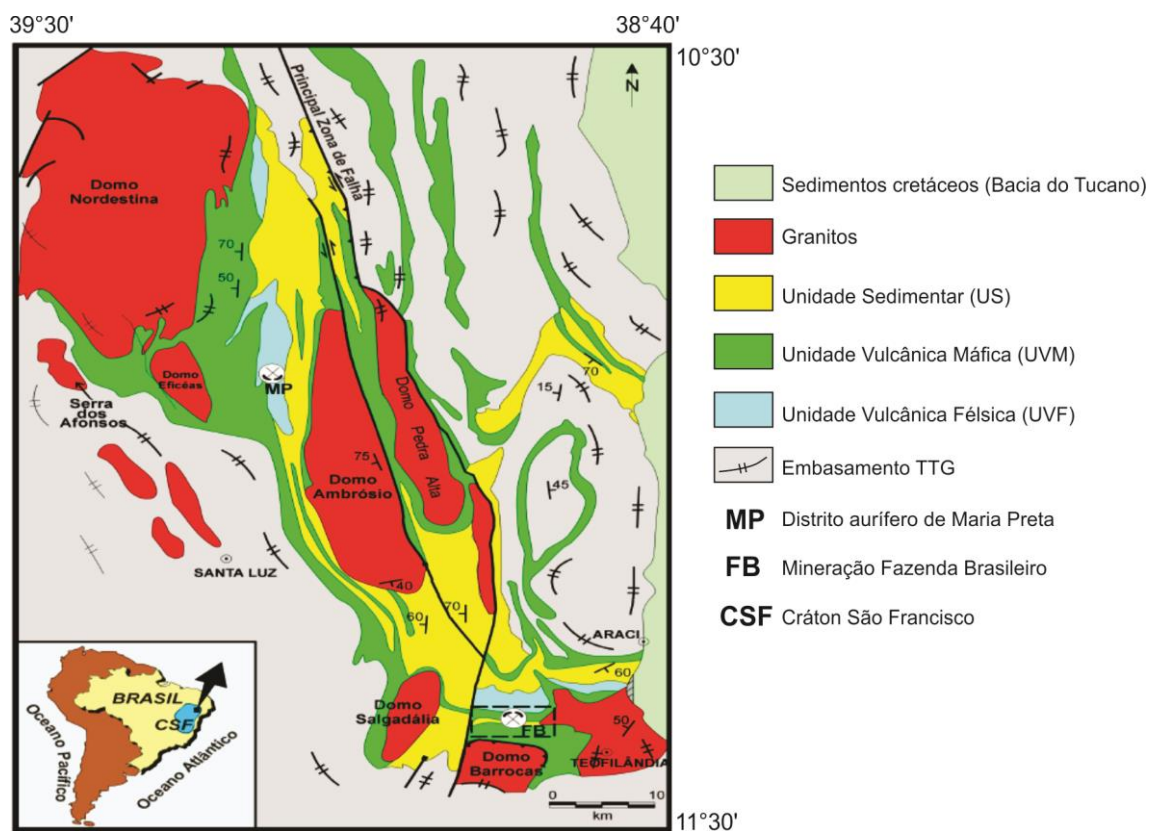
Fonte: SILVA et al., 2001

Figura 3. Esquema ilustrando segmento do orógeno Paleoproterozóico preservado no Cráton São Francisco, destaque para o Bloco Serrinha.



Fonte: ALKMIN, 2004

Figura 4. Mapa geológico do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru.



Fonte: XAVIER; COELHO, 2000

3.3 Geologia local

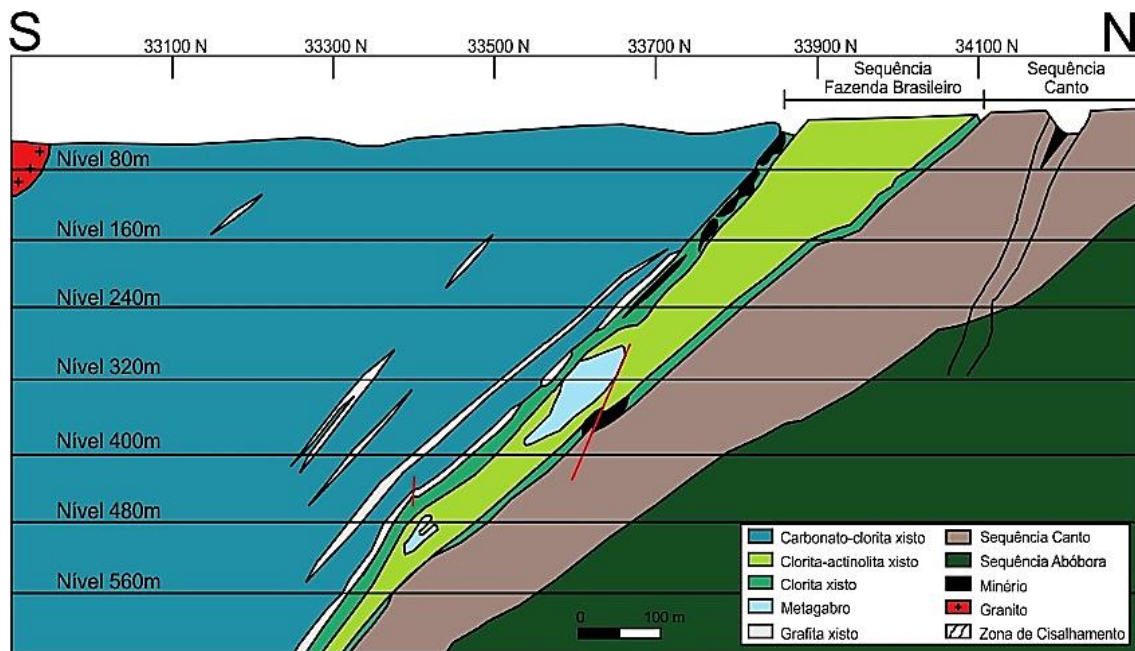
O minério explotado na Mineração Fazenda Brasileiro está presente, majoritariamente, na Sequência Fazenda Brasileiro. Importantes mineralizações tem sido descobertas na Sequência Canto, porém sua qualidade geomecânica é bastante inferior à Sequência Fazenda Brasileiro. As galerias de desenvolvimento tem sofrido com uma maior incidência de blocos instáveis (informalmente chamados de chocos), o que resulta na instalação de mais suportes, elevando os custos e tempo de execução do projeto.

A Figura 5 ilustra o perfil geológico esquemático das principais sequências presentes na porção sul do *Greenstone Belt Rio Itapicuru* (GBRI), destaque para a disposição da Sequência Canto, sotoposta à Sequência Fazenda Brasileiro (SILVA et al., 2001).

A Sequência Fazenda Brasileiro se trata de um *sill* gabróico com zoneamento de alteração hidrotermal, tem espessura aproximada de 60 a 150 m e representa a mineralização mais importante da GBRI. O principal litotipo que compõe as bordas desta intrusão é o quartzo-clorita/actinolita xisto, no centro da intrusão os litotipos predominantes são o metagabro e o sericita-clorita/actinolita-carbonato xisto (ASSIS, 2011).

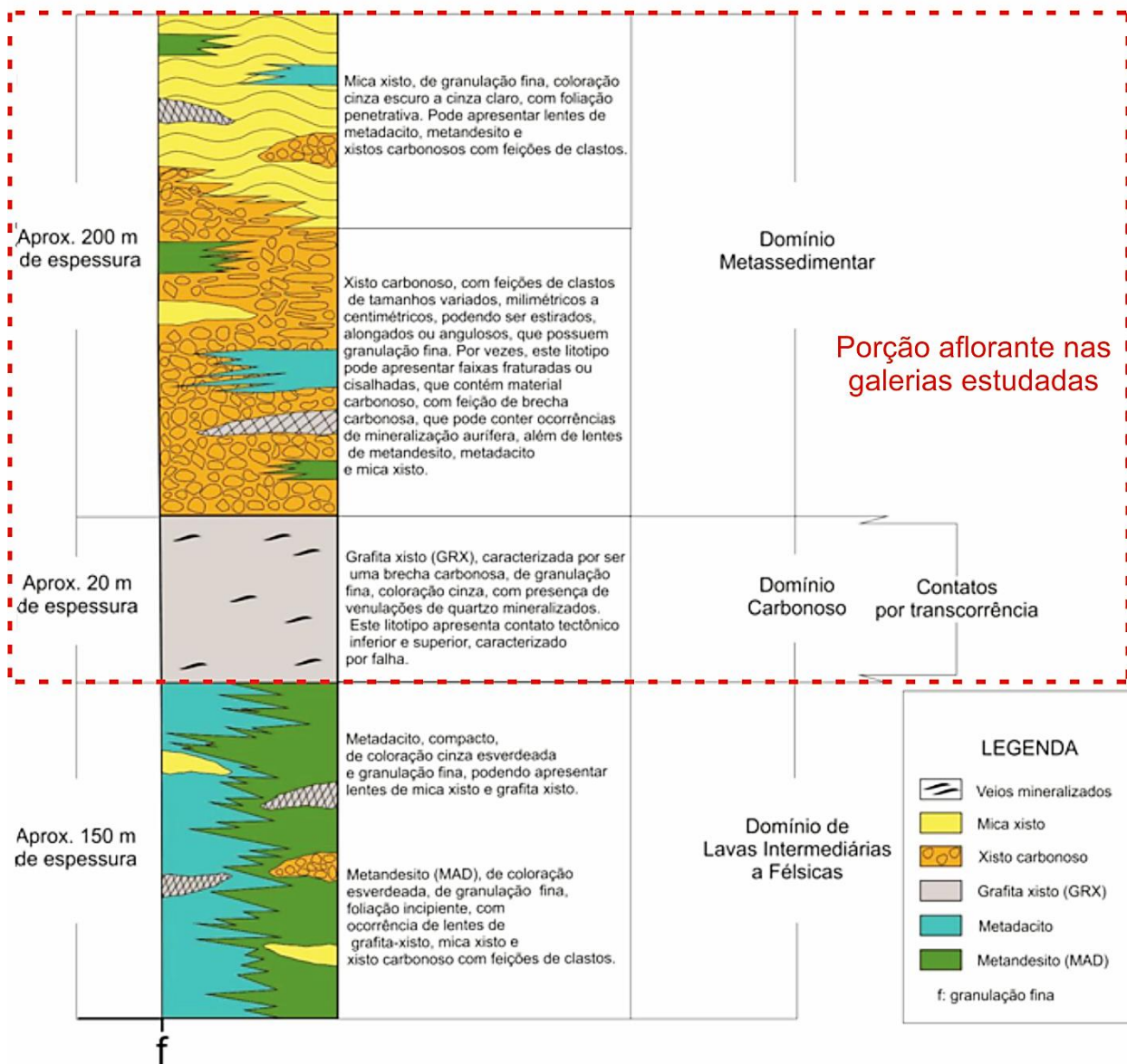
A Sequência Canto apresenta intensa deformação, o que dificulta a compreensão de seu empilhamento estratigráfico. O primeiro trabalho a apresentar uma coluna estratigráfica foi o de Assis (2011). O autor subdividiu a Sequência Canto em três domínios: domínio de lavas intermediárias a félsicas, domínio carbonoso e domínio metassedimentar (Figura 6). Nas galerias estudadas, foram observadas rochas compatíveis com as descrições dos domínios metassedimentar e carbonoso.

Figura 5. Perfil geológico esquemático das principais seqüências da porção sul do GBRI, destaque para Sequência Canto.



Fonte: SILVA et al., 2001

Figura 6. Coluna tectono-estratigráfica da Sequência Canto, destaque para os domínios estudados no trabalho.

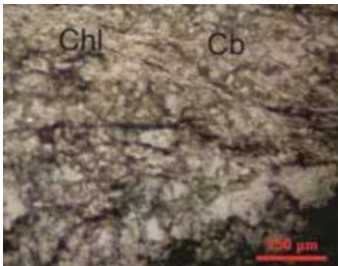
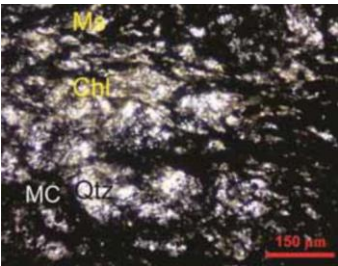
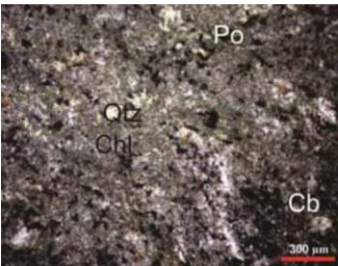


Fonte: ASSIS, 2011

O Quadro 1 resume as principais características geológicas e feições geotécnicas que podem influenciar o comportamento geomecânico dos domínios da Sequência Canto. resume as principais características de cada um dos domínios, levando em consideração feições geológicas e geotécnicas, como quantidade de material carbonoso e anisotropia. Estas feições podem influenciar diretamente no comportamento geomecânico do maciço rochoso.

Uma grande quantidade de material carbonoso pode implicar na redução das forças de atrito entre os blocos, aumentando a instabilidade das galerias. Este fator, aliado à uma forte anisotropia (foliação penetrativa, com comportamento de plano de descontinuidade), podem implicar na diminuição da estabilidade das galerias.

Quadro 1. Síntese das principais características geológicas e feições geotécnicas que podem influenciar o comportamento geomecânico dos domínios da Sequência Canto.

200 m	Domínio	Litotipos	Litotipos principais	Lâmina de litotipo principal	Assembleia mineral	Quantidade de material carbonoso	Anisotropia
20 m	Domínio Metassedimentar	Xistos carbonosos, clorita xisto, metadacitos, metandesitos, metapelitos vulcânicos	Clorita Xisto		Quartzo (Qtz), material carbonoso (MC), clorita (Chl), carbonato (Cb)	Baixa	Média
150 m	Domínio Carbonoso	Grafita Xisto	Grafita Xisto e Metapelito Vulcânico		Quartzo (Qtz), material carbonoso (MC), clorita (Chl), muscovita (Ms)	Alta	Média
	Domínio de Lavas Intermediárias a Félsicas	Metandesitos e metadacito, lentes de xisto carbonoso com feições de clastos.	Metadacito		Quartzo (Qtz), carbonato (Cb), clorita (Chl), pirrotita (Po)	Baixa	Fraca

Fonte: Modificado de Assis (2011)

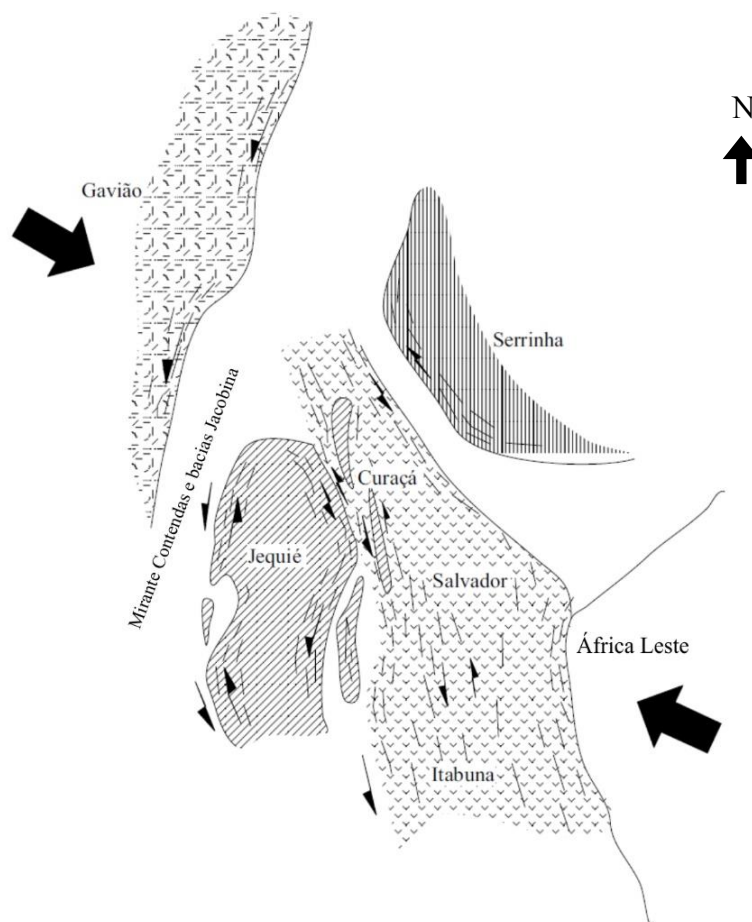
3.4 Geologia estrutural

O *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru (GBRI) está estruturalmente organizado em uma sucessão de sinclinais e anticlinais limitados por zonas de cisalhamento regionais, de orientação N-S na porção centro-norte e E-W na porção sul do GBRI.

Os principais eventos de deformação ocorreram no Paleoproterozóico, durante o Ciclo Tranzamazônico. A atual configuração estrutural formou-se devido à colisão de quatro segmentos crustais Arqueanos: Bloco Gavião, Bloco Jequié, Bloco Serrinha e Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá (BARBOSA, SABATÉ, 2002).

A Figura 7 ilustra a posição destes segmentos no início da colisão. A direção de encurtamento foi NW-SE, gerando zonas de cisalhamento transcorrente sinistrais. A excessão é a porção sul do GBRI, que possui foliação regional principal relacionada à zona de cisalhamento com cinemática destral (DONATTI FILHO, 2007).

Figura 7. Esquema da posição dos Blocos Arqueanos antes da colisão do Paleoproterozóico.



Fonte: BARBOSA; SABATÉ, 2002

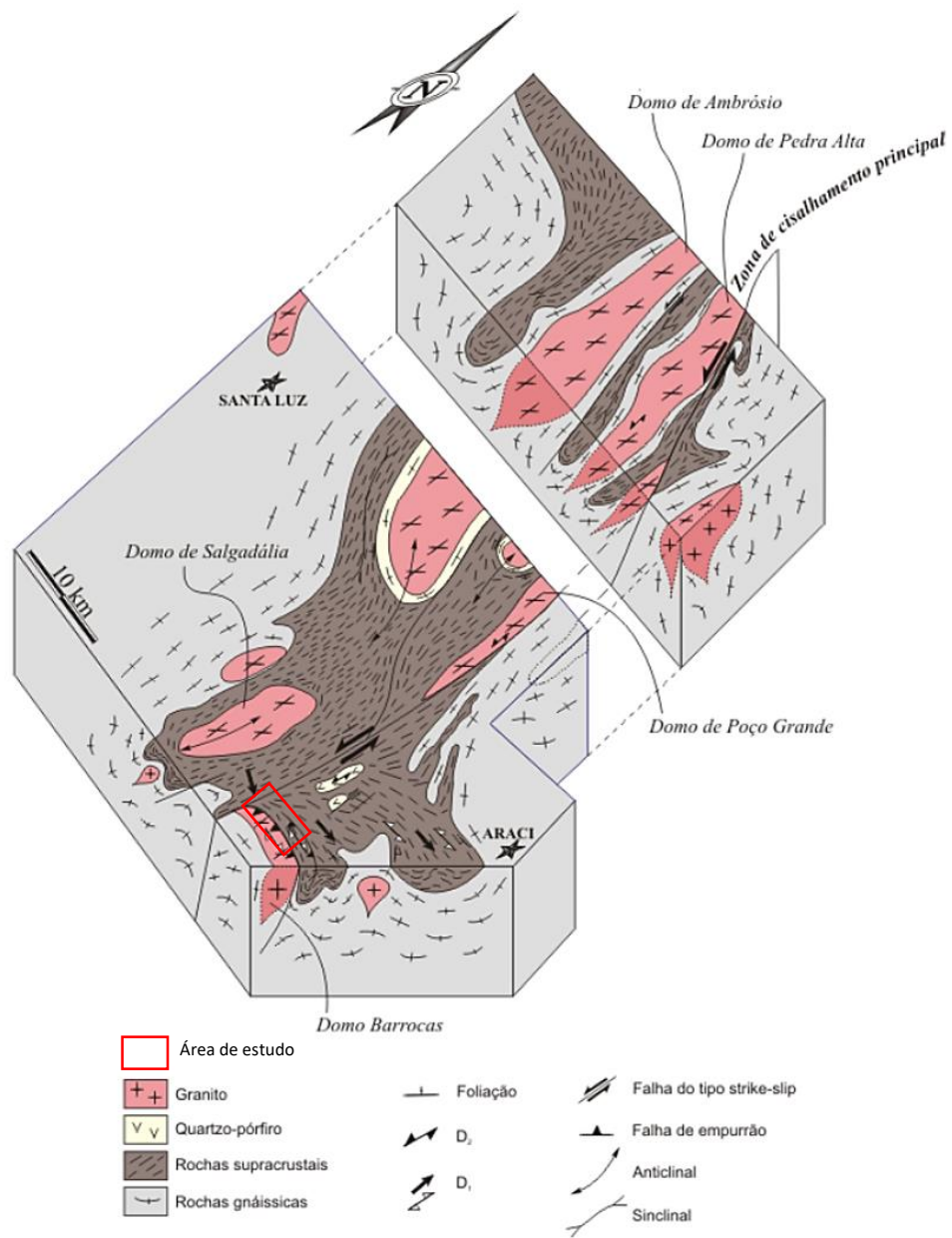
Chauvet et al. (1997) e Alves da Silva (1994) descrevem dois eventos tectônicos, D1 e D2. O evento D1 está relacionado ao início da colisão, com formação de

cavalgamentos de vergência SE, foliações de direção E-W à NW-SE e rumo de mergulho para S.

