



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Geras - Brasil



**Modelagem Geomecânica no *software GEM4D* a
partir do Mapeamento Geomecânico da Mina
Vazante.**

Alisson Rocha Gomes

Ouro Preto

2021

Alisson Rocha Gomes

Modelagem Geomecânica no *software GEM4D* a partir do Mapeamento Geomecânico da Mina Vazante.

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção de título de Graduação e Engenharia de Minas pela Escola de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto, tendo como orientador o Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633m Gomes, Alisson Rocha.

Modelagem geomecânica no software GEM4D a partir do mapeamento geomecânico da Mina Vazante. [manuscrito] / Alisson Rocha Gomes. - 2021.

56 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração. 2. Modelagem geomecânica . 3. Mecânica de rochas. 4. Rochas - Escavação. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.123

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dois dias do mês de agosto de 2021, às 16h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Alisson Rocha Gomes**, matrícula 14.2.9191, intitulado: **MODELAGEM GEOMECÂNICA NO SOFTWARE GEM4D A PARTIR DO MAPEAMENTO GEOMECÂNICO IN SITU DA MINA VAZANTE**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz, Eng.º Geotécnico Thiago Rolla Nunes e Eng.º Geotécnico Rodolfo Renó. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Eng.º Geotécnico Thiago Rolla Nunes, segundo o Eng.º Geotécnico Rodolfo Renó, e em último, o Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi **APROVADO** por unanimidade, com a nota **08 PONTOS** (Oito pontos), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 02 de agosto de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz

Membro: Eng.º Geólogo Thiago Rolla Nunes

Membro: Eng.º Geólogo Rodolfo Renó

Discente: Alisson Rocha Gomes

Prof. Dr. Carlos Enrique Arroio Ortiz

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por fazerem do meu sonho os seus sonhos e pela força para vencer todas as adversidades que passamos.

Aos meus irmãos e familiares por todo apoio.

Ao meu primo Caio por ser o meu braço direito me apoiando em todos os momentos. Ao meu padrinho Marcelo Azevedo pelo exemplo da pessoa ética e responsável e por todo carinho.

A Universidade Federal de Ouro Preto. A gloriosa imperial Escola de Minas de Ouro Preto e o DEMIN pelo ensino de qualidade. Aos professores em especial Rodrigo Peluci, Hernani (Xana) e ao Prof. Dr. Carlos Arroyo Ortiz, parceiro em muitos momentos e pelos ensinamentos que foram muito além dos livros e sala de aula.

Ao Delphos Mine Planning Laboratory da Universidad de Chile em Santiago, em especial aos mestres Fabián Manríquez e Nelson Morales.

A Ouro Preto, cidade que eu amo e que me proporcionou os melhores momentos da minha vida. As repúblicas amigas, em especial MataBurro, Necrotério, Castelo dos Nobres, Serigy, Arcádia e Jardim Zoológico. A A³EM, minha casa, casa de Henri Gorceix, meu lar e lugar da paisagem lateral da janela de dormir mais sensacional. Os amigos em especial a Adriana (amizade e apoio fundamental em toda a jornada), Prof. Dr. Adilson Costa, Ace, Bucho, Ana Paula, Neiva, Di-Kolé, Primo, Seringueiro, Renato, João Araújo e Blenda.

Aos meus amigos do peito Aécio, Netinho, Magnésio, Kovalainen e Hospedeiro por toda parceria e apoio nos tempos difíceis e nos bons momentos

A Nexa Resources pela experiência profissional e aos profissionais Luciano (Pai dos Estagiários), Edmar Eufrasio, Gustavo Henrique Carvalho (por todo apoio e amizade), Thiago Nunes (Vigarista) (por todo apoio e conversas que foram fundamentais), Fernanda, Felipe, Leandro, Igor, Welton, Eltinho, Arthur (Mais-um).

Aos parceiros de estágio: Mirosmar, Guilherme, Isac, Ítalo e Alejadinho.

Ao time Geomecânica / Mecânica de Rochas – Vazante. Aos prezados técnicos: Rander, Marcos, Nilsinho, Roberto (Chalita), Danilo e Naildo, por todo apoio, ensinamentos e experiências compartilhados. A Thaís Janine Oliveira, minha irmãzinha do coração, pela parceria no trabalho, apoio e ensinamentos. Rodolfo

Renó (Gabiru) grande mestre, parceiro e gestor por todos os ensinamentos e conversar fundamentais. Vocês são os responsáveis por eu me apaixonar cada vez mais pela Geomecânica e incendiar no meu coração o amor e a vontade insaciável de me tornar um grande Geomecânico. Se um dia serei grande é por que me apoiei em ombros de gigantes como vocês.

Por fim ao povo honesto do Brasil que, apesar de todas as adversidades, paga seus impostos em dia e permite que o ensino superior gratuito de qualidade ainda seja possível nesse país.

RESUMO

A Modelagem Geomecânica, cada vez mais, possui papel de grande importância como ferramenta no auxílio ao entendimento da geologia estrutural de uma dada região. O Mapeamento Geomecânico, usado com base para a construção do modelo Geomecânico permite uma maior compreensão das estruturas presentes nas escavações e o entendimento dos mecanismos geotécnicos associados. Esse trabalho buscou demonstrar a importância da Modelagem Geomecânica no *software* GEM4D a partir do Mapeamento Geomecânico da Mina Vazante para a compreensão do maciço, suas características Geomecânicas e o impacto das estruturas nas escavações buscando elaborar uma ferramenta de grande importância para subsidiar a elaboração dos projetos de suporte, dimensionamento das escavações e o entendimento dos mecanismos de Mecânica de Rochas que governam o maciço rochoso em cada região ao longo da mina. Foi observado que o modelo possui grande margem para melhoria, entretanto isso não compromete sua utilização nas atividades que possibilitem a elaboração do empreendimento mineiro operacionalmente e economicamente viável e com alto fator de segurança associado.

Palavras-chave: Modelagem Geomecânica, Mapeamento Geomecânico, GEM4D, Mina Vazante.

ABSTRACT

Geomechanical Modeling, increasingly, has a very important role as a tool in helping to understand the structural geology of a given region. The Geomechanical Mapping, used as a basis for the construction of the Geomechanical model, allows a greater understanding of the structures present in the excavations and an understanding of the associated geotechnical mechanisms. This work sought to demonstrate the importance of Geomechanical Modeling in the GEM4D software from the Geomechanical Mapping of the Vazante Mine to understand the rock mass, its Geomechanical characteristics and the impact of structures on excavations, seeking to develop a tool of great importance to subsidize the elaboration the support projects, dimensioning of the excavations and the understanding of the Rock Mechanics mechanisms that govern the rock mass in each region along the mine. It was observed that the model has room for improvement, however this does not compromise its use in activities that enable the elaboration of the mining project operationally and economically viable and with a high associated safety factor.

Keywords: Geomechanical Modeling, Geomechanical Mapping, GEM4D, Vazante Mine.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivo Geral	3
1.2.2. Objetivo Específico.....	3
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1 MAPEAMENTO GEOMECÂNICO	4
2.1.1 Definições	4
2.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS	5
2.3 LEVANTAMENTO ESTRUTURAL.....	8
2.4 ABASTECIMENTO DO BANCO DE DADOS	15
2.5 MODELAGEM GEOMECÂNICA NO SOFTWARE GEM4D	16
3. METODOLOGIA.....	18
4. ESTUDO DE CASO	20
4.1 GEOLOGIA REGIONAL	21
4.2 GRUPO VAZANTE	27
4.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL	30
4.4 MAPEAMENTO GEOMECÂNICO	32
4.5 MODELAGEM GEOMECÂNICA.....	32
4.6 COMPLEXO DE MINAS SUBTERRÂNEAS DE VAZANTE.....	33
4.6.1 Aspectos Gerais.....	33
4.7 CARACTERIZAÇÃO DA MINA.....	35
4.7.1 Mineralização	35
4.7.2 Estrutura Geológica.....	36
4.8 GEOTECNIA.....	37
4.8.1 Aspectos Gerais	37