O evento D2 relaciona-se com a evolução da colisão para zonas de transcorrências N-S, deformando as estruturas geradas em D1. Em regiões próximas à principal zona de cisalhamento transcorrente N-S, as foliações de D1, que antes tinham direção E-W, são redobradas e tendem a ficar paralelas à zona de cisalhamento (CHAUVET et al., 1997).

A Figura 8 ilustra as principais estruturas regionais, bem como a influência das intrusões graníticas na deformação das rochas supracrustais (*Greenstones*). Nota-se que a área de estudo preserva estruturas D1 de direção principal E-W, diferentemente da principal estruturação regional, com foliações subverticais de direção N-S, geradas em D2.

Figura 8. Modelo estrutural da porção sul do GBRI.

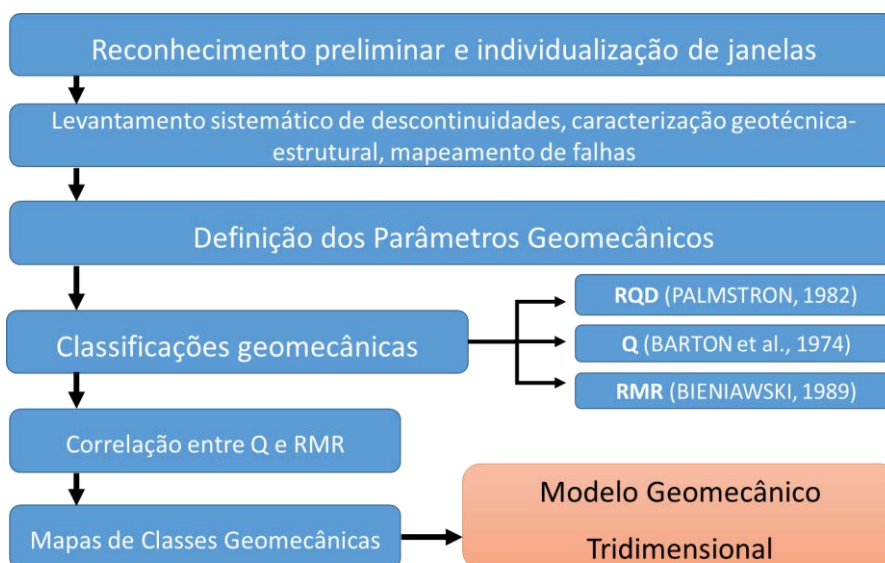


Fonte: CHAUVET et al., 1997

4 MÉTODOS E ETAPAS DO TRABALHO

Este capítulo irá descrever em detalhe as etapas para o desenvolvimento do trabalho e os métodos utilizados em cada uma. Foi elaborado uma fluxograma para melhor compreensão do sequenciamento das etapas (Figura 9).

Figura 9. Fluxograma das etapas do trabalho.



4.1 Seleção das galerias estudadas

Para seleção das galerias, considerou-se que uma galeria em desenvolvimento dificultaria o trabalho de levantamento de dados e mapeamento devido ao maior trânsito de veículos e equipamentos. Outro aspecto considerado foi a cobertura de poeira que cobre as paredes e teto das galerias após as explosões, fator que dificulta ainda mais a descrição das descontinuidades. Portanto, as galerias estudadas estavam inativas durante o período da coleta de dados e mapeamento.

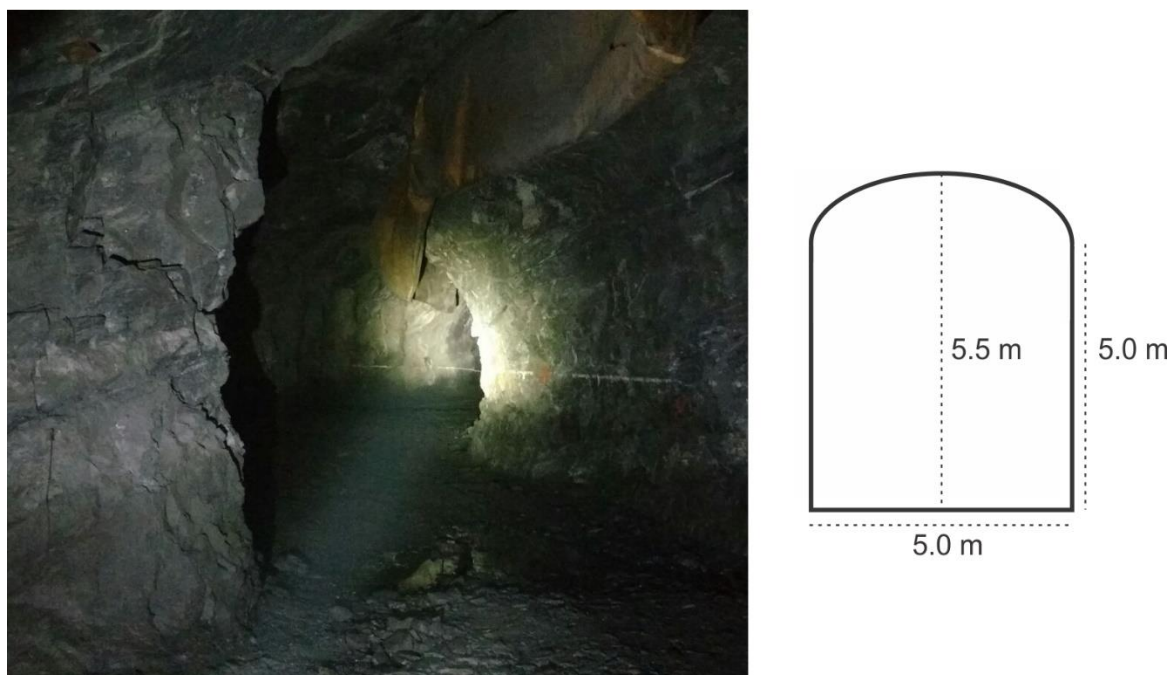
O levantamento de dados foi realizado em 5 galerias desenvolvidas dentro da Sequência Canto com profundidades entre 360 e 510 metros (Quadro 2). A nomenclatura adotada é composta por uma letra maiúscula, representando em qual corpo de minério a galeria está inserida, e por dois números, representando a profundidade. Por exemplo, a galeria C41 está inserida no corpo C a uma de profundidade de 410 m, a galeria E36 está inserida no corpo E a uma profundidade de 360 m. Atualmente a Mineração Fazenda Brasileiro conta com aproximadamente 200 km de galerias, chegando a profundidade máxima de 1070 m. As galerias estudadas têm em média largura de 5 metros, altura das

paredes de 5 m e teto em forma de arco, podendo atingir altura de eixo central de até 5,5 m (Figura 10).

Quadro 2. Galerias selecionadas para o estudo.

Galerias	Profundidade (m)	Direção	Extensão (m)
E 36	360	E-W	220
C 41	410	N-S	90
C 42	420	N-S	220
C 45	450	N-S	140
C 51	510	N-S e E-W	460

Figura 10. Foto de uma das galerias estudadas, e perfil ilustrando suas dimensões.



4.2 Reconhecimento preliminar e individualização de janelas

Em cada uma das 5 galerias selecionadas para o levantamento de dados foi realizado um reconhecimento preliminar, visando a identificação de trechos com características geomecânicas semelhantes. Portanto, utilizou-se o critério visual, observando características como litotipo, grau de fraturamento, número e tipo de

descontinuidades predominantes, tamanho dos blocos e incidência de chocos. Uma vez individualizados, cada trecho recebeu o nome de “janela” e foi numerado em ordem crescente, de acordo com o andamento do trabalho (J1, J2, J3, J4...).

Uma divisão simples, individualizando segmentos de mesmo tamanho, poderia colocar em uma mesma janela duas rochas muito diferentes. Para um bom resultado, optou-se por janelas homogêneas, de forma que as ponderações das classificações geomecânicas atribuídas a esta janela sejam as mais representativas possíveis.

4.3 Levantamento sistemático de descontinuidades

Várias estruturas podem agir como planos de descontinuidade: falhas, juntas, planos de acamamento, laminação, planos de foliação, fendas de tração e veios. Em um projeto de estabilização de maciço rochoso, a caracterização destas estruturas é de fundamental importância, pois influenciam diretamente no comportamento geomecânico da rocha (FIORI; CARMIGNANI, 2001).

Nesta etapa foram feitas medidas estruturais para compor um banco de dados. Este material será utilizado para a análise estrutural e identificação das principais famílias de descontinuidades.

4.4 Caracterização geotécnica-estrutural

Nesta etapa as janelas foram descritas em detalhe, seguindo uma série de parâmetros litológicos, geotécnicos e estruturais, focando principalmente na caracterização das descontinuidades. Os parâmetros foram: espaçamento, frequência, persistência, rugosidade, abertura e de juntas e resistência ao cisalhamento do material que as preenche (BARTON et al., 1974; BIENIAWSKI, 1989). Os dados aqui levantados serviram de base para as classificações geomecânicas.

4.5 Mapeamento de falhas

As falhas influenciam diretamente no grau de fraturamento do maciço, e conseqüentemente, na estabilidade. O mapeamento destas estruturas é uma importante ferramenta para a identificação e delimitação de zonas de cisalhamento.

Nesta etapa as falhas foram caracterizadas segundo atitude (bússola Clar), tipo (normal, inversa, transcorrente ou oblíqua), preenchimento (não existente, grafita, *gouge*

ou brecha) e espessura das mais significativas (>30 cm). Todas foram devidamente cartografadas e georreferenciadas com o auxílio de marcos topográficos distribuídos no teto das galerias pela equipe de topografia da mina. As distâncias das falhas aos marcos topográficos foram medidas com trena à laser de alta precisão.

4.6 Definição dos Parâmetros Geomecânicos

A definição dos parâmetros geomecânicos da rocha intacta foi feita a partir dos dados de ensaios de compressão uniaxial, triaxial e diametral, realizados pelo IPT (1987) e pela CESP (1988), cedidos pela Mineração Fazenda Brasileiro para a elaboração deste trabalho (Quadro 3). Portanto, é importante ressaltar que não foram realizados ensaios *in situ* em cada uma das janelas de estudo.

Os ensaios disponibilizados indicaram que a xistosidade tem maior influência sobre o modo de ruptura do corpo de prova, em comparação com o tipo litológico da amostra. Nos ensaios de compressão uniaxial, os rompimentos longitudinais apresentaram resultados da ordem de 200 MPa, enquanto os que romperam por cisalhamento, no plano da xistosidade, tiveram resultados da ordem de 45 a 68 MPa.

Da mesma forma, nos ensaios de resistência à tração, as amostras que sofreram influência da xistosidade apresentaram valores da ordem de 3 a 5 MPa, enquanto as que não foram influenciadas, 10 a 20 MPa. Para o coeficiente de Poisson, o valor utilizado foi de 0,25, considerando apenas rocha intacta.

Estes parâmetros geomecânicos foram utilizados como dados de entrada para as simulações numéricas de estabilidade, bem como para o parâmetro de resistência da rocha intacta de RMR (BIENIAWSKI, 1989).

Quadro 3. Parâmetros geomecânicos, extraídos do Projeto Conceitual da Mineração Fazenda Brasileiro.

Litologia	Tipo de Ruptura	Parâmetros				
		Rc (Mpa)	m	Rt (Mpa)	C (Mpa)	ϕ
	Todos	185,0	9,3	-19,4	45,0	39,0
Minério	Longitudinal	200,0	19,0	-10,5	40,0	49,0
	Cisalhamento	85,0	18,0	-4,7	18,0	46,0
CCX	Cisalhamento	68,0	8,3	-8,0	19,0	34,0
CAX	Cisalhamento	65,0	17,0	-3,8	14,2	44,0
CCX/CAX	Cisalhamento	66,5	12,3	-4,8	15,7	40,0
GRX	Cisalhamento	55,0	13,0	-4,2	14,4	39,0
CLX	Cisalhamento	52,0	14,0	-3,6	15,4	38,3
MGB	Cisalhamento	51,0	10,8	-4,7	15,5	34,7
GRX/CLX/MGB	Cisalhamento	45,7	15,2	-3,0	13,7	38,4
XISTOS	Cisalhamento	59,0	12,2	-4,8	15,7	38,3
TOTAL FB	Cisalhamento	83,0	12,0	-7,0	22,0	38,6

Onde:

CCX – Carbonato-clorita-xisto;

CAX – Quartzo-sericita-carbonato-xisto;

CLX – Quartzo-carbonato-clorita-xisto;

GRX – Grafita-sericita-carbonato-xisto;

MGB – Metagabro.

Fonte: Relatório interno cedido pela Brio Gold, segundo Brito (2003)

4.7 Classificações Geomecânicas

Neste item são abordadas as metodologias de classificação geomecânica adotadas no trabalho. São apresentados os parâmetros analisados e os pesos atribuídos a cada um deles.

4.7.1 RQD Volumétrico

O conceito de RQD (Rock Quality Designation) foi criado por Deere et al. (1966), o autor desenvolveu este método em virtude da necessidade de se obter um índice numérico para estimativa da qualidade da rocha de maneira rápida e objetiva, utilizando testemunhos de sondagem dos furos feitos durante a fase de investigação geotécnica, preliminar ao início da escavação. O RQD foi originalmente baseado na porcentagem de recuperação do furo, o índice é obtido através da soma dos comprimentos dos pedaços de

testemunho maiores que 10 cm, dividida pelo comprimento total perfurado, multiplicada por 100 (Equação 4.1):

$$RQD = \frac{\sum \text{pedaços de testemunho} > 10 \text{ cm}}{\text{comprimento total perfurado}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

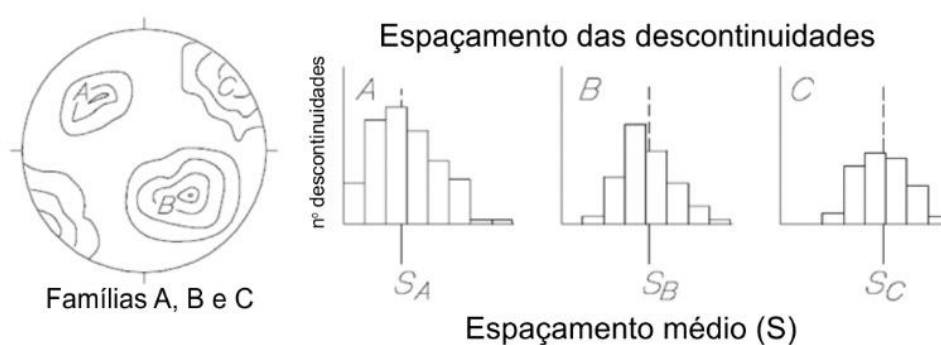
Porém, neste trabalho, o grau de fraturamento foi obtido em afloramentos, e não em furos. Por isso, a metodologia para a obtenção do índice RQD foi a proposta por Palmstrom (1982), introduzindo o conceito de RQD volumétrico. O autor propõe a correlação entre RQD volumétrico e J_v (índice volumétrico - número total de descontinuidades por unidade de comprimento) a partir da equação (Equação 4.2):

$$RQD \text{ volumétrico} = 115 - 3,3 J_v \quad (4.2)$$

O parâmetro J_v foi proposto por Palmstrom (1974), como uma unidade de medida para densidade de descontinuidades, interceptando 1 m³ de rocha. Este conceito foi sendo aplicado e aperfeiçoado em outros trabalho posteriores (PALMSTROM, 1982, 1985; SEM; EISSA, 1991, 1992). O valor é obtido através da somatória do inverso do espaçamento médio (S) das famílias de descontinuidade (Equação 4.3 e Figura 11). Para melhor compreensão, a Figura 12 traz um exemplo de como é feito o cálculo do J_v em um bloco de rocha contendo três famílias de descontinuidades, e como este índice é aplicado na fórmula de Palmstrom (1982).

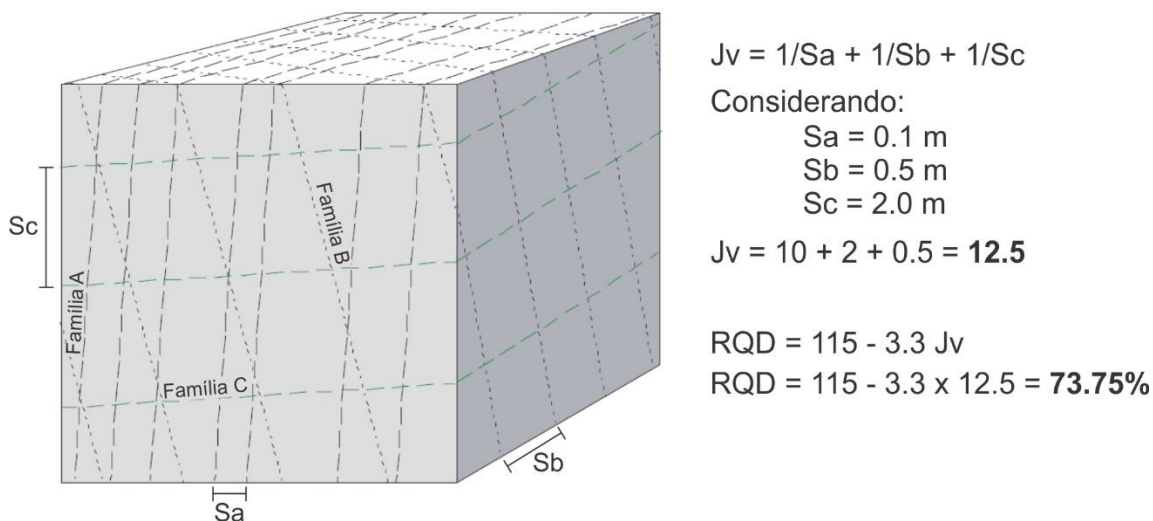
$$J_v = \frac{1}{S_A} + \frac{1}{S_B} + \frac{1}{S_C} + \dots \frac{1}{S_n} \quad (4.3)$$

Figura 11. Espaçamento médio das famílias de descontinuidade.



Fonte: PALMSTROM, 1982

Figura 12. Exemplo de cálculo de Jv e RQD volumétrico.



Fonte: Modificado de Palmstrom (1982)

Os índices RQD volumétrico obtidos são os dados de entrada para uma classificação dos maciços rochosos (Quadro 4). Esta classificação foi utilizada na análise de parâmetros geomecânicos para comparação do grau de faturamento e consequente qualidade das janelas estudadas.

Quadro 4. Quadro de classificação RQD

RQD (%)	Classe	Qualidade da Rocha
<25	1	Muito fraco
25 - 50	2	Fraco
50 - 75	3	Razoável
75 - 90	4	Bom
90 - 100	5	Excelente

Fonte: DEERE, 1968

4.7.2 Rock Mass Rating (RMR)

Este método foi desenvolvido por Bieniawski (1973), baseado em estudos de caso. Originalmente foram investigados 49 casos em 1973. O método foi passando por ajustes conforme novos estudos de caso, em 1984 foram investigadas 62 minas de carvão e em 1987, 78 casos em túneis de construção civil e minas subterrâneas. Portanto, o método foi criado e reajustado embasado em experiências reais em 351 casos de estudo. A versão utilizada no presente trabalho é a de 1989 (BIENIAWSKI, 1989).

A classificação é baseada no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros que Bieniawski considerou contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos, principalmente em casos de obras subterrâneas (OLIVEIRA et al., 1998). O somatório dos pesos de cada parâmetro constitui o índice RMR (Quadro 5). Os parâmetros utilizados são:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta
2. *Rock Quality Designation* (RQD)
3. Espaçamento das descontinuidades
4. Condição das descontinuidades
5. Influência da água
6. Orientação das descontinuidades

Quadro 5. Parâmetros e pesos atribuídos segundo método RMR.

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 Mpa	4 - 10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5 - 25 Mpa	1 - 5 Mpa	< 1 Mpa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %		
	Pesos		20	15	10	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1 - 5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	Nenhum	< 10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condições Gerais	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimientos	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Fonte: BIENIAWSKI, 1989

O parâmetro 4 trata sobre a condição das descontinuidades, porém de uma maneira generalista, sem detalhar a atribuição de pesos à características importantes, tais como: persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e grau de alteração. Para aumentar o detalhamento e melhor descrever a condição das descontinuidades foi utilizado o Quadro 6. A soma dos pesos atribuídos à cada característica descrita foi utilizada no lugar do parâmetro 4.

Quadro 6. Detalhamento do parâmetro de condição das discontinuidades.

Persistência	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Liso	Polido
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989

Quanto ao parâmetro 5, considerou-se condições secas, visto que não há importante presença de água nas discontinuidades do maciço rochoso. O Quadro 7 apresenta as classificações do maciço rochoso segundo o método RMR.

Como o objetivo deste trabalho é caracterizar o comportamento do maciço rochoso de uma maneira geral, e não de maneira específica à uma galeria, o parâmetro 6, (fator de orientação das discontinuidades com relação à direção de abertura das galerias) não será considerado. Desta forma o índice obtido será o RMR básico (SINGH; GOEL, 1999), ilustrado na Equação 4.4.

$$RMR \text{ básico} = RMR - \text{fator de orientação das discontinuidades} \quad (4.4)$$

Quadro 7. Classificação do maciço rochoso baseada no método RMR.

RMR	Classe	Descrição
81 a 100	I	Muito bom
61 a 80	II	Bom
41 a 60	III	Razoável
21 a 40	IV	Fraco
< 20	V	Muito fraco

Fonte: BIENIAWSKI, 1989

4.7.3 Rock Tunnelling Quality Index (Q)

Este método foi criado na Noruega, em 1974, por Barton, Lien e Lunde (BARTON et al., 1974). Seu desenvolvimento se deu a partir do estudo de caso de 212 túneis em diferentes litotipos. Bem como o RMR, o método Q trata-se de um sistema de classificação quantitativa, criado com o intuito de auxiliar no design de suportes para as escavações.

O *Tunneling Quality Index*, também conhecido como sistema Q de Barton, baseia-se na descrição e atribuição de índices à seis parâmetros:

1. RQD
2. Número de famílias de fratura (J_n - *joint set number*)
3. Rugosidade das descontinuidades (J_r - *joint roughness number*)
4. Grau de alteração (J_a - *joint alteration number*)
5. Afluência de água (J_w - *joint water reduction factor*)
6. Estado de tensão do maciço rochoso (SRF - *Stress Reduction Factor*)

Os Quadros 8 a 11 foram utilizados como referência em campo para identificar as notas que devem ser atribuídas.

Tais parâmetros são dispostos em três razões, que são multiplicadas entre si (Equação 4.5). A razão RQD/ J_n tem por objetivo descrever o tamanho dos blocos, a razão J_r/J_a corresponde à caracterização das condições cisalhantes inter-blocos, e por sua vez, a razão J_w/SRF descreve o stress atuante no maciço (PALMSTRON; BROCH, 2006). O Quadro 12 apresenta as classificações do maciço rochoso segundo o método Q.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4.5)$$

Dentre todos, o parâmetro SRF é o mais difícil de se obter pois depende de testes *in-situ* para quantificação e caracterização do regime de forças atuantes no maciço rochoso. Optou-se por utilizar um valor de $SRF=1$, que segundo Barton et al. (1974), corresponde à condições favoráveis, com stress médio. Esta escolha foi feita devido à profundidade das galerias estudadas (360 a 510 m), e ao fato de nunca ter sido registradas

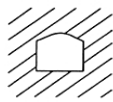
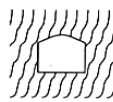
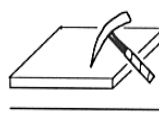
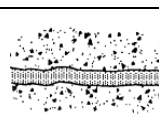
ocorrências de *rock burst* ou deformação de paredes e tetos, sintomas da ação de um elevado *stress*.

Quadro 8. Pesos atribuídos ao parâmetro J_n .

Famílias de descontinuidades	J_n
Rocha intacta sem juntas	0,5
Descontinuidades esparsas ou ausentes	1
1 Família	2
1 Família + Aleatórias	3
2 Famílias	4
2 Famílias + Aleatórias	6
3 Famílias	9
3 Famílias + Aleatórias	12
4 ou mais famílias	15
Rocha Triturada	20

Fonte: BARTON et al., 1974

Quadro 9. Pesos atribuídos ao parâmetro J_r .

J_r			Grande Escala		
			Plana	Ondulada	Descontínua
					
Pequena Escala	Polida (estrias)		0,5	1,5	2,0
	Lisa		1,0	2,0	3,0
	Rugosa		1,5	3,0	4,0
	Planos com preenchimento espesso, previne contato entre as paredes		1,0	1,0	1,5

Fonte: Modificado de BARTON et al., 1974

Quadro 10. Pesos atribuídos ao parâmetro Ja.

Tipo de alteração das paredes	Ja
Paredes duras, compactas ou com preenchimento de materiais impermeáveis	0,75
Paredes sem alteração, pigmentação superficial incipiente	1
Paredes ligeiramente alteradas, preenchimento com material abrasivo	3
Contato com até 10 cm de espessura. Preenchimento de micas e argila	5
Contato de 10 a 50 cm de espessura. Preenchimento argiloso	8
Paredes sem contato. Espessura maior que 50 cm. Preenchimento argiloso	15

Fonte: BARTON et al., 1974

Quadro 11. Pesos atribuídos ao parâmetro Jw.

Ação da água	Jw
Escavação seca ou com pequena afluência de água	1
Afluência média de água com eventual carreamento do preenchimento	0,66
Afluência elevada de água em rochas competentes com descontinuidades não preenchidas	0,5
Afluência elevada de água com carreamento significativo do preenchimento	0,33
Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), com decaimento com o tempo.	0,15
Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo.	0,08

Fonte: BARTON et al., 1974

Quadro 12. Classificação do maciço rochoso baseada no sistema Q.

Q	Classe	Descrição
400 a 1000	A	Excepcionalmente bom
100 a 400	B	Extremamente bom
40 a 100	C	Muito bom
10 a 40	D	Bom
4 a 10	E	Razoável
1 a 4	F	Fraco
0,1 a 1	G	Muito fraco
0,1 a 0,01	H	Extremamente fraco
0,001 a 0,01	I	Excepcionalmente fraco

Fonte: BARTON et al., 1974

4.8 Correlação entre Q e RMR

A correlação entre as classificações geomecânica RMR e Q foi feita segundo a metodologia proposta por Goel et al. (1996). Em ambas classificações podem haver dificuldades e incertezas quanto à coleta de dados, principalmente com relação à medições das tensões *in situ* e resistência da rocha intacta (KAISER et al., 1986; GOEL et al., 1995).

Com a finalidade de diminuir tais incertezas e aumentar o coeficiente de correlação das classificações geomecânicas, Goel et al. (1996) criou dois novos índices: RCR (rock condition rating) e N (rock mass number).

Onde N é o índice Q, sem a influência do stress, parâmetro SRF (Equação 4.6); e RCR é o índice RMR, descontando a resistência da rocha intacta e fator de orientação das descontinuidades (Equação 4.7).

$$N = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_w \quad (4.6)$$

$$RCR = RMR - (\text{resistência da rocha intacta} + \text{orientação das descontinuidades}) \quad (4.7)$$

A correlação RCR x N de Goel et al. (1996) foi feita a partir de 63 estudos de caso e apresentou um coeficiente de correlação de 0,92. As correlações RMR x Q anteriormente feitas por outros autores apresentaram coeficientes menores (Quadro 13).

Quadro 13. Correlações entre RMR e Q.

Autor	Equação	Coeficiente de Correlação
Bieniawski (1984)	$RMR = 9 \ln Q + 44$	0,77
Rutledge & Preston (1978)	$RMR = 5,9 \ln Q + 43$	0,81
Moreno (1980)	$RMR = 5,4 \ln Q + 55,2$	0,55
Cameron-Clarke & Budavari (1981)	$RMR = 5 \ln Q + 60,8$	Alta dispersão
Abad et al. (1984)	$RMR = 10,5 \ln Q + 41,8$	0,66
Goel et al. (1996)	$RCR = 8 \ln N + 30$	0,92

Fonte: SINGH; GOEL, 1999

Uma vez identificado o valor RCR em função de N, basta somar a nota referente ao fator de resistência da rocha intacta para termos o índice RMR básico. Quanto ao N em função de RCR, basta incluir novamente o fator de stress (SRF) para termos o índice Q.

Assim, pôde-se confrontar os resultados das classificações geomecânicas, a fim de conferir se as descrições eram equivalentes ou não.

A correlação utilizada neste trabalho segue a metodologia de Goel et al. (1996), porém os dados utilizados foram as classificações geomecânicas realizadas na mina. Desta forma, a correlação encontrada é exclusiva para o maciço rochoso da Sequência Canto estudado ao longo das galerias.

4.9 Mapas de classes geomecânicas

Foram elaborados três mapas de classes geomecânicas para cada uma das cinco galerias estudadas: RMRbásico (BIENIAWSKI, 1989; SINGH; GOEL 1999), sistema Q (Barton et al., 1974), e um de integração destes métodos. Todos os mapas foram elaborados no software ArcGIS 10.3.

Cada galeria foi dividida em janelas, e cada janela foi classificada segundo metodologia RMRbásico e Q. O mapa de classes tem por objetivo identificar e delimitar unidades geomecânicas que pertençam à mesma classe, com comportamento geomecânico semelhante.

Em alguns trechos das galerias, notou-se que os métodos de classificação não eram compatíveis com a qualidade do maciço. Por vezes o método RMR representava melhor a realidade observada em campo, em outros trechos o sistema Q se mostrava mais adequado, e em outros, nenhum dos dois.

Como solução, adotou-se a metodologia de se fazer um mapa que integrasse os métodos, considerando a qualidade do maciço observada em campo, em forma de retroanálise. Se uma janela apresentou descrições Q e RMR como Razoável, porém aquele trecho visivelmente tinha uma elevada incidência de blocos instáveis (informalmente chamados de chocos) e alto potencial de cunha, optou-se considerar a descrição como Ruim. Portanto, no mapa de integração as classificações geomecânicas foram calibradas considerando as observações de campo, para que o modelo final fosse o mais realista possível.

Para fazer a extrapolação lateral das classificações das janelas e delimitação do contato entre as domínios geomecânicos, foram utilizadas as direções das foliações mais proeminentes, visto que estas desempenhavam o papel de principais descontinuidades, além de falhas que influenciavam na qualidade do maciço.

4.10 Modelo tridimensional

Uma vez finalizados os mapas de classes geomecânicas, sentiu-se a necessidade de integrar estes mapas para tentar visualizar tridimensionalmente a disposição das unidades geomecânicas. Por serem em profundidades diferentes, é difícil representar um modelo geomecânico de um maciço rochoso apenas de maneira bidimensional.

Para elaborar este modelo, foram utilizados os softwares *Arcscene*, para posicionamento dos mapas, e *Leapfrog Geo*, para delimitar as unidades geomecânicas.

4.11 Análise estrutural e cinemática

Existem três maneiras de se analisar os dados de medidas estruturais: diagramas de rosetas, histogramas e projeções estereográficas. Para este trabalho, foi utilizada a projeção estereográfica, pois permite a análise tridimensional das atitudes das descontinuidades.

Os polos das descontinuidades foram plotados em um diagrama de igual área, também conhecido como diagrama de Schmidt-Lambert. Diferentes densidades de concentração de polos foram identificadas através de linhas de contorno, que apontaram três zonas com maior densidade de concentração, representando três famílias de descontinuidades (LOCZY; LADEIRA, 1976; GOODMAN, 1989; FOSSEN, 2015; FIORI, 2016).

Traçou-se uma linha de plano representando a atitude média de cada família. A intersecção destes planos no estereograma de igual área pode indicar o potencial para ruptura em cunha, formando um desenho triangular (GOODMAN, 1989). Este método denomina-se análise cinemática de ruptura em cunha, e é comumente utilizado por diversos pesquisadores, por ser relativamente rápido e de baixo custo (PARK; WEST, 2001; GOKCEOGLU et al., 2000).

Os produtos desta etapa foram elaborados com auxílio do software *Dips 7.0*, produzido e comercializado pela empresa Rocscience.

4.12 Análises geotécnicas e simulação de estabilidade

As análises geotécnicas foram feitas com o uso de softwares de tratamento de dados e simulação estabilidade, pertencentes à plataforma Rocscience (*Unwedge* e *RS2*), focando na identificação do potencial de ruptura em cunha e distribuição de tensões ao redor da escavação; foram feitas como complementação de dados, para simular situações reais encontradas na mina, exemplificando a influência de alguns dos parâmetros descritos, e a importância de se conhecer cada um deles.

Aa simulações de estabilidade de cunhas foram elaboradas no software *Unwedge*, pertencente à empresa Rocscience, utilizando o critério de análise de descontinuidades proposto por Barton; Bandis (1991). A galeria utilizada na simulação tem dimensão de 5x5 m, teto em forma de arco, em direção norte, sem inclinação. Este tipo de simulação já vem sendo utilizado por alguns autores em projetos reais, como o apresentado por Curran et al. 2004.

Foi aplicado o conceito de fator de segurança, que é definido pela razão das forças desfavoráveis pelas favoráveis à ruptura. A simulação considerou o cenário de maior risco possível para tender à maior segurança: planos muito lisos, preenchidos por grafita e ruptura por cisalhamento em teste de compressão uniaxial, influenciada pela xistosidade. Os parâmetros geomecânicos adotados na simulação foram retirados do Projeto Conceitual da Mina, cedido pela Fazenda Brasileiro Desenvolvimento Mineral - Brio Gold.

A simulação do campo de tensões atuantes em uma galeria foi elaborada no software *RS2*. Foram utilizados como *input* os dados levantados nas etapas de caracterização geotécnica-estrutural, levantamento sistemático de descontinuidades e definição dos parâmetros geomecânicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela aplicação dos métodos descritos, bem como as discussões referentes a cada um deles.

5.1 Classificações geomecânicas e mapas de classes RMR e Q

As classificações Q e RMR e os pesos dos parâmetros adotados para obtenção de cada uma delas foram dispostos nos Quadros Quadro 14 e Quadro 15, respectivamente. Cada janela foi caracterizada segundo método Q (BARTON et al., 1974) e método RMR básico (SINGH; GOEL, 1999; BIENIAWSKI, 1989).

Quadro 14. Resultado da classificação Q, e pesos dos parâmetros adotados.

Galeria	Janela	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Índice Q	Classe	Descrição
C41	1	76,6	6	1	0,75	1	1	17,0	D	Bom
C41	2	84,2	4	1	0,75	1	1	28,1	D	Bom
C41	3	61,3	6	1	0,75	1	1	13,6	D	Bom
C41	4	81,5	6	1	0,75	1	1	18,1	D	Bom
C42	1	70,3	4	1	0,75	1	1	23,4	D	Bom
C42	2	83,1	9	1	0,75	1	1	12,3	D	Bom
C42	3	64,1	9	1	0,75	1	1	9,5	E	Razoável
C42	4	32,0	9	0,5	0,75	1	1	2,4	F	Fraco
C42	17	55,8	15	1	0,75	1	1	5,0	E	Razoável
C42	6	78,7	12	0,5	0,75	1	1	4,4	E	Razoável
C42	7	89,3	12	0,5	0,75	1	1	5,0	E	Razoável
C42	8	73,4	12	0,5	0,75	1	1	4,1	E	Razoável
C42	9	62,9	12	0,5	0,75	1	1	3,5	F	Fraco
C42	10	85,3	12	0,5	0,75	1	1	4,7	E	Razoável
C45	1	32,5	15	0,5	0,75	1	1	1,4	F	Fraco
C45	2	42,4	12	1	0,75	1	1	4,7	E	Razoável
C45	3	65,5	15	1,5	0,75	1	1	8,7	E	Razoável
C51	1	35,1	15	0,5	0,75	1	1	1,6	F	Fraco
C51	2	40,4	9	1	0,75	1	1	6,0	E	Razoável
C51	3	65,5	9	1	0,75	1	1	9,7	E	Razoável
C51	4	65,5	9	0,5	0,75	1	1	4,9	E	Razoável
C51	5	76,1	9	1	0,75	1	1	11,3	D	Bom
C51	6	78,7	9	0,5	0,75	1	1	5,8	E	Razoável
C51	7	89,3	6	1,5	0,75	1	1	29,8	D	Bom
C51	8	88,6	2	1,5	0,75	1	1	88,6	C	Muito Bom
C51	9	68,8	2	1	0,75	1	1	45,9	C	Muito Bom
C51	10	65,5	6	1	0,75	1	1	14,6	D	Bom
E36	1	80,7	12	1	0,75	1	1	9,0	E	Razoável
E36	2	87,3	12	1	0,75	1	1	9,7	E	Razoável

Quadro 15. Resultado da classificação RMR básico, e pesos dos parâmetros adotados.

Galeria	Janela	Resistência da rocha intacta	RQD	Espaçamento das descontinuidades	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	Grau de alteração	Presença de água	Orientação das descontinuidades (Desconsiderada)	RMR básico	Classe	Descrição
C41	1	7	17	8	1	6	1	6	6	15	0	67	II	Bom
C41	2	7	17	8	1	6	1	6	6	15	0	67	II	Bom
C41	3	7	13	10	0	6	1	6	6	15	0	64	II	Bom
C41	4	7	17	15	1	6	1	6	6	15	0	74	II	Bom
C42	1	7	13	10	1	6	1	6	6	15	0	65	II	Bom
C42	2	7	17	8	0	6	1	6	6	15	0	66	II	Bom
C42	3	7	13	10	0	6	1	6	6	15	0	64	II	Bom
C42	4	7	8	8	1	6	0	6	6	15	0	57	III	Razoável
C42	5	7	13	10	0	6	1	6	6	15	0	64	II	Bom
C42	6	7	17	5	0	6	0	6	6	15	0	62	II	Bom
C42	7	7	17	5	0	6	1	6	6	15	0	63	II	Bom
C42	8	7	13	5	0	6	0	6	6	15	0	58	III	Razoável
C42	9	7	13	10	0	6	0	2	6	15	0	59	III	Razoável
C42	10	7	17	10	0	6	0	2	6	15	0	63	II	Bom
C45	1	7	8	5	0	6	0	2	6	15	0	49	III	Razoável
C45	2	7	8	5	0	6	1	6	6	15	0	54	III	Razoável
C45	3	7	13	10	0	6	3	6	6	15	0	66	II	Bom
C51	1	7	8	8	0	6	0	2	6	15	0	52	III	Razoável
C51	2	7	8	8	0	6	1	2	6	15	0	53	III	Razoável
C51	3	7	13	8	0	6	0	2	6	15	0	57	III	Razoável
C51	4	7	13	8	0	6	0	2	6	15	0	57	III	Razoável
C51	5	7	17	10	0	6	3	6	6	15	0	70	II	Bom
C51	6	7	17	15	0	6	0	6	6	15	0	72	II	Bom
C51	7	7	17	15	0	6	3	6	6	15	0	75	II	Bom
C51	8	7	17	15	1	6	3	6	6	15	0	76	II	Bom
C51	9	7	13	15	0	6	3	6	6	15	0	71	II	Bom
C51	10	7	13	8	0	6	1	6	6	15	0	62	II	Bom
E36	1	7	17	8	0	6	1	6	6	15	0	66	II	Bom
E36	2	7	17	8	0	6	1	6	6	15	0	66	II	Bom

Os quadros apresentados foram a base para a elaboração dos mapas de classes geomecânicas. Foram feitos dois mapas para cada uma das cinco galerias estudadas, um mapa de classe RMR (Apêndice 1) e um mapa de classe Q (Apêndice 2).

Estes mapas foram feitos a partir de extrapolação lateral das descrições identificadas pelos métodos de classificação. Os principais fatores condicionantes do contato entre dois domínios geomecânicos são a direção da foliação mais proeminente na

rocha, e a direção de falhas. Estas direções guiaram a extrapolação lateral das descrições, resultantes das classificações geomecânicas Q e RMR básico.

Analisando os mapas, pôde-se observar que o método RMR apresentou melhores descrições, com predomínio da descrição Bom (20 janelas) e algumas com descrição Razoável (9 janelas). As menores notas foram dadas às janelas com material carbonoso preenchendo as descontinuidades, com planos com pouca ou nenhuma rugosidade, como a janela 1 da galeria C51. Outro importante fator para diminuição das notas foi o intenso fraturamento em janelas com grande influência de falhas, como as janelas 3 e 4 da galeria C51.

Os mapas feitos a partir do método Q apresentaram maior variedade de descrições, desde Muito Bom à Fraco. A galeria C51 foi a única a apresentar todas as descrições. Pôde-se notar que as janelas mais ao sul, apresentaram melhores descrições que as janelas mais ao norte. Fica evidente que a mudança do litotipo influencia muito nas condições geomecânicas do maciço, visto que ao norte entra-se no domínio carbonoso da Sequência Canto, e ao sul, domínio metassedimentar.

Nos mapas da galeria C42 não foi possível a continuação da extrapolação lateral de uma descrição, pois as janelas de estudo adjacentes não apresentaram descrição equivalente. Por conta disso, apresentou domínios geomecânicos com formatos arredondados, que não necessariamente seguem os condicionantes geológicos, como contatos litológicos, foliações ou falhas.

Seguindo os condicionantes geológicos, como falhas e contato litológicos, alguns contatos entre os domínios geomecânicos dividem janelas de estudo ao meio, como se apresentassem duas classificações geomecânicas diferentes. Apesar de cada janela ter sido classificado em apenas uma única classe Q ou RMR, optou-se por seguir tais condicionantes geológicos para que a extrapolação fosse coerente com a geologia da área. Os critérios utilizados para definição dos contatos que dividem janelas são apresentados nos Quadros Quadro 16 e Quadro 17.

Para contornar estes problemas e tornar o modelo geomecânico mais realista, tornou-se necessário correlacionar os métodos Q e RMR básico, visando a elaboração de um mapa de integração.

Quadro 16. Condicionantes geológicos utilizados para definição de contatos que dividem uma mesma janela em duas classes geomecânicas do método Q.

Janelas com duas descrições - Q		
Galeria	Janelas	Critério utilizado para extrapolação
C45	J1	Falha com brecha grosseira
	J2	Falha com material carbonoso
	J5	Falha com material carbonoso
	J6	Falha com material carbonoso
	J10	Falha com brecha grosseira

Quadro 17. Condicionantes geológicos utilizados para definição de contatos que dividem uma mesma janela em duas classes geomecânicas do método RMR.