4.8.2 Unidades Geotécnicas	38
4.8.3 Padrão Estrutural	38
4.8.4 Parâmetros de Resistência da rocha intacta.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização geográfica de Vazante – MG (retirado de Matumoto 2012).....	1
Figura 2: Classificação da rugosidade usado para a Mina Vazante.....	7
Figura 3 - Falha mapeada na mina. Destaque para o plano de quebra rúptil característico a esse tipo de estrutura.....	10
Figura 4: Orientação de uma descontinuidade – mergulho (ψ) e azimute de mergulho (α) (Brandy & Brown, 2004).....	12
Figura 5 - Uso da bússola para coleta de atitudes das estruturas no Mapeamento Geomecânico da Mina Vazante	13
Figura 6 - Uso dos escaneamentos para auxiliar na modelagem das estruturas	17
Figura 7 Diagrama apresentando as etapas aplicas.	18
Figura 8- Mapa aéreo de Vazante com destaque para cidade e o complexo da Mina Vazante (Adaptado de Google Maps)	20
Figura 9 - Encarte tectônico da Faixa Brasília mostrando os principais distritos minerais com destaque para o Distrito Zincífero de Vazante (retirado de DIAS et al. 2015. CPRM)	23
Figura 10 - Mapa geológico integrado simplificado com coluna estratigráfica e destaque para ocorrências minerais. (Retirado de Dias et al., 2018. CPRM)	26
Figura 11 - Perfil geológico (A-A') do Distrito Zincífero de Vazante (modificado de Dias et al., 2018. CPRM).....	27
Figura 12 - Coluna litoestratigráfica do Grupo Vazante, com indicações da posição dos depósitos minerais (Dardenne, 2000, retirado de DIAS et al. 2015. CPRM).....	30
Figura 13 - Mapa geológico com os depósitos minerais distribuídos na Falha de Vazante compondo o depósito de Vazante (retirado de DIAS et al., 2015. CPRM) ..	34
Figura 14 - Seção Esquemática da Zona de Falha de Vazante. Adaptado de Hitzman, 1977.	37
Figura 15 - Estruturas modeladas e mapeadas. A: Falha modelada onde é possível evidenciar pelos os escaneamentos os planos dessa estrutura na escavação (“plano liso”); B: Zona de Cisalhamento modelada onde se pode observar o comportamento dúctil ao longo de sua e extensão, fato esse sustentado pelos mapeamentos ao longo das escavações; C: Plano de quebra rúptil de uma falha que controla a mineralização;	

D: plano dúctil de uma zona de cisalhamento que controla a mineralização (é possível ver as feições do plano liso)	42
Figura 16 - Exemplo da estrutura que delimita a mineralização (“plano liso”) que possui grande persistência, mapeada em vários níveis	43
Figura 17 - Modelagens elaboradas em uma dada região da Mina Vazante	44
Figura 18 - Análise quantitativa das estruturas mapeadas na Brecha.	45
Figura 19- Análise quantitativa das estruturas mapeadas no Dolomito cinza.	46
Figura 20 -Análise quantitativa das estruturas mapeadas no Dolomito rosa.....	46
Figura 21 -Análise quantitativa das estruturas mapeadas na Marga.....	47
Figura 22 - Análise quantitativa das estruturas mapeadas no Filito.	47
Figura 23 - Estereograma das juntas mapeadas e modeladas	48
Figura 24 - Estereograma dos acamamentos mapeadas e modelados	49
Figura 25 -Estereograma das zonas de cisalhamento mapeadas e modeladas	50
Figura 26 - Estereograma das falhas mapeadas e modeladas	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Unidades Geotécnicas da Mina de Vazante e suas principais características	5
Tabela 2: Ábaco de GSI adotado para a Mina Vazante	6
Tabela 3 - Definição empregada para as estruturas do Mapeamento Geomecânico da Mina Vazante	12
Tabela 4 - Características geotécnicas das discontinuidades.....	14
Tabela 5 - Taxas de redução para o Georreferenciamento no banco de dados de Mapeamento Geomecânico	16
Tabela 6 - Resumo dos parâmetros de resistência da rocha intacta para os principais litotipos da Mina Vazante	39

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Situada na região noroeste do estado de Minas Gerais, distante 520 km da capital Belo Horizonte, está localizada a cidade de Vazante. Inserida em uma região marcada por ocorrência de zinco mineralizada, a mineração desse metal remonta a década de 1950. Desde desse período, a exploração mineral na região teve a concessão de várias empresas com minas tanto a céu aberto como subterrâneas.