Janelas com duas descrições - RMR		
Galeria	Janelas	Critério utilizado para extrapolação
C42	J3	Falha com brecha grosseira
	J5	Falha com material carbonoso
	J7	Falha com brecha grosseira
C45	J3	Falha com material carbonoso
C51	J2	Falha com material carbonoso
	J5	Falha com material carbonoso
	J6	Falha com material carbonoso

5.2 Correlação entre Q e RMR

A correlação entre os índices RMR básico e Q foi feita segundo a metodologia proposta por Goel et al. (1996), que sugere que os fatores de orientação das descontinuidades, resistência da rocha intacta e stress sejam desconsiderados. A finalidade é diminuir incertezas existentes por dificuldades na coleta de dados,

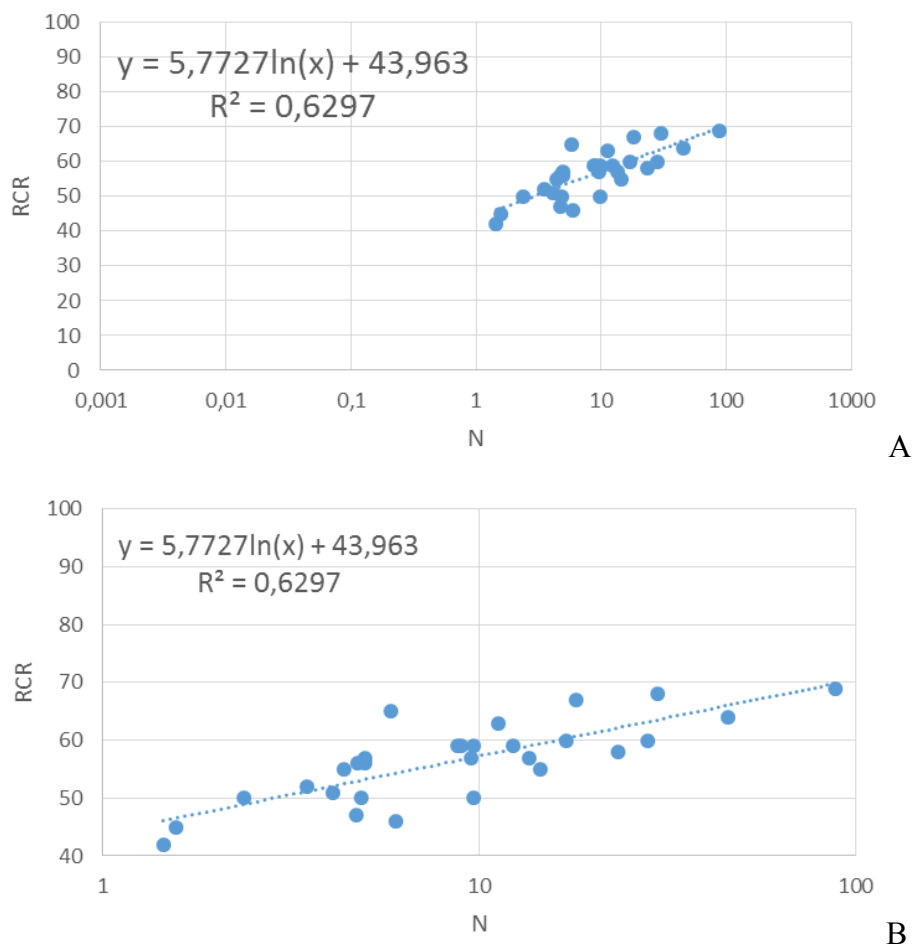
aumentando o coeficiente de correlação. Desta forma, os índices utilizados para a correlação foram RCR e N, já descritos no capítulo de métodos e etapas da pesquisa.

A correlação encontrada (Equações 5.1 e 5.2) teve um coeficiente de correlação (r) de 0,79 e um coeficiente de determinação (r^2) de aproximadamente 0,63. Isto significa que cerca de 37% da variabilidade da classificação N não pode ser descrita pela variabilidade da classificação RCR, e vice versa. A dispersão dos 29 pontos de correlação pode ser vista na Figura 13.

$$RCR = 5,7727 \ln N + 43,963 \quad (5.1)$$

$$N = 0,0184 e^{0,1091 RCR} \quad (5.2)$$

Figura 13. A) Gráfico de correlação entre índices N e RCR. B) Gráfico de correlação entre índices N e RCR em menor escala, com redução dos eixos, para melhor visualização da regressão linear proposta.



Uma possível explicação para esta dificuldade em descrever a variabilidade é a que existem fatores que podem influenciar na qualidade do maciço rochoso e não são levados em conta nas classificações, como por exemplo a variação mineralógica e a influência das detonações.

Tal constatação evidencia a dificuldade de se correlacionar duas classificações geomecânicas distintas, que usam diferentes parâmetros e diferentes pesos para se atingir uma nota.

Para elaboração dos mapas de integração, foram utilizados os índices RMRbásico e Q, e não RCR e N. Uma vez identificado o valor RCR em função de N, basta somar a nota referente ao fator de resistência da rocha intacta para termos o índice RMR básico. Quanto ao N em função de RCR, basta incluir novamente o fator de stress (SRF) para termos o índice Q.

5.3 Mapas de integração

Apesar de amplamente utilizados, ambos métodos de classificação geomecânica possuem incertezas quanto a coleta de dados. Outro fato que deve ser levado em conta para integração é o de que os parâmetros descritos nos métodos são diferentes, e quando iguais, apresentam pesos diferentes e influenciam na nota de classificação final de maneiras distintas, por exemplo, a rugosidade.

Quando uma baixa rugosidade em um plano polido é descrita segundo RMR (Bieniawski, 1989), a nota final da classificação é penalizada de maneira branda. Porém, quando descrita pelo método Q (Barton et al., 1974), o parâmetro Jr pode penalizar de maneira severa a nota da classificação final. Por isso, em algumas janelas, as descrições dadas pelos métodos não se equivalem.

Para estes casos optou-se por utilizar a pior descrição como critério para integração dos métodos, de modo a tender à maior segurança.

Nas janelas em que há equivalência de descrição entre os métodos, foi necessário fazer o uso da fórmula de correlação para transformar as notas Q em RMRbásico, e RMRbásico em Q. Desta forma, foi possível conferir se o que um método de classificação geomecânica descreve como Bom, é Bom também para o outro método.

Portanto, em cada janela foi aplicada a fórmula de correlação, estipulando uma nota RMRbásico em função de Q, e uma nota de Q em função de RMRbásico. Baseando-se nestas notas, foi possível comparar as descrições resultantes em cada janela. As

descrições destacadas em cinza foram as que não apresentaram equivalência entre os métodos (Quadro 19).

À estas janelas onde não houve equivalência, foi necessária uma vistoria de campo, para conferir se as descrições propostas pelos métodos eram compatíveis com a realidade observada. Em outras palavras, o método adotado foi uma retroanálise dos dados levantados, baseada em observações de campo.

Um bom exemplo é o da Janela 5, na galeria C42 (Figura 14) Esta janela foi classificada como Bom pelo método RMR, porém Razoável pelo método Q. Também houve divergência de descrição quando confrontou-se a descrição de RMRbásico e RMRbásico em função de Q. Neste caso, foi necessário recorrer à observações de campo para definir qual descrição deveria ser utilizada no mapa de integração. O mesmo aconteceu com as janelas 8 e 9 da galeria C51; 6, 7, 8 da galeria C42; 2 da galeria E36.

Em campo, a Janela 5 da galeria C42 apresentava grande quantidade de material carbonoso, com elevado grau de fraturamento, a rocha tinha forte anisotropia e elevada incidência de blocos instáveis (informalmente chamados de chocos) e cicatrizes de quedas de bloco, principalmente nas foliações. Dado as circunstâncias, constatou-se que a descrição que melhor se enquadrava à realidade de campo era a Ruim, discordando tanto da descrição resultante de Q (Razoável), quanto de RMRbásico (Bom).

Assim, foram definidos dois tipos de critérios para se determinar a descrição utilizada no mapa de integração dos métodos: critério da pior descrição e critério de observação de campo.

O Quadro 20 traz as descrições de cada janela, bem como quais critérios foram utilizados para determinação da descrição utilizada no mapa de integração de métodos (Apêndice 3). Neste quadro há uma coluna de razão entre a nota estimada pela equação e a nota estipulada pela aplicação do método. Quando a razão é igual a 1, a equação de correlação forneceu uma nota igual à estipulada em campo. Quando a razão é menor que 1, a correlação subestimou a nota estipulada em campo. Quando a razão é maior que 1, correlação superestimou a nota estipulada em campo. As descrições destacadas em cinza foram as que não apresentaram equivalência entre os métodos.

Assim como nos mapas de RMR e Q (Apêndices 1 e 2, respectivamente), algumas janelas tiveram de ser divididas em dois domínios geomecânicos, seguindo condicionantes geológicos. No mapa de integração da galeria C42 (Figura 14), três janelas foram divididas em dois domínios geomecânicos: J3, J4 e J10. Os condicionantes utilizados nas definições dos contatos entre os domínios são expostos no Quadro 18.

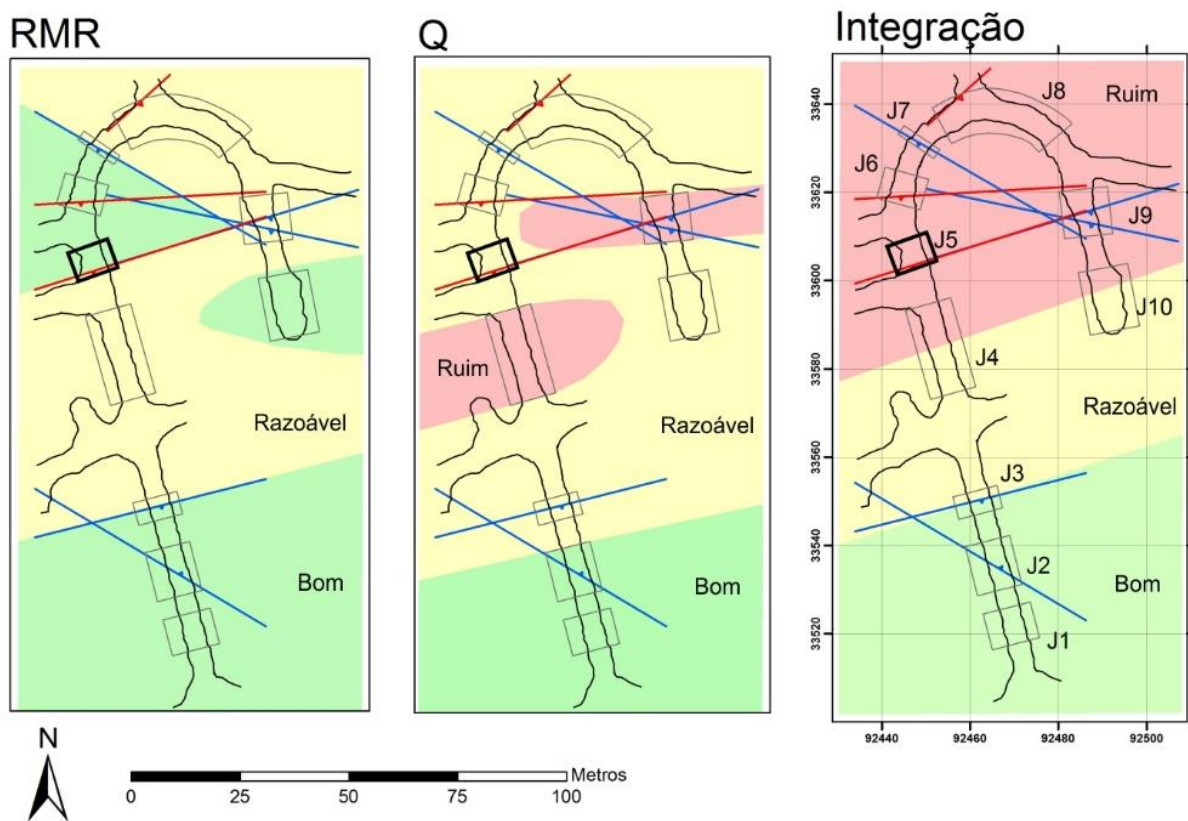
Quadro 18. Condicionantes geológicos utilizados para definição de contatos que dividem uma mesma janela em dois domínios geomecânicos nos mapas de integração.

Janelas com duas descrições - Integração		
Galeria	Janelas	Critério utilizado para extrapolação
C41	J4	Contato litológico
C42	J3	Falha com brecha grosseira
	J4	Contato litológico
	J10	Contato litológico
C45	J1	Falha com brecha grosseira
C51	J2	Falha com material carbonoso
	J5	Falha com material carbonoso
	J6	Falha com material carbonoso
	J10	Falha com brecha grosseira

A metodologia proposta por este trabalho reforça a importância da descrição detalhada do maciço rochoso em campo. Muitas vezes, apenas as classificações geomecânicas tradicionais não são suficientes para compreender o comportamento do maciço. Torna-se indispensável a caracterização geológica do material estudado, levando em conta a assembleia mineral, disposição dos minerais, estruturas planares e lineares presentes na rocha, além da compreensão do contexto geológico regional e local.

Quanto melhor descrito o maciço rochoso, mais informações estarão disponíveis para se fazer retroanálises das classificações e calibrar o modelo geomecânico.

Figura 14. Comparação de diferentes descrições para uma mesma janela da galeria C42.
 Bom segundo RMRbásico, Razoável segundo Q, Ruim segundo critério de observação de campo no mapa de integração.



Quadro 19. Quadro de equivalência de descrições baseada no uso de equação de correlação.

Galeria	Janela	Litotipo	RMRb	Descrição	RMRb(Q)	Descrição	RMRb(Q)/RMRb	Q	Descrição	Q(RMRb)	Descrição	Q(RMRb)/Q
C41	1	CLX	67	Bom	67	Bom	1,00	17,0	Bom	12,9	Bom	0,76
C41	2	CLX	67	Bom	70	Bom	1,05	28,1	Bom	12,9	Bom	0,46
C41	3	CLX	64	Bom	66	Bom	1,03	13,6	Bom	9,3	Razoável	0,68
C41	4	CLX	74	Bom	68	Bom	0,91	18,1	Bom	27,6	Bom	1,52
C42	1	CLX	65	Bom	69	Bom	1,06	23,4	Bom	10,3	Bom	0,44
C42	2	CLX	66	Bom	65	Bom	0,99	12,3	Bom	11,5	Bom	0,94
C42	3	MPV	64	Bom	64	Bom	1,00	9,5	Razoável	9,3	Razoável	0,98
C42	4	MPV/GRX	57	Razoável	56	Razoável	0,98	2,4	Fraco	4,3	Razoável	1,82
C42	5	MPV	64	Bom	60	Razoável	0,94	5,0	Razoável	9,3	Razoável	1,87
C42	6	MPV/GRX	62	Bom	59	Razoável	0,96	4,4	Razoável	7,4	Razoável	1,70
C42	7	MPV	63	Bom	60	Razoável	0,96	5,0	Razoável	8,3	Razoável	1,67
C42	8	MPV/GRX	58	Razoável	59	Razoável	1,02	4,1	Razoável	4,8	Razoável	1,18
C42	9	MPV	59	Razoável	58	Razoável	0,99	3,5	Fraco	5,4	Razoável	1,54
C42	10	MPV	63	Bom	60	Razoável	0,95	4,7	Razoável	8,3	Razoável	1,75
C45	1	MPV/GRX	49	Razoável	53	Razoável	1,08	1,4	Fraco	1,8	Fraco	1,25
C45	2	MPV	54	Razoável	60	Razoável	1,11	4,7	Razoável	3,1	Fraco	0,66
C45	3	MPV	66	Bom	63	Bom	0,96	8,7	Razoável	11,5	Bom	1,32
C51	1	GRX	52	Razoável	54	Bom	1,03	1,6	Fraco	2,5	Fraco	1,60
C51	2	MPV	53	Razoável	61	Bom	1,16	6,0	Razoável	2,8	Fraco	0,47
C51	3	MPV/GRX	57	Razoável	64	Bom	1,12	9,7	Razoável	4,3	Razoável	0,44
C51	4	MPV/GRX	57	Razoável	60	Razoável	1,05	4,9	Razoável	4,3	Razoável	0,89
C51	5	MPV	70	Bom	65	Bom	0,93	11,3	Bom	17,8	Bom	1,58
C51	6	MPV/GRX	72	Bom	61	Bom	0,85	5,8	Razoável	22,2	Bom	3,80
C51	7	MPV	75	Bom	71	Bom	0,94	29,8	Bom	30,8	Bom	1,03
C51	8	CLX	76	Bom	77	Bom	1,01	88,6	Muito Bom	34,3	Bom	0,39
C51	9	CLX	71	Bom	73	Bom	1,03	45,9	Muito Bom	19,9	Bom	0,43
C51	10	MPV	62	Bom	66	Bom	1,07	14,6	Bom	7,4	Razoável	0,51
E36	1	MPV	66	Bom	64	Bom	0,96	9,0	Razoável	11,5	Bom	1,29
E36	2	CLX	66	Bom	64	Bom	0,97	9,7	Razoável	11,5	Bom	1,19

RMRb = índice RMRbásico estipulado em campo; **RMRb(Q)** = estimativa do índice RMRbásico em função de Q; **Q** = índice Q estipulado em campo; **Q(RMRb)** = estimativa do índice Q em função de RMRbásico

CLX = Clorita Xisto; **MPV** = Metapelito Vulcânico; **GRX** = Grafita Xisto; **MPV/GRX** = intercalação de Metapelito Vulcânico e Grafita Xisto

Quadro 20. Quadro de comparação de descrições, segundo diferentes métodos, e critérios utilizados para determinação da descrição utilizada nos mapas de integração.

Galeria	Janela	Litotipo	RMRb	RMRb(Q)	Q	Q(RMRb)	Integração	Critério
C41	1	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C41	2	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C41	3	CLX	Bom	Bom	Bom	Razoável	Bom	Pior descrição
C41	4	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C42	1	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C42	2	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C42	3	MPV	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C42	4	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Fraco	Razoável	Fraco	Pior descrição
C42	5	MPV	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	6	MPV/GRX	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	7	MPV	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	8	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	9	MPV	Razoável	Razoável	Fraco	Razoável	Fraco	Pior descrição
C42	10	MPV	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C45	1	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Fraco	Fraco	Fraco	Pior descrição
C45	2	MPV	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Razoável	Pior descrição
C45	3	MPV	Bom	Bom	Razoável	Bom	Razoável	Pior descrição
C51	1	GRX	Razoável	Bom	Fraco	Fraco	Fraco	Pior descrição
C51	2	MPV	Razoável	Bom	Razoável	Fraco	Razoável	Pior descrição
C51	3	MPV/GRX	Razoável	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C51	4	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C51	5	MPV	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C51	6	MPV/GRX	Bom	Bom	Razoável	Bom	Razoável	Pior descrição
C51	7	MPV	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C51	8	CLX	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Observação de campo
C51	9	CLX	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Observação de campo
C51	10	MPV	Bom	Bom	Bom	Razoável	Bom	Pior descrição
E36	1	MPV	Bom	Bom	Razoável	Bom	Razoável	Pior descrição
E36	2	CLX	Bom	Bom	Razoável	Bom	Bom	Observação de campo

RMRb = índice RMRbásico estipulado em campo; **RMRb(Q)** = estimativa do índice RMRbásico em função de Q; **Q** = índice Q estipulado em campo; **Q(RMRb)** = estimativa do índice Q em função de RMRbásico

CLX = Clorita Xisto; **MPV** = Metapelito Vulcânico; **GRX** = Grafita Xisto; **MPV/GRX** = intercalação de Metapelito Vulcânico e Grafita Xisto

5.4 Modelo tridimensional

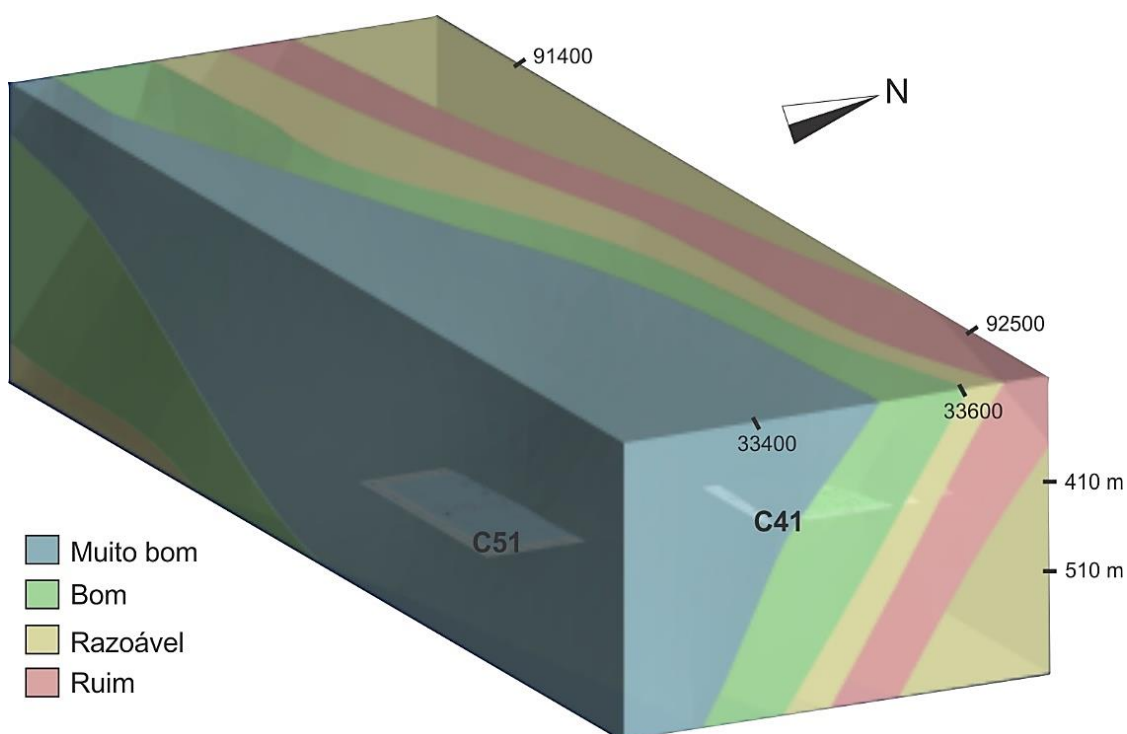
Os mapas de integração foram georreferenciados e colocados em profundidade para a criação do modelo tridimensional, utilizando o software *Leapfrog Geo*. O produto gerado foi o modelo geomecânico tridimensional (Figura 15). Foi elaborado um vídeo para melhor visualização deste modelo, que foi salvo em um CD (Apêndice 4).

Este modelo tridimensional também pode ser visualizado através do software gratuito *Leapfrog Viewer*, onde é possível rotacionar o modelo e criar perfis em todas direções. O arquivo para abrir o modelo neste software também foi salvo no CD (Apêndice 4).

O modelo tridimensional é composto por um polígono com dimensões de 460 m de largura, 1270 m de comprimento e 350 m de altura. Esta ferramenta possibilitou delimitar os domínios geomecânicos e visualizar o formato de cada um. Os domínios seguem, de maneira geral, os contatos litológicos e foliações predominantes, têm direção E-W com rumo de mergulho para S.

A principal zona de fraqueza é o domínio ruim, presente nos mapas de integração das galerias C41, C42, C45, C51, com cerca de 70 metros de espessura.

Figura 15. Modelo geomecânico tridimensional elaborado a partir de mapas de integração de classes RMR e Q, calibrado com observações de campo.



5.5 Análise estrutural

As análises estruturais foram feitas a partir dos domínios geomecânicos definidos nos mapas de integração, uma análise para os domínios Regular e Ruim, outra para os domínios Bom e Muito Bom.

As análises usaram os dados de levantamento de descontinuidades, sendo consideradas apenas as principais estruturas de cada janela, que mais influenciavam na estabilidade das galerias, podendo ser falhas, foliações ou juntas. Os polos das descontinuidades foram plotados em um diagrama de igual área, e as direções, em um diagrama de rosetas. Este tratamento de dados foi feito com auxílio do software *Dips 7.0*, da plataforma *Rocscience*.

Na Figura 16 pode-se constatar que os domínios geomecânicos Bom e Muito Bom apresentam maior influência das juntas como condicionantes de instabilidades, com atitude média de 253/82, e predomínio de direção NNW-SSE no diagrama de roseta. Os planos de foliação apresentaram-se com inclinações variadas, indicando a influência de dobras ou basculamentos por ação de falhas. Porém, as foliações tem rumo de mergulho para Sul, direção Leste-Oeste e atitude média em torno de 180/60. Em sua maioria, as falhas eram paralelas à foliação, sendo a xistosidade o principal plano de movimentação. Em alguns poucos casos as falhas eram subverticais com movimentação ao longo de juntas. A ocorrência de falhas estava diretamente ligada ao aumento da quantidade de material carbonoso na rocha.

Na Figura 17 pode-se constatar que os domínios geomecânicos Razoável e Ruim apresentam maior influência das falhas e foliações como condicionantes de instabilidades, ambas estruturas estavam geralmente paralelas, com atitude média de 176/45, com predomínio de direção E-W. Assim como nos domínios Bom e Muito Bom, a ocorrência de falhas estava diretamente ligada ao aumento da quantidade de material carbonoso na rocha. Também foi possível identificar a influência das juntas como condicionantes de instabilidades, com direção principal NNW-SSE no diagrama de roseta, compatível com a direção principal das juntas presentes nos domínios Bom e Muito Bom.

Figura 16. Estereograma e diagrama de roseta dos domínios geomecânicos Bom e Muito Bom, delimitados nos mapas de integração e modelo tridimensional. Atitude plano principal 253/82, máximo de polos 073/08, $n = 40$.

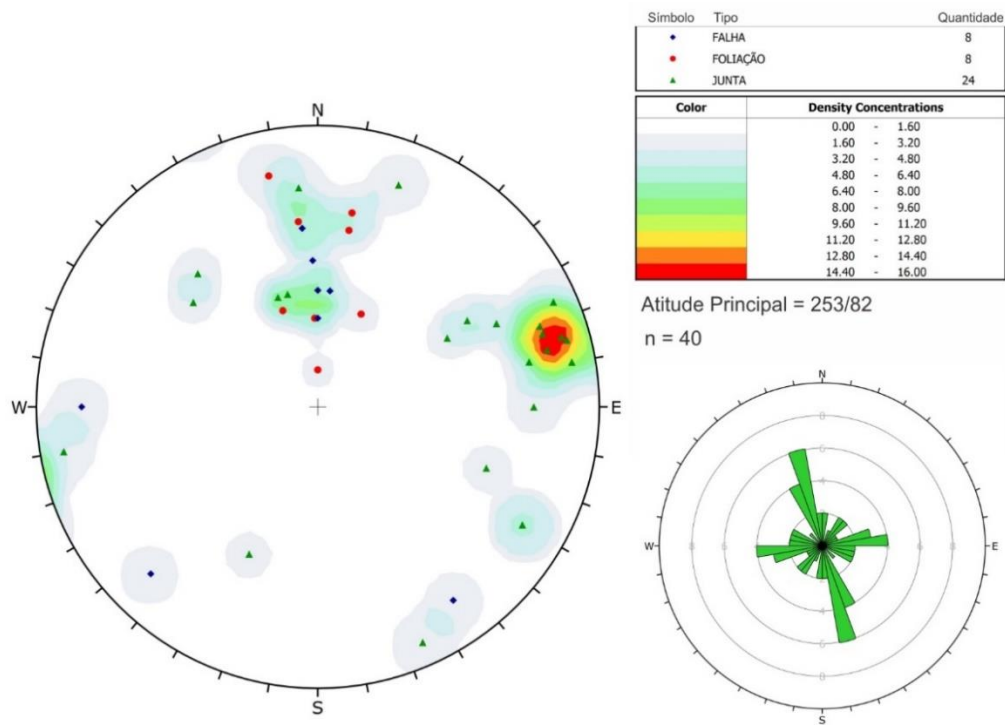
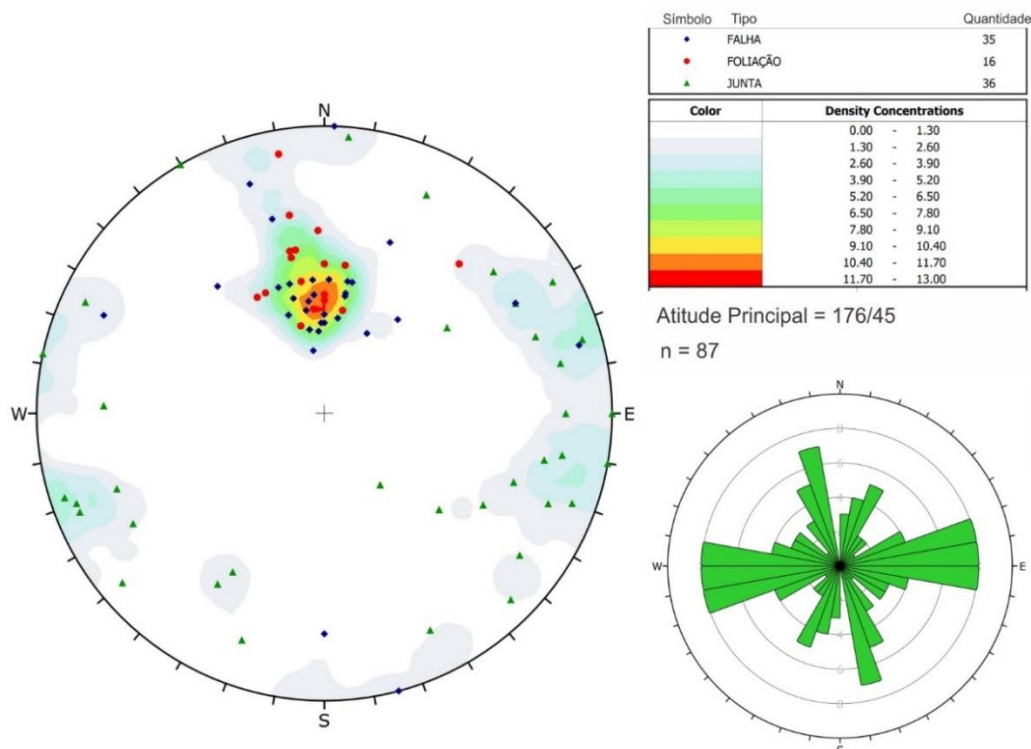


Figura 17. Estereograma e diagrama de roseta dos domínios geomecânicos Razoável e Ruim, delimitados nos mapas de integração e modelo tridimensional. Atitude plano principal 176/45, máximo de polos 356/45, $n = 87$.



Uma possível interpretação para a diferença no padrão estrutural entre os domínios é a de que os domínios Bom e Muito Bom estão inseridos na porção metassedimentar da Sequência Canto, majoritariamente composta por clorita xistos e metapelitos vulcânicos; enquanto os domínios Razoável e Ruim estão inseridos na porção carbonosa da Sequência Canto, majoritariamente composta por grafita xistos.

Neste litotipo, a foliação é muito mais proeminente, com forte anisotropia. A grafita se faz presente não só ao longo dos planos de foliação, mas também nas juntas subverticais, de modo que o atrito entre os planos é reduzido, facilitando a movimentação entre os blocos.

5.6 Análise dos parâmetros geotécnicos

Foram analisados os parâmetros RQD e rugosidade RMR, baseados nos dados levantados durante a etapa de caracterização geotécnica-estrutural. As análises foram feitas separadamente, uma para os domínios geomecânicos Bom e Muito Bom, outra para os domínios Razoável e Ruim.

A comparação do parâmetro RQD mostrou que para os domínios Bom e Muito Bom, 65% das janelas estudadas apresentaram RQD entre 75 e 90%, o que é considerado bom (Figura 18). Os outros 35% foram janelas com RQD entre 50 e 75%, considerado razoável (DEERE, 1968).

A análise dos domínios Razoável e Ruim revelou que apenas 30% das janelas estudadas apresentaram RQD na classe bom, 37% na classe razoável, e 33% na classe ruim, com RQD entre 25 e 50%.

A comparação do parâmetro rugosidade RMR, com classes de Muito Rugoso a Polido, mostrou que 21% das janelas dos domínios Razoável e Ruim apresentaram planos polidos, contra apenas 5% dos domínios Bom e Muito Bom (Figura 19).

O resultado das análises evidenciou a influência do fator geológico na qualidade do maciço rochoso. À medida que se avança dos domínios Bom e Muito Bom para os domínios Razoável e Ruim, o grau de faturamento e a quantidade de material carbonoso aumentam, enquanto que a rugosidade entre os blocos, diminui.

É possível associar este aumento de material carbonoso ao contato entre o domínio metassedimentar e o domínio carbonoso da Sequência Canto. Provavelmente o contato entre os domínios geomecânicos coincide com o contato das rochas metassedimentares (Clorita Xisto e Metapelito Vulcânico) e carbonosas (Grafita Xisto).

Figura 18. Gráfico de comparação dos valores RQD obtidos nas janelas dos domínios geomecânicos Bom e Muito Bom, e Razoável e Ruim dos mapas de integração.

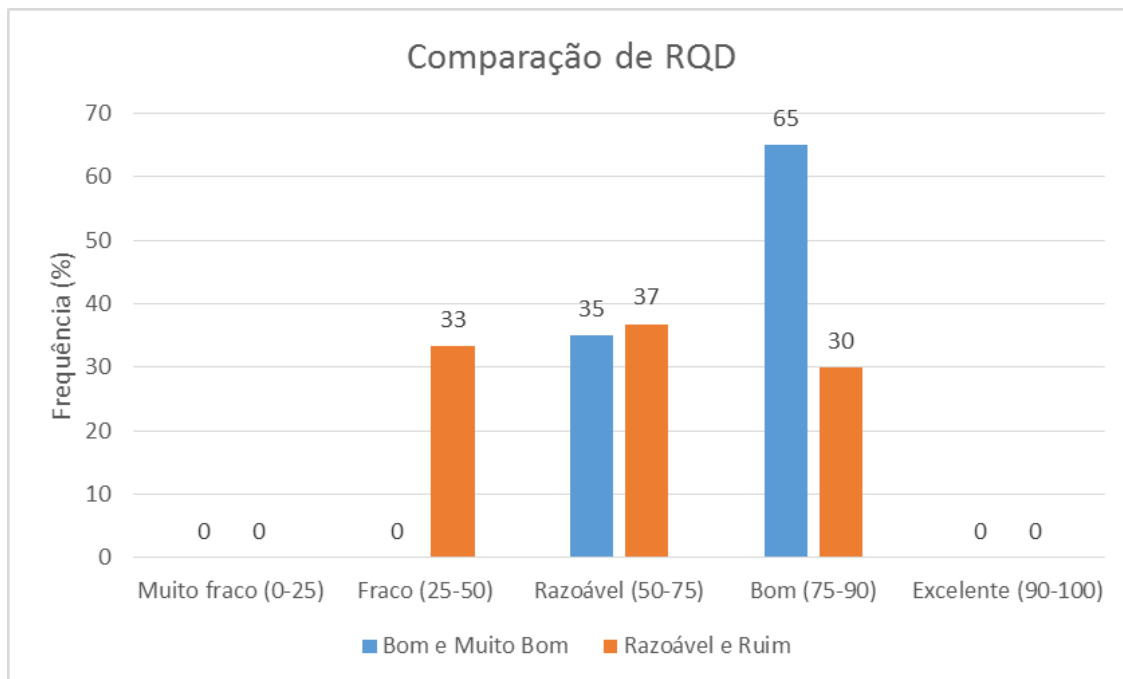
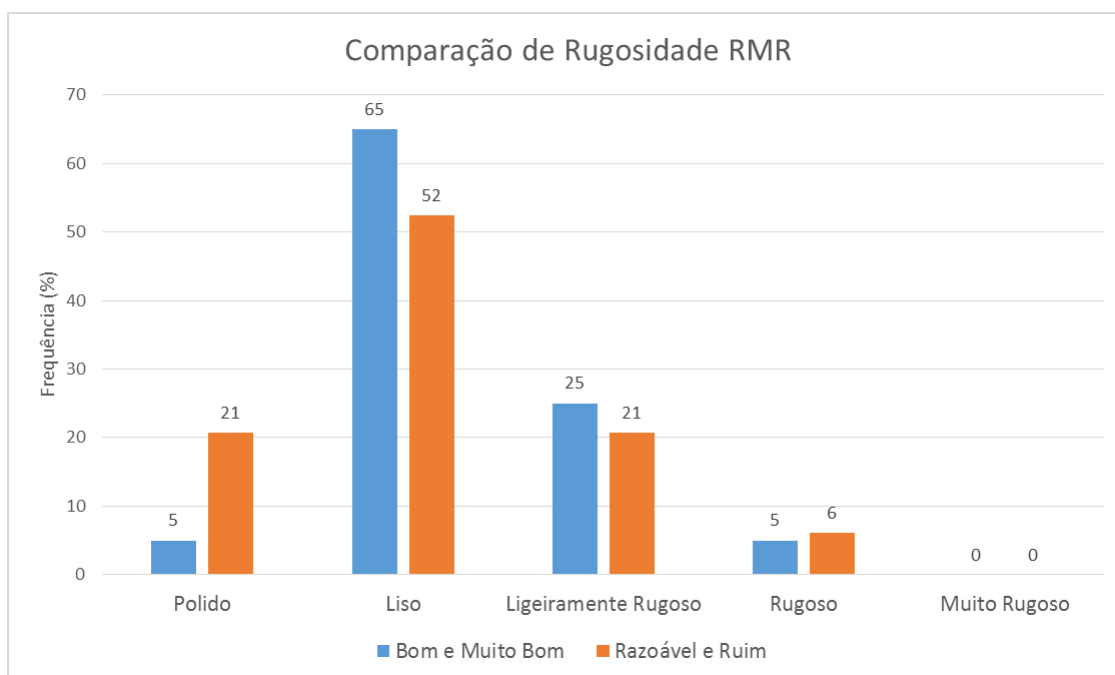


Figura 19. Gráfico de comparação dos valores de rugosidade RMR obtidos nas janelas dos domínios geomecânicos Bom e Muito Bom, e Razoável e Ruim dos mapas de integração.



5.7 Análise de estabilidade de cunhas

A simulação foi feita para uma galeria hipotética, inserida nos domínios geomecânicos Regular e Ruim, por isso foram utilizadas todas medidas estruturais feitas nas janelas pertencentes à estes domínios. A galeria utilizada na simulação tem dimensão de 5x5 m, teto em forma de arco, em direção norte, sem inclinação, inserida nos domínios geomecânicos Regular e Ruim. Em nenhuma das janelas inseridas nos domínios Bom e Muito Bom observou-se em campo o potencial para ruptura em cunha, por isso não foram realizadas simulações para estes domínios.

A caracterização das descontinuidades seguiu o critério de análise de descontinuidades proposto por Barton; Bandis (1991). A simulação considerou o cenário de maior risco possível para tender à maior segurança: planos muito lisos, preenchidos por grafita ($JRC=0,6$) e ruptura em teste de compressão uniaxial influenciada pela xistosidade ($JCS=67$). Os parâmetros geomecânicos adotados na simulação foram retirados do Projeto Conceitual da Mina, cedido pela Fazenda Brasileiro Desenvolvimento Mineral - Brio Gold (resistência à compressão uniaxial = 68 Mpa, coeficiente de atrito interno = 38 MPa).

Os dados de orientação espacial de descontinuidades levantados na etapa do levantamento sistemático serviram de base para a projeção estereográfica no software *Dips 7.0*, que identificou três principais famílias de descontinuidade. Duas destas famílias são compostas por planos de juntas com alto ângulo de mergulho (255/85 e 298/67), e a restante é composta principalmente por planos de foliação e falhas, de atitude média 177/44 (Figura 20).

Os planos médios destas três famílias se interceptam e formam um padrão no estereograma que indica o potencial para formação de ruptura em cunha.

O modelo tridimensional elaborado no software *Unwedge* permitiu modelar o formato das cunhas com relação à galeria escolhida para a análise. O modelo resultou em 4 cunhas, sendo duas nas paredes da galeria (verde e azul), uma no teto (vermelha) e outra no piso (marrom) - Figura 21.

O software também foi utilizado para identificar o volume, altura do ápice das cunhas e fator de segurança, informações fundamentais para o dimensionamento do suporte necessário para estabilização do maciço rochoso (Quadro 21).

O fator de segurança calculado indicou que apenas a cunha no piso da galeria (marrom) seria estável, as outras três cunhas não se sustentariam sem a aplicação de

suportes, visto que o fator de segurança foi menor que 1 (forças favoráveis à ruptura > forças desfavoráveis à ruptura). Destas três cunhas instáveis, a vermelha é a mais crítica, e a verde é a que mais se aproxima do equilíbrio limite.

É importante enfatizar que os resultados obtidos através da aplicação desta metodologia são estimativas simplistas, que focam apenas na identificação da morfologia das cunhas. Este tipo de estudo é algo necessário em projetos reais, porém outros aspectos devem ser considerados para uma análise mais confiável, como o coeficiente de atrito dos planos formadores da cunha e as tensões *in situ* que atuam na galeria.

Figura 20. Análise estrutural e cinemática em projeção estereográfica elaborada no software *Dips 7.0*.