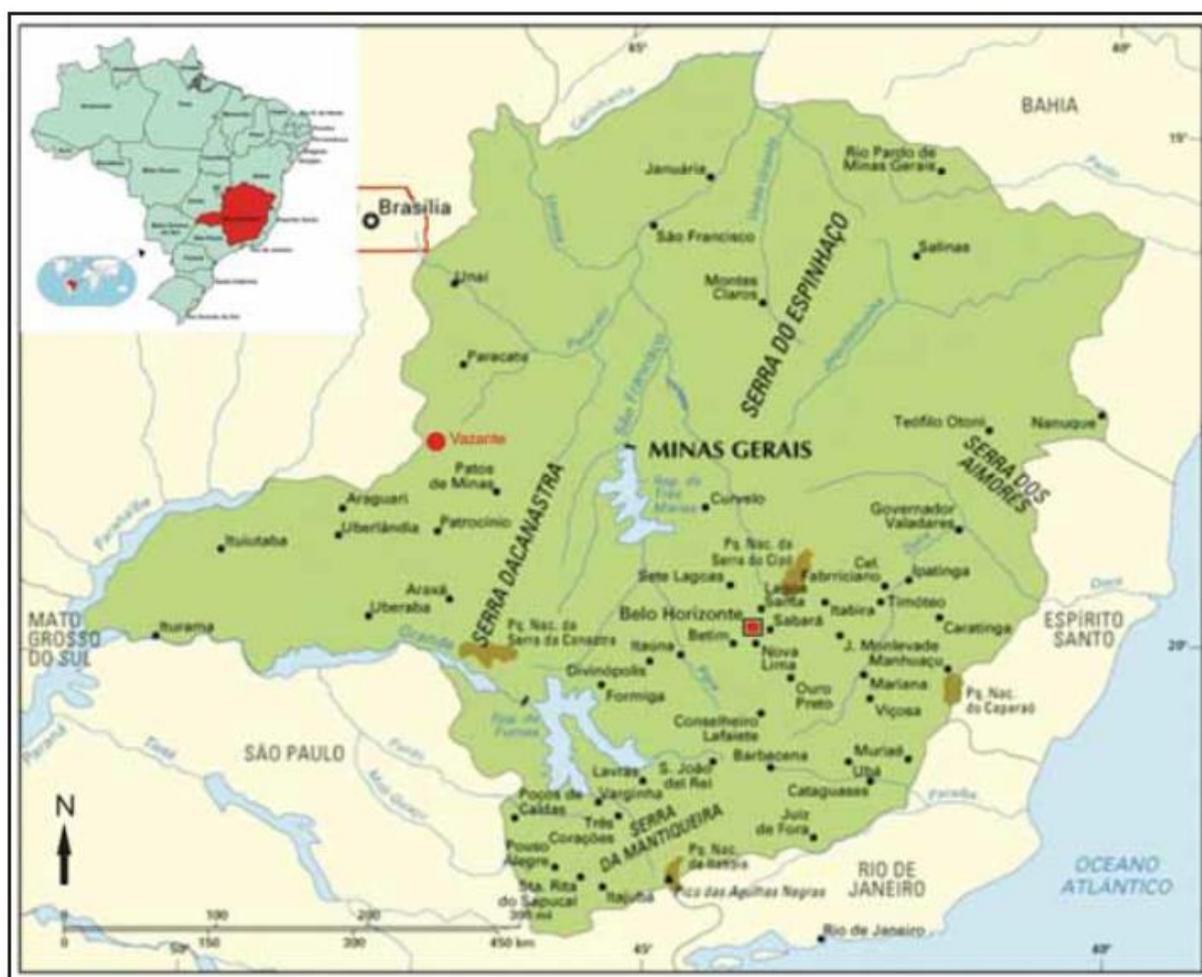


Figura 1: Localização geográfica de Vazante – MG (retirado de Matumoto 2012)