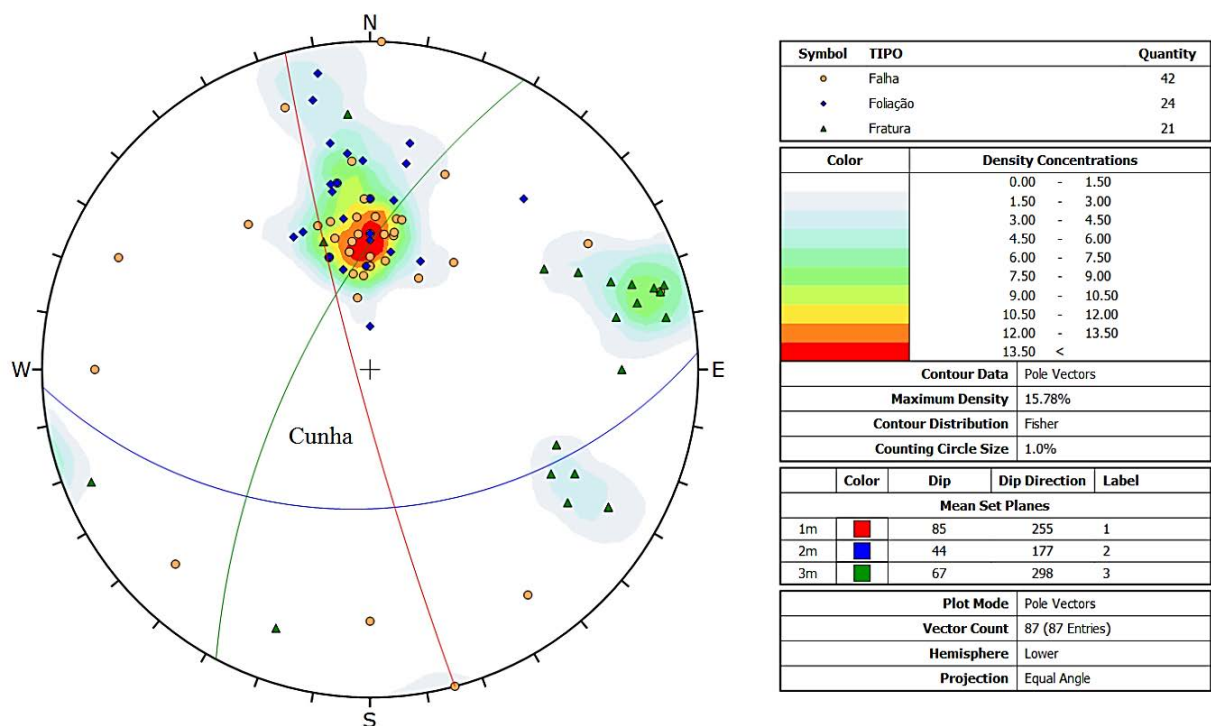
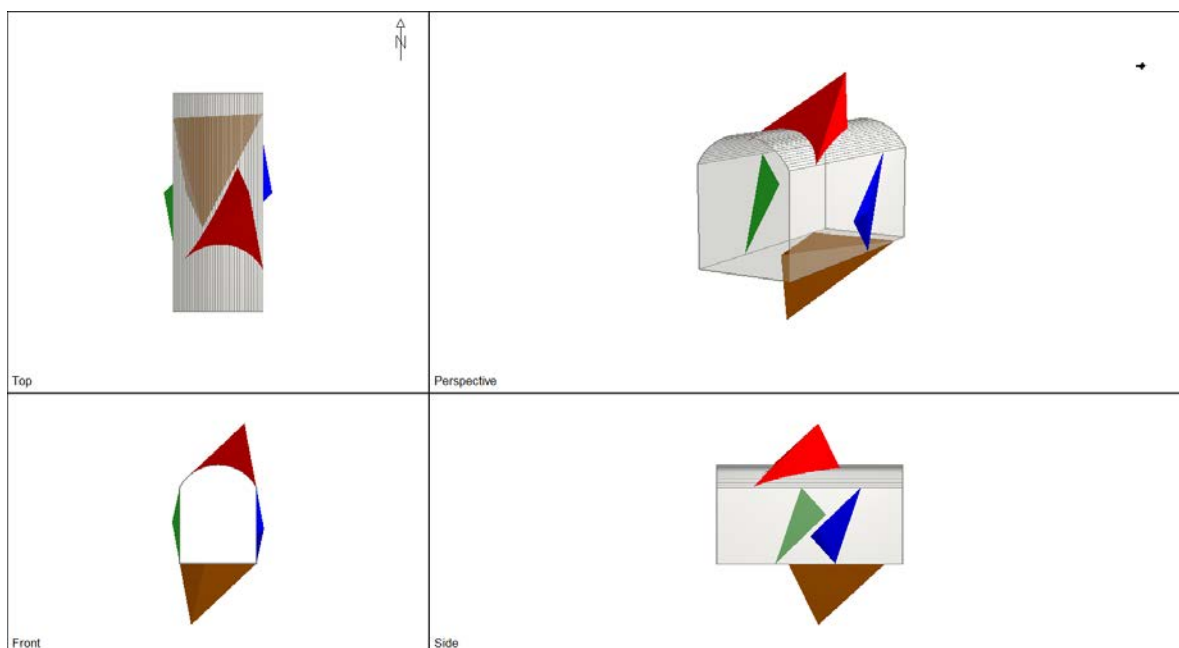


Figura 21. Modelo tridimensional da galeria e das possíveis cunhas, elaborado no software *Unwedge*.



Quadro 21. Parâmetros físicos e fator de segurança das cunhas.

Cunha	Volume (m³)	Altura (m)	Fator de Segurança
	7,87	2,96	0,07
	0,94	0,50	0,36
	0,94	0,50	0,97
	20,61	4,01	Estável

5.8 Influência das descontinuidades no modelo de tensões

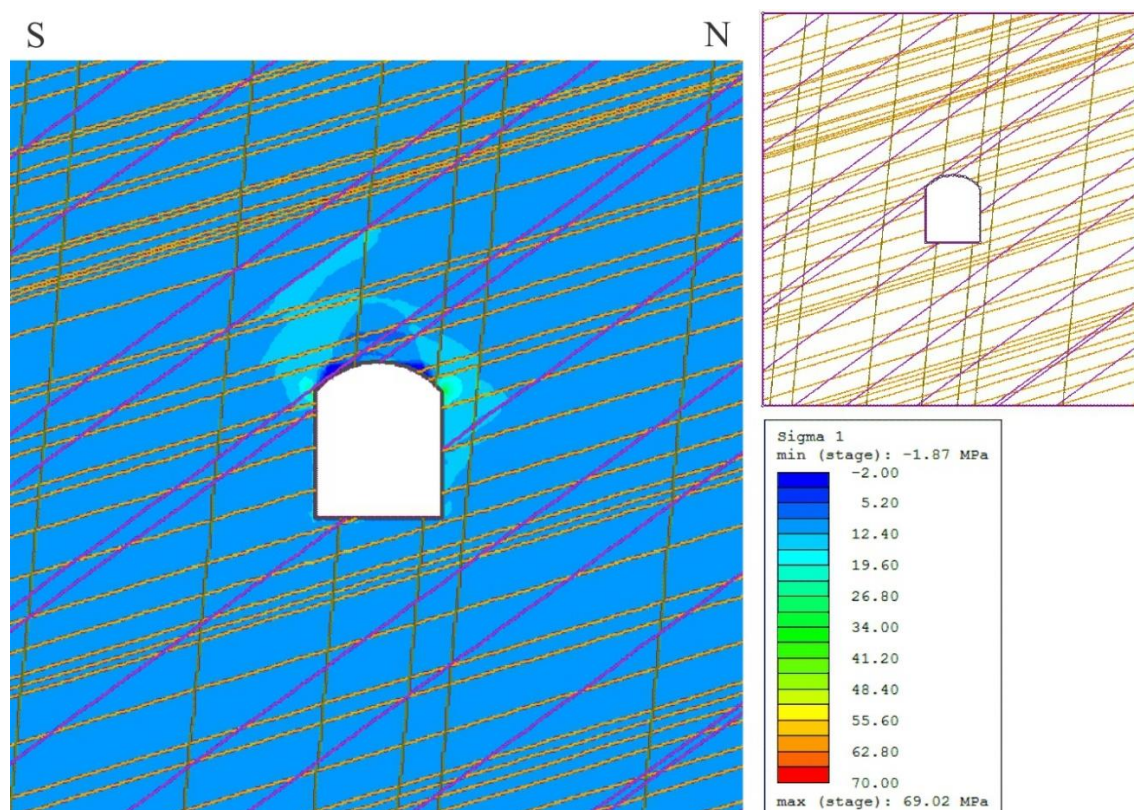
O modelo de tensões foi feito para uma galeria de dimensões 5x5 m, teto em arco, com direção leste-oeste. Foram representados no modelo os planos das principais famílias de descontinuidades, bem como o espaçamento médio entre cada uma delas. O parâmetro de resistência à compressão uniaxial utilizado foi de 68 Mpa e o coeficiente de atrito interno de 38 MPa.

A intenção foi simular como tais descontinuidades afetavam o campo de tensões ao redor da galeria. Foi possível notar que não há pontos em que o aumento de tensões possa causar rupturas do tipo *rock burst*, corroborando a escolha de um parâmetro SRF de

tensões médias. Também pode-se notar que há um significativo aumento das tensões atuantes no contato das paredes com o teto, ou cantos superiores das galerias à norte e à sul; bem como um alívio de tensões do teto da galeria, possibilitando e favorecendo a queda de blocos.

Há um expressivo aumento das tensões atuantes na parede norte, de forma que a atuação das forças não é simétrica ao longo da galeria. Desta maneira, constatou-se a influência das descontinuidades, principalmente na parede norte, aumentando o potencial de rupturas por cisalhamento ao longo dos planos com rumo de mergulho perpendicular à direção da galeria, principalmente os com elevada quantidade de material carbonoso (Figura 22).

Figura 22. Modelo de tensões, destaque para influência das descontinuidades na distribuição heterogênea das forças ao redor da galeria. Traços roxos: juntas inclinadas; Traços verdes: juntas subverticais; Traços laranjas: foliação e falhas.



6 CONCLUSÕES

A metodologia de integração de classificações geomecânicas Q e RMRbásico desenvolvida neste trabalho contou com retroanálises feitas a partir de observações de campo, aumentando a confiabilidade do modelo e diminuindo a subjetividade das classificações. Os mapas de integração e o modelo geomecânico tridimensional são ferramentas muito úteis para o planejamento da lavra, contribuindo com o projeto de novas galerias e realces.

A fórmula de correlação entre RCR e N apresentou bons coeficientes de determinação e correlação (0,63 e 0,79, respectivamente), e pode ser melhorada com o uso de mais dados de entrada. Quanto maior a quantidade de pontos, maior será a confiabilidade da correlação. Porém, mesmo com apenas 29 pontos, os coeficientes da correlação proposta neste trabalho são maiores do que os apresentados em alguns trabalhos, como Bieniawski (1984), Moreno (1980) e Abad et al. (1984).

O método proposto se mostrou efetivo, e surpreendeu pela variedade de produtos que pôde-se obter a partir dos dados levantados em campo. Em apenas três semanas de mapeamento, com baixo custo, foi possível delimitar zonas de fraqueza no maciço rochoso, reconhecer o padrão de fraturamento, comprovar a influência do material carbonoso na estabilidade, bem como das descontinuidades na distribuição de tensões ao longo das galerias.

O uso de geotecnologias, como os softwares da plataforma Rocscience (*Dips*, *Unwedge*, *RS2*), facilitou o tratamento dos dados estruturais levantados em campo, além de possibilitarem a simulação de estabilidade das galerias.

Portanto, pode se concluir que os métodos de classificação geomecânica são extremamente úteis para se conhecer o maciço rochoso e delimitar zonas de fraqueza, porém deve ser utilizada com ressalvas, sempre levando-se em conta a integração de pelo menos dois métodos de classificação, além de retroanálises a partir de descrições e observações feitas em campo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAD, J.; CALEDA, B.; CHACON, E.; GUTIERREZ, V.; HIDLGO, E. Application of Geomechanical Classification to Predict the Convergence Coal Mine Galleries and to Design their Supports. **5th Int. Congress on Rock Mechanics**. Melbourne, p. 15-19. 1984.
- ALKMIN, F.F. O que faz de um Cráton um Cráton? O Cráton do São Francisco e as Revelações Almeidianas a Delimitá-lo. In: Cap. I **Geol. Do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Ed. Beca. p: 18-35. 2004
- ALMEIDA F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Rev. Bras. Geo.**, 7: 349-364. 1977.
- ALVES DA SILVA, F.C. Análise da Deformação Finita nos Meta-Aglomerados da Zona de Cisalhamento Aurífera da Fazenda Canto – Porção Sul do *Greenstone Belt* do Rio Itapicuru/Bahia. In: SBG, **36º Congr. Bras. Geol.**, Natal, Brasil. Anais. 6: 2208-2218. 1990.
- ALVES DA SILVA F.C. **Etude Structural du Greenstone Belt Paleoproterozoique du Rio Itapicuru (Bahia, Bresil)**. Université d’Orleans, Orleans, França, Tese de Doutorado. 307p. 1994.
- ASSIS, J. A. C. de. **Mapeamento geológico-estrutural da Sequência Canto, porção sul do Greenstone Belt do Rio Itapirucu, Bahia**. Trabalho de Conclusão de Curso, UNESP, Rio Claro, 2011.
- BARBOSA, J. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. **Geologia da Bahia: texto explicativo**. Governo do Estado da Bahia, Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1996.
- BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean crustal segments of the São Francisco Cráton, Bahia, Brazil. A synthesis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 74, 343-359, 2002.
- BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P., MARINHO, M.M. O Cráton do São Francisco na Bahia: Uma Síntese. In: **Rev. Bras. Geo.** 33(1):3-6, 2003.
- BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P. Archean and Paleoproterozoic Crust of São Francisco Craton, Bahia, Brazil: Geodynamic Features. **Precambrian Research** 133, 27p, 2004.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock mechanics**, v. 6, n. 4, p. 189-236, 1974.
- BARTON, N.; BANDIS, S. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. **Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt**, v. 182, p. 1-8, 1991.

- BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. **Civil Engineer in South Africa**, v. 15, n. 12, 1973.
- BIENIAWSKI Z.T. **Rock mechanics design in mining and tunneling**. A.A. Balkema, Rotterdam, 272 p. 1984.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. John Wiley & Sons, 1989.
- BRITO, S. N. A. de, et al. **Projeto conceitual da mina subterrânea de Fazenda Brasileiro**. Companhia Vale do Rio Doce, CVRD. Projetos e Serviços de Mineração Ltda, PROMINAS. 2003.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. **Ensaio de compressão triaxial e diametral sobre testemunhos de rocha da Mina de Fazenda Brasileiro**. Relatório Interno de Fazenda Brasileiro, 209 p. 1988.
- CHAUVET, A. et al. Structural evolution of the Paleoproterozoic Rio Itapicuru granite-greenstone belt (Bahia, Brazil): the role of synkinematic plutons in the regional tectonics. **Precambrian Research**, v. 84, n. 3, p. 139-162, 1997.
- CURRAN, J. H.; HAMMAH, R. E.; YACIOUB, T. E. A two-dimensional approach for designing tunnel support in weak rock. In: **Proceedings of the 56th Canadian Geotechnical Conference**, Winnipeg, Manitoba, Canada. p. 1-6. 2003.
- DEERE, D. U. Design of surface and near-surface construction in rock. In: The 8th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). **American Rock Mechanics Association**, 1966.
- DEERE, D. U. **Geological Considerations, Rock Mechanics in Engineering Practice**, Editores RG Stagg y DC Zienkiewicz. 1968.
- DONATTI FILHO, J. P. **Reavaliação do contexto tectônico dos basaltos do greenstone belt do Rio Itapicuru (Bahia), com base na geoquímica de elementos-traço**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP, 2007.
- FOSSEN, H. **Geologia estrutural**. Oficina de Textos. São Paulo. 2015.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicações na estabilidade de taludes**. Editora UFPR, 2001.
- FIORI, A. P. **Estabilidade de Taludes: exercícios práticos**. Oficina de Textos. São Paulo. 2016.
- GOEL, R. K.; JETHWA, J. L.; PAITHANKAR, A. G. Indian experiences with Q and RMR systems. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 10, n. 1, p. 97-109, 1995.

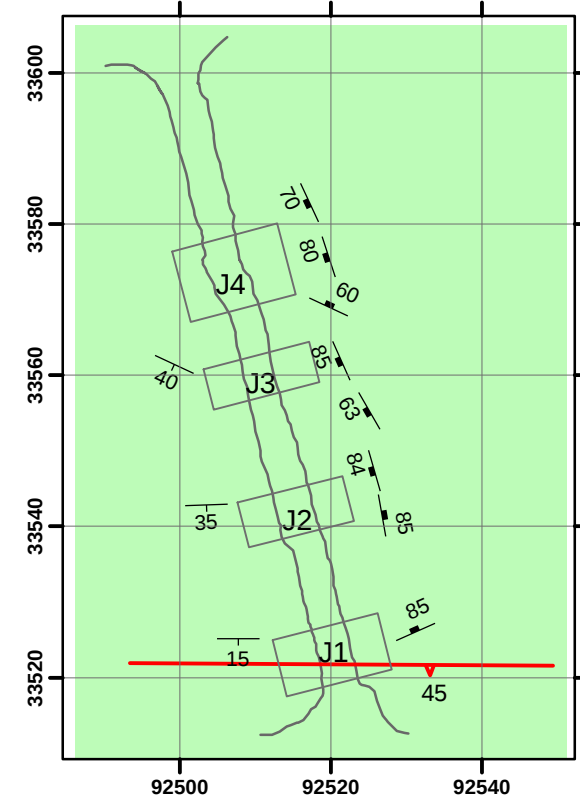
- GOEL, R. K.; JETHWA, J. L.; PAITHANKAR, A. G. Correlation between Barton's Q and Bieniawski's RMR - A new approach. In: **International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts**. Pergamon, p. 179-181. 1996.
- GOKCEOGLU, C.; SONMEZ, H.; ERCANOGLU, M. Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altindag (settlement) region in Turkey. **Engineering Geology**, v. 55, n. 4, p. 277-296, 2000.
- GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics**. New York: Wiley, 1989.
- HASUI, Y. et al. **Geologia do Brasil**. São Paulo, SP: Beca, 2012.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Ensaio de laboratório em testemunhos de sondagem da Mina de Fazenda Brasileiro**. Relatório Interno de Fazenda Brasileiro, 42 p. 1987.
- KAISER, Peter K.; MACKAY, C.; GALE, A. D. Evaluation of rock classifications at BC Rail tumbler ridge tunnels. **Rock mechanics and rock engineering**, v. 19, n. 4, p. 205-234, 1986.
- KISHIDA, A. **Caracterização geológica e geoquímica das sequências vulcanossedimentares do médio Rio Itapicuru (Bahia)**. Salvador, UFBA. Dissertação de Mestrado, 98p., 1979.
- LOCZY, L.; LADEIRA, Eduardo A. **Geologia estrutural e introdução à geotectônica**. Editora E. Blücher, 1976.
- MORENO, T. E. Aplicacion de Las Classificaciones Geomechanicas a Los Tuneles de Parjares. **II Curso de Sostanimientos Activosen Galeriasy Tunnels**. Madrid: Foundation Gomez - Parto. 1980
- OLIVEIRA, A. M. S. et al. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE, 1998.
- PALMSTROM, A. Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. In: Int. **Symp. on Fundamentals of Rock Joints**, Björkliden. p. 103-110. 1985.
- PALMSTROM, A. BROCH, E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. **Tunnelling and underground space technology**, v. 21, n. 6, p. 575-593, 2006.
- PALMSTROM, A. **Characterization of jointing density and the quality of rock masses**. Internal report, AB Berdal, Norway, 1974.
- PALMSTROM, A. The volumetric joint count: a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. In: **IAEG Congress**, New Delhi. 1982.

- PARK, H.; WEST, T. R. Development of a probabilistic approach for rock wedge failure. **Engineering Geology**, v. 59, n. 3, p. 233-251, 2001.
- SEN, Z.; EISSA, E. A. Rock quality charts for log-normally distributed block sizes. In: **International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts**. Pergamon, p. 1-12. 1992.
- SEN, Z.; EISSA, E. A. Volumetric rock quality designation. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 117, n. 9, p. 1331-1346, 1991.
- SILVA, M. G. **A seqüência vulcanossedimentar do médio Rio Itapicuru, Bahia: caracterização petrográfica, considerações petrogenéticas preliminares e zoneografia metamórfica**. Dissertação de Mestrado, Salvador, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 1983.
- SILVA, M. G. O Greenstone Belt do Rio Itapicuru: Uma bacia do tipo back-arc fóssil. In: **Rev. Bras. Geo.** 22(2):157-166. 1992.
- SILVA, M. G., COELHO, C.E.S., TEIXEIRA, J.B.G., ALVES DA SILVA, F.C., SILVA, R.A. e SOUZA, J.A.B. The Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil: geologic evolution and review of gold mineralization. **Mineralium Deposita** 36, 345–357. 2001.
- SINGH, B.; GOEL, R. K. **Rock mass classification: a practical approach in civil engineering**. Elsevier, 1999.
- TERZAGHI, K. **Introduction to tunnel geology**. Rock tunnelling with steel supports, p. 17-99, 1946.
- XAVIER, R.P. **Estudos de inclusões fluidas na mina de ouro da Fazenda Brasileiro, Greenstone Belt do Rio Itapicuru, Bahia**. Dissertação de Mestrado, São Paulo, USP, 142p. 1987.
- XAVIER, R. P.; COELHO, C. E. S. Fluid regimes related to deformation of lode gold deposits in the Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia: a fluid inclusion review. **Rev. Bras. Geociências**, 30 (1-3). 2000.

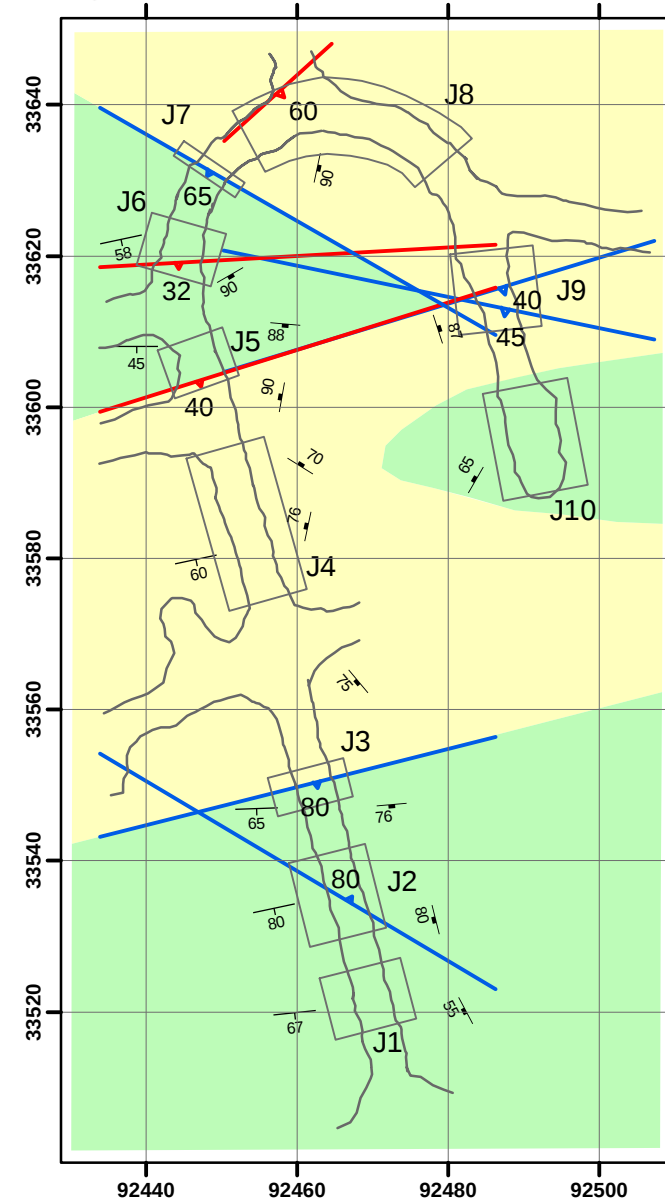
APÊNDICE 1

Mapas de Classes Geomecânicas - RMR

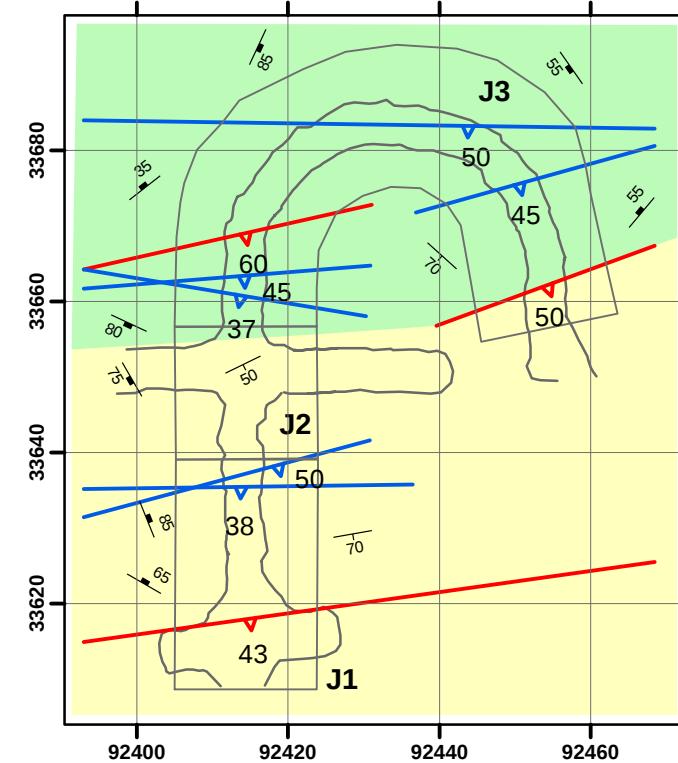
C41



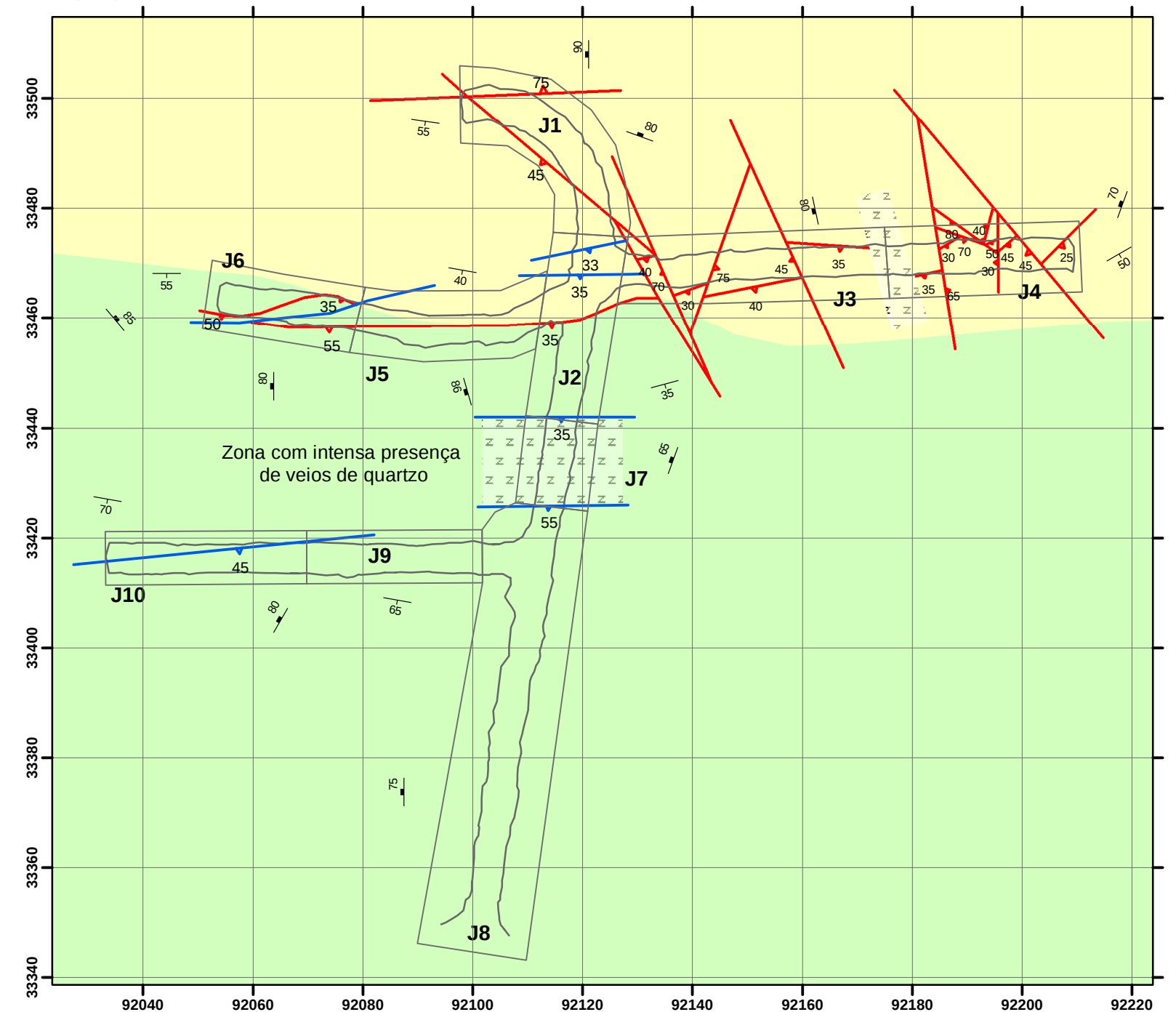
C42



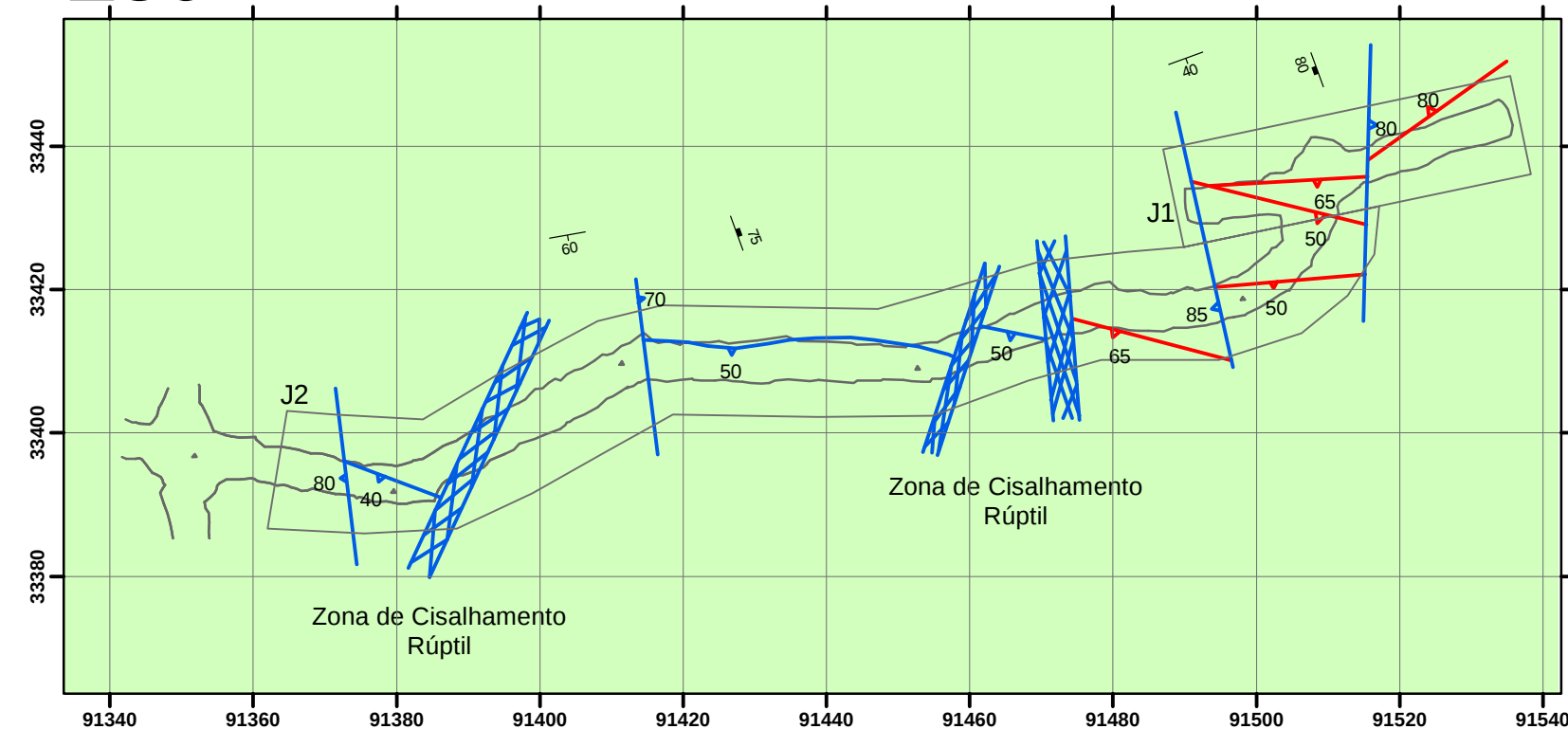
C45



C51



E36



Classificação do maciço rochoso baseada no método RMR

	RMR	Classe	Descrição
	81 a 100	I	Muito bom
	61 a 80	II	Bom
	41 a 60	III	Razoável
	21 a 40	IV	Fraco
	< 20	V	Muito fraco

(BIENIAWSKI, 1989)

Convenções Geológicas

- Foliação marcada por xistosidade
- Família de junta
- Falha com brecha grosseira
- Falha com material carbonoso

Legenda

- Janelas de estudo
- Descrição RMR
 - Muito Bom
 - Bom
 - Razoável
 - Fraco

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

BrioGold

Trabalho de Conclusão de Curso

MODELO GEOMECÂNICO DA
SEQUÊNCIA CANTO EM GALERIAS DA
MINERAÇÃO FAZENDA BRASILEIRO - BA

Apêndice 1 - Mapas de classes
geomecânicas - RMR

Leonardo Alberto Sala

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Rio Claro, Novembro de 2016



0 10 20 40 60 80 100 Metros

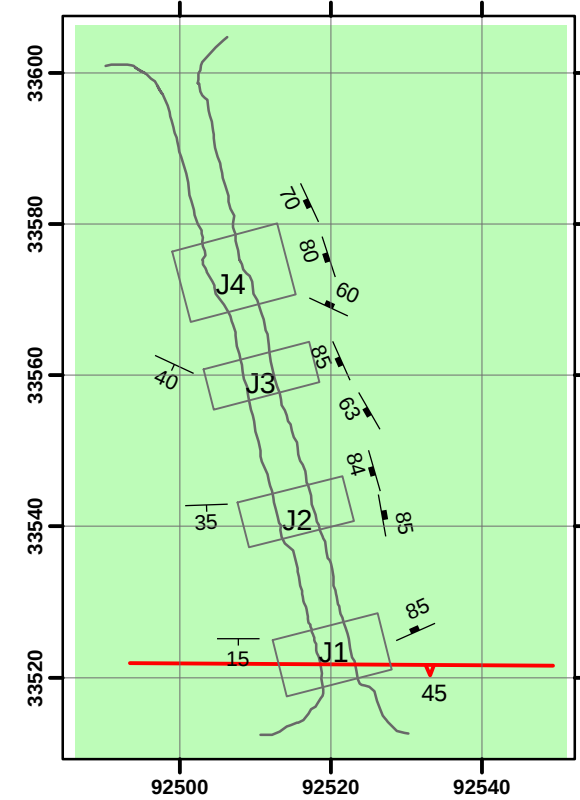
Datum: WGS 1984 UTM Zona 22S

1:1.000

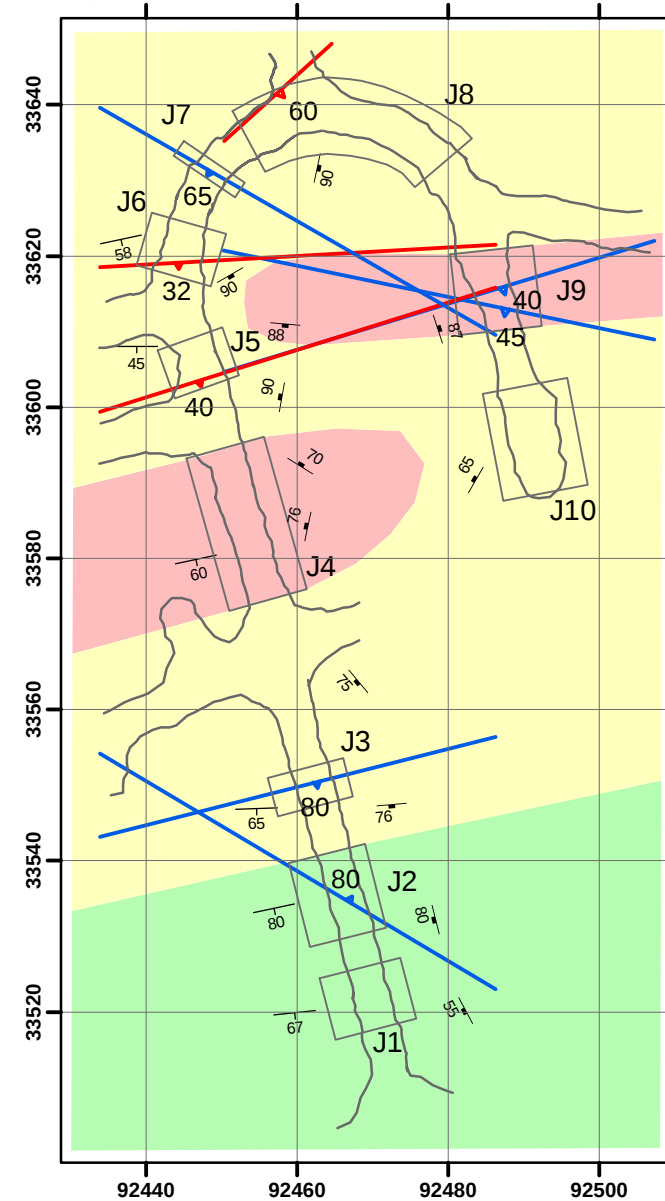
APÊNDICE 2

Mapas de Classes Geomecânicas - Q

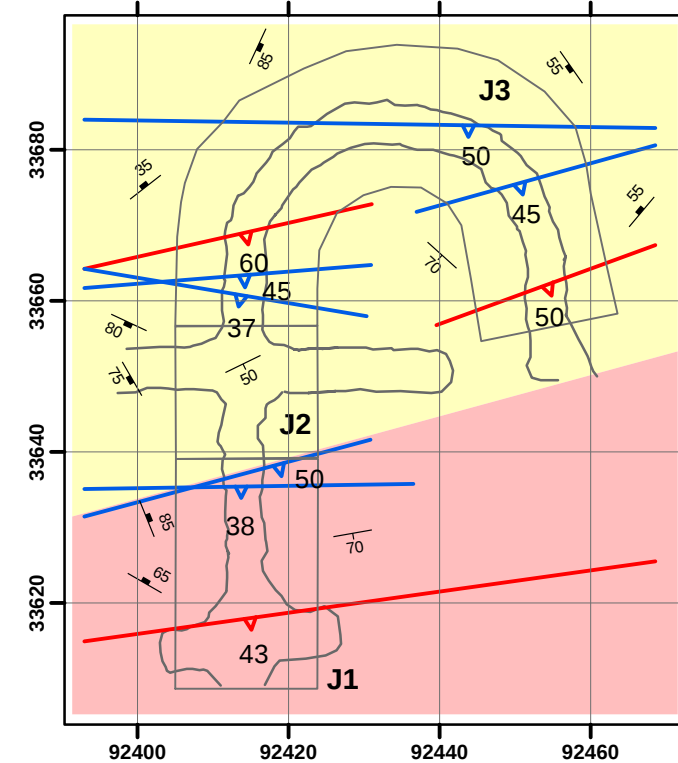
C41



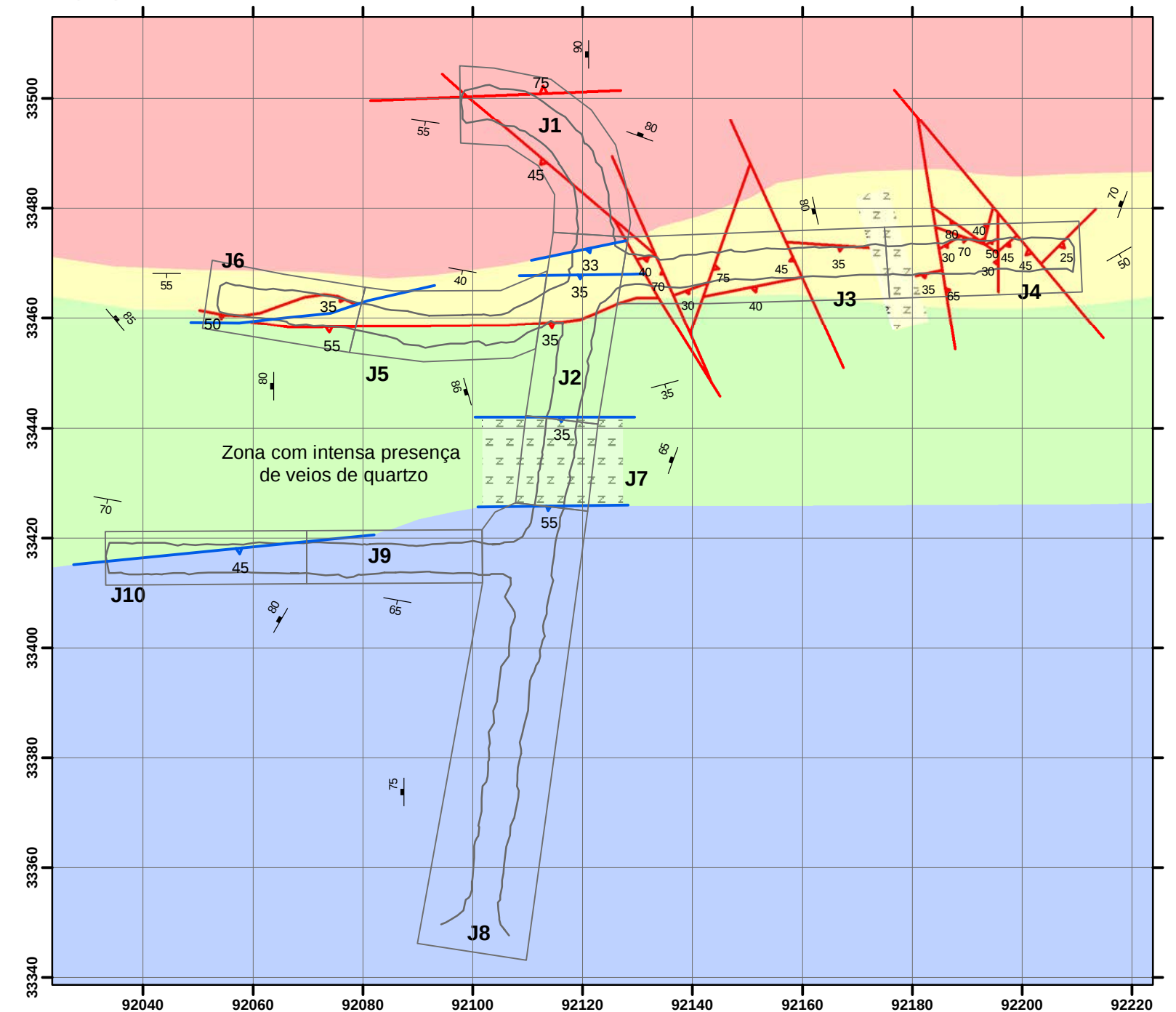
C42



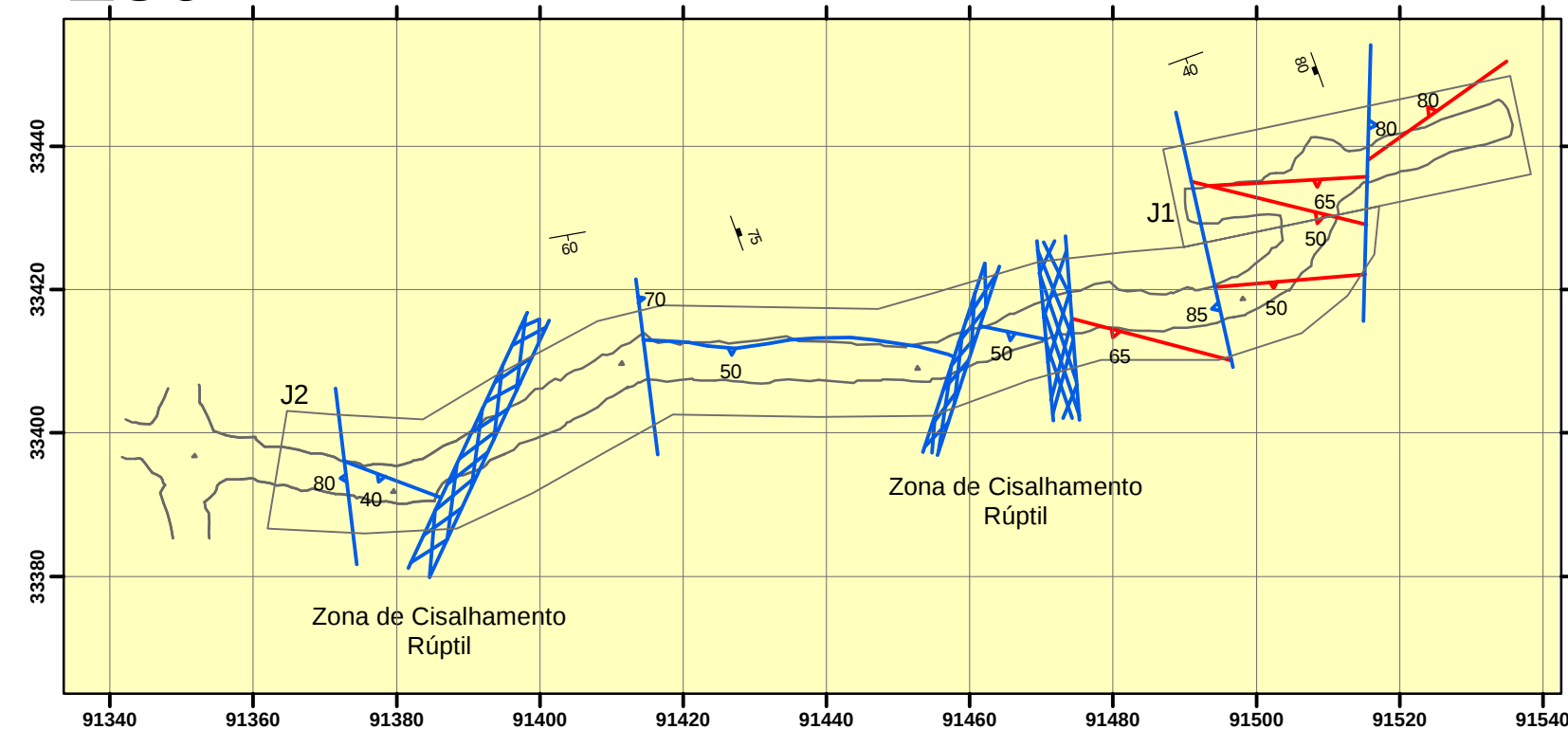
C45



C51



E36



Classificação do maciço rochoso baseada no sistema Q.

Q	Classe	Descrição
400 a 1000	A	Excepcionalmente bom
100 a 400	B	Extremamente bom
40 a 100	C	Muito bom
10 a 40	D	Bom
4 a 10	E	Razoável
1 a 4	F	Fraco
0,1 a 1	G	Muito fraco
0,1 a 0,01	H	Extremamente fraco
0,001 a 0,01	I	Excepcionalmente fraco

(BARTON et al., 1974)

Convenções Geológicas

- Foliação marcada por xistosidade
- Família de junta
- Falha com brecha grosseira
- Falha com material carbonoso

Legenda

- Janelas de estudo
- Descrição Q
 - Muito Bom
 - Bom
 - Razoável
 - Ruim

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



Trabalho de Conclusão de Curso

MODELO GEOMECÂNICO DA
SEQUÊNCIA CANTO EM GALÉRIAS DA
MINERAÇÃO FAZENDA BRASILEIRO - BA

Apêndice 2 - Mapas de classes
geomecânicas - Q

Leonardo Alberto Sala

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Rio Claro, Novembro de 2016



0 10 20 40 60 80 100 Metros

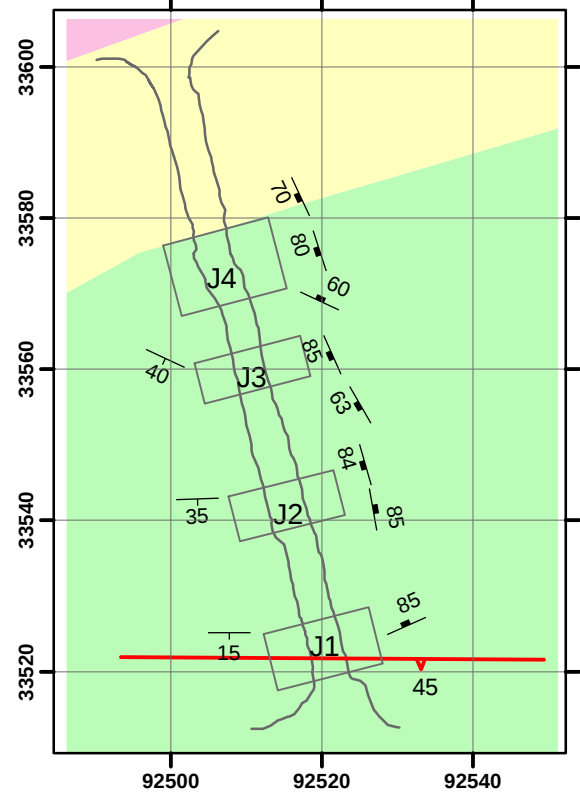
Datum: WGS 1984 UTM Zona 22S

1:1.000

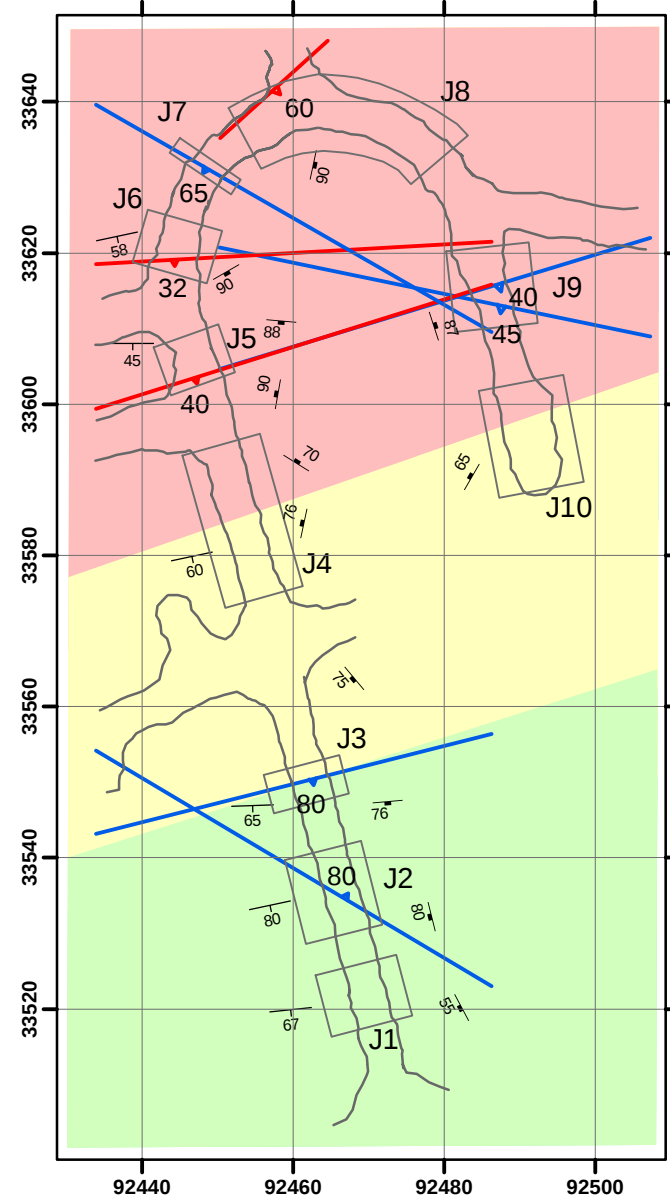
APÊNDICE 3

Mapas de Integração de Classes Geomecânicas

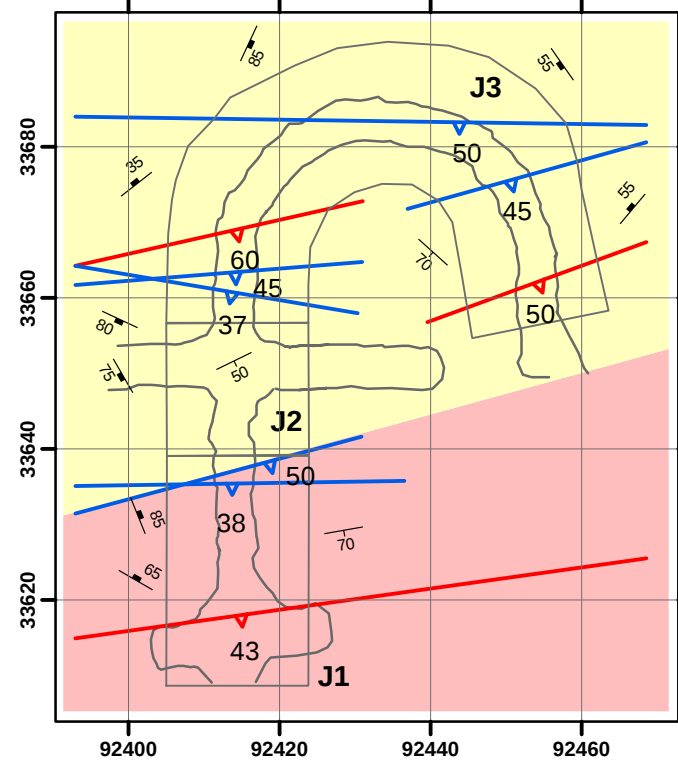
C41



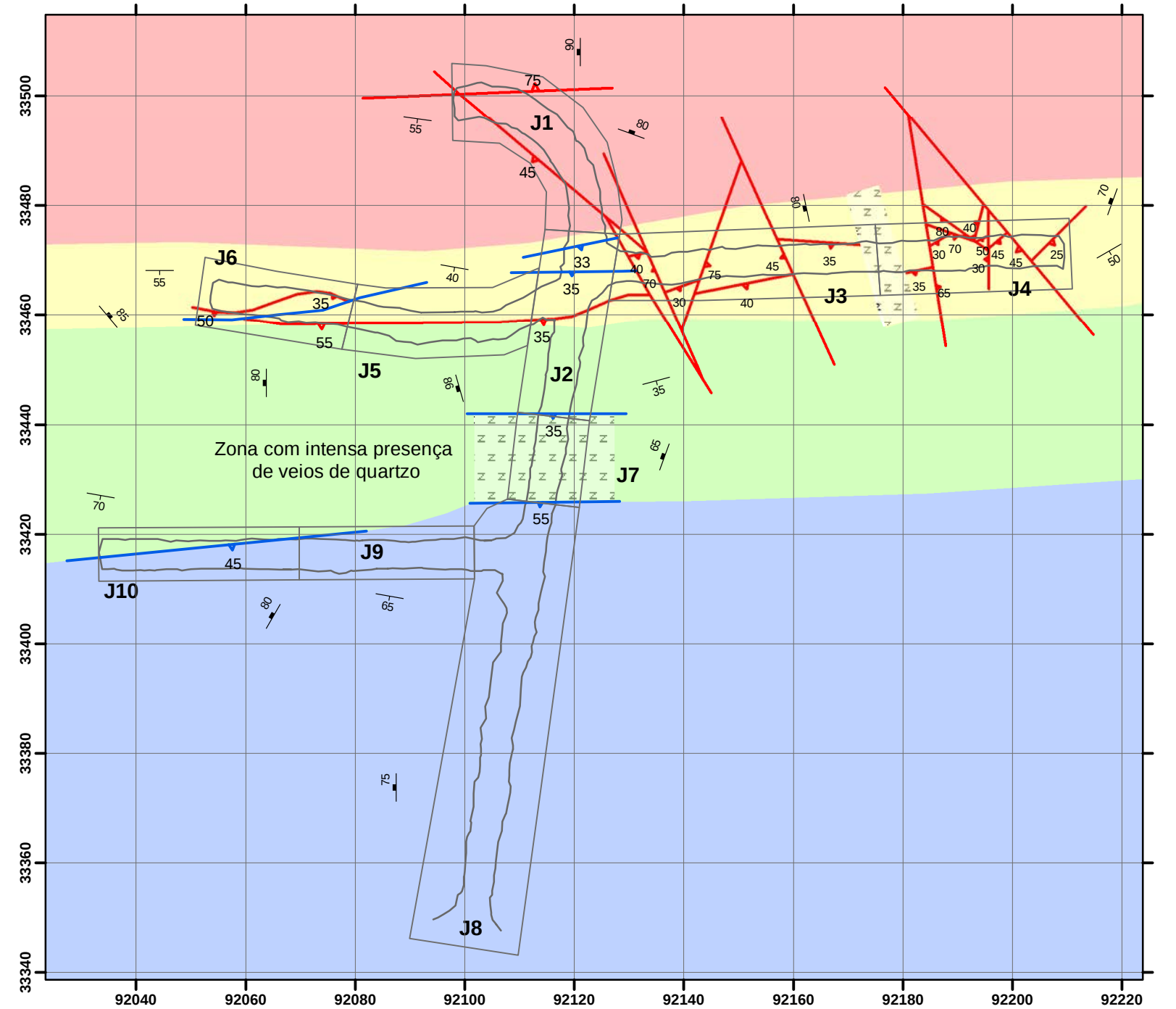
C42



C45



C51



E36

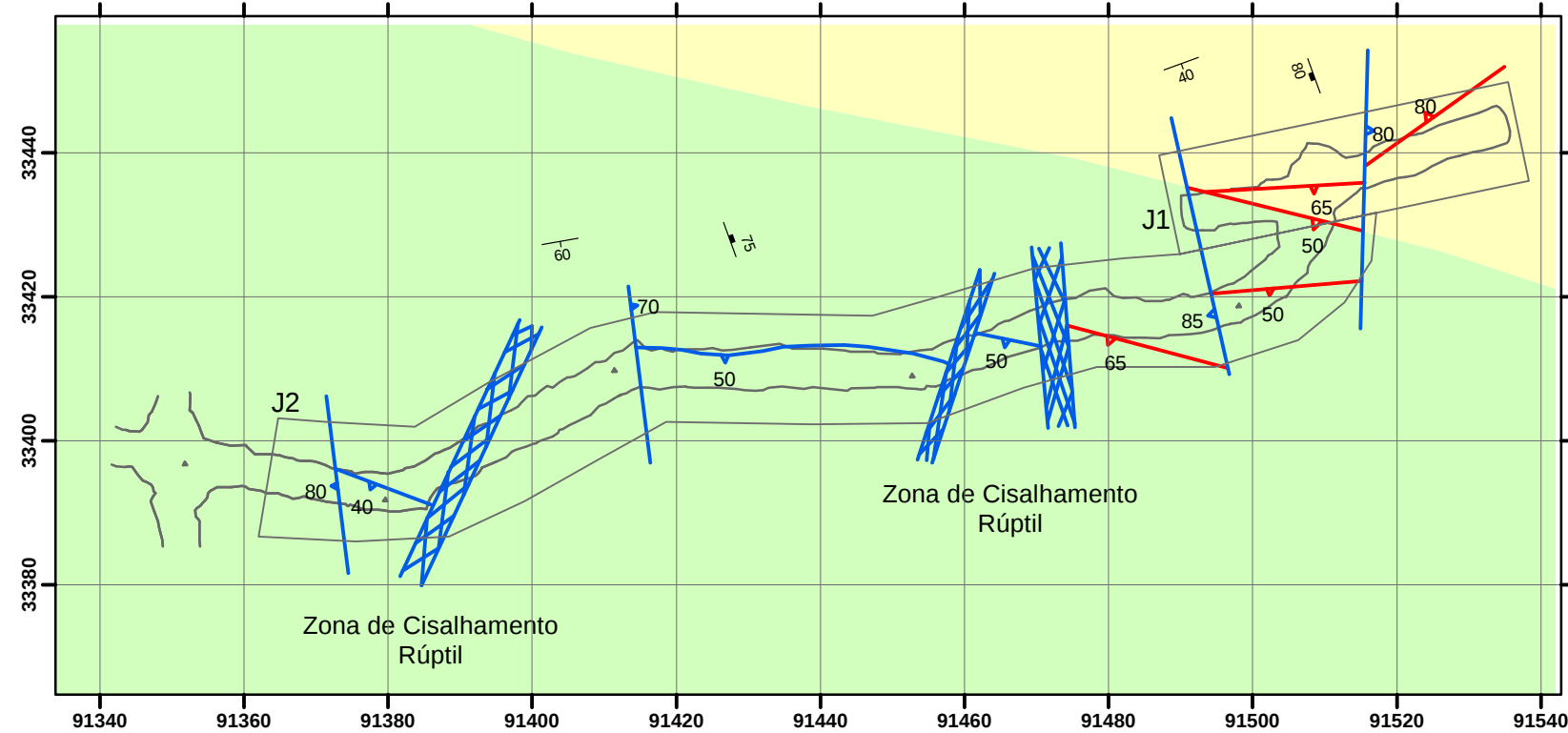


Tabela de comparação de descrições, segundo diferentes métodos, e critérios utilizados para determinação da descrição utilizada nos mapas de integração. Metodologia descrita em detalhes no relatório final.

Galeria	Janela	Litotipo	RMRb	RMRb(Q)	Q	Q(RMRb)	Integração	Critério
C41	1	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C41	2	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C41	3	CLX	Bom	Bom	Bom	Razoável	Bom	Pior descrição
C41	4	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C42	1	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C42	2	CLX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C42	3	MPV	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C42	4	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Fraco	Razoável	Fraco	Pior descrição
C42	5	MPV	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	6	MPV/GRX	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	7	MPV	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	8	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Observação de campo
C42	9	MPV	Razoável	Razoável	Fraco	Razoável	Fraco	Pior descrição
C42	10	MPV	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C45	1	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Fraco	Fraco	Fraco	Pior descrição
C45	2	MPV	Razoável	Razoável	Razoável	Fraco	Razoável	Pior descrição
C45	3	MPV	Bom	Bom	Razoável	Bom	Razoável	Pior descrição
C51	1	GRX	Razoável	Bom	Fraco	Fraco	Fraco	Pior descrição
C51	2	MPV	Razoável	Bom	Razoável	Fraco	Razoável	Pior descrição
C51	3	MPV/GRX	Razoável	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C51	4	MPV/GRX	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Pior descrição
C51	5	MPV	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C51	6	MPV/GRX	Bom	Bom	Razoável	Bom	Razoável	Pior descrição
C51	7	MPV	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Pior descrição
C51	8	CLX	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Observação de campo
C51	9	CLX	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Observação de campo
C51	10	MPV	Bom	Bom	Bom	Bom	Razoável	Pior descrição
E36	1	MPV	Bom	Bom	Razoável	Bom	Razoável	Pior descrição
E36	2	CLX	Bom	Bom	Razoável	Bom	Bom	Observação de campo

RMRb = índice RMRbásico estipulado em campo; RMRb(Q) = estimativa do índice RMRbásico em função de Q; Q = índice Q estipulado em campo; Q(RMRb) = estimativa do índice Q em função de RMRbásico

CLX = Clorita Xisto; MPV = Metapelite Vulcânica; GRX = Grafita Xisto; MPV/GRX = intercalação de Metapelite Vulcânica e Grafita Xisto

Convenções Geológicas

- Foliação marcada por xistosidade
- Família de junta
- Falha com brecha grosseira
- Falha com material carbonoso

Legenda

- Janelas de estudo
- Classes do Modelo de Integração
 - Muito Bom
 - Bom
 - Razoável
 - Fraco

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

BrioGold

Trabalho de Conclusão de Curso

MODELO GEOMECÂNICO DA
SEQUÊNCIA CANTO EM GALERIAS DA
MINERAÇÃO FAZENDA BRASILEIRO - BA

Apêndice 3 - Mapas de integração
de classes geomecânicas

Leonardo Alberto Sala

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Rio Claro, Novembro de 2016



0 10 20 40 60 80 100 Metros

Datum: WGS 1984 UTM Zona 22S

1:1.000

APÊNDICE 4

CD, contendo:

- Relatório Final em pdf.
- Mapas finais em pdf.
- Vídeo do modelo geomecânico tridimensional
- Arquivos para visualização do modelo tridimensional no software *Leapfrog Viewer*.