As formações geológicas de zinco de Vazante, denominado Distrito Zincífero de Vazante (DZV) (Pinto et. al., 2001), representa um depósito de classe mundial. A região, também, se caracteriza por ser um ambiente cárstico, de grande dissolução

de rochas dolomíticas, grande volume de água subterrânea e geologia estrutural complexa. Esses fatores indicam a importância do conhecimento de todo contexto geomecânico do maciço para contribuir com o sucesso operacional, financeiro e de segurança das atividades mineiras no local.

Com o intuito de elaborar o entendimento e a caracterização robusta da Geomecânica da Mina Vazante, muitos trabalhos relacionados a área são desenvolvidos pela equipe de Geomecânica da unidade. Dentre essas atividades destaca-se a Modelagem Geomecânica no *software* GEM4D a partir do mapeamento Geomecânico na Mina Vazante.

Essa atividade vai desde a identificação das estruturas e coleta das atitudes das mesmas. As características Geomecânicas do maciço na região em que elas se encontram, a modelagem em 3D e a análise dos estereogramas das estruturas mapeadas buscando identificar aquelas que possam acarretar problemas geotécnicos nas escavações. Esse trabalho foi desenvolvido ao longo de 8 meses entre os anos de 2020 e 2021 pelo aluno de Engenharia de Minas, Alisson Rocha Gomes, durante seu estágio supervisionado na área de Geomecânica da unidade de Vazante.

De início houve uma revisão e reestruturação do banco de dados do Mapeamento Geomecânico da unidade de Vazante que era elaborado desde julho de 2019. A partir do entendimento desses dados e identificação dos erros foi elaborado um trabalho de revisão e composição de procedimentos e padronização da atividade de Mapeamento Geomecânico. Concomitantemente foi desenvolvido uma ampla revisão bibliográfica de conceitos e teorias relacionadas à gestão de dados de geologia estrutural e Geomecânica. O cenário atual da área Geomecânica da Mina de Vazante possui todas as estruturas, propostas para serem modeladas, a partir do mapeamento geomecânico, estão com o modelo elaborado.

Ademais, as principais estruturas, do local do mapeamento, que possam acarretar riscos Geotécnicos nas futuras escavações são repassadas para que a equipe de Geomecânica possa elaborar os projetos de estabilidade para mitigar os riscos acarretados pelas mesmas.

Por fim, é perceptível que devido as limitações do *software* onde são elaboradas as modelagens fez com que o presente trabalho tenha déficits, o que possibilita margem para melhorias futuras. Entretanto esses desvios não são suficientes para comprometer de forma significativa o trabalho aqui elaborado, sendo

esse uma ferramenta de grande importância para o entendimento e tratamento das questões de Geomecânica da Mina Vazante.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Elaborar a Modelagem Geomecânica no *software* GEM4D a partir do Mapeamento Geomecânico na Mina Vazante, analisando as estruturas, suas características e os impactos nas escavações possibilitando que o modelo seja uma ferramenta útil para subsidiar a elaboração de projetos de suporte para mina por parte da equipe de Geomecânica.

1.2.2. Objetivo Específico

- Modelar as estruturas mapeadas como não família no mapeamento;
- Permitir um maior entendimento dos mecanismos de Mecânica de Rochas que atuam no maciço;
- Maior entendimento das estruturas geradoras de cunhas e chocos nas principais litologias da mina;
- Apresentação da metodologia de mapeamento e modelagem para a Mina Vazante.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 MAPEAMENTO GEOMECÂNICO

Essa atividade busca cobrir ao máximo as escavações realizadas de desenvolvimento. Durante esse mapeamento devem ser levantados dados referentes a qualidade do maciço, unidade geotécnica, caracterização do padrão estrutural, além das propriedades de resistência das estruturas e rocha intacta. Os dados devem ser atualizados em mapas ou modelos Geomecânicos, além de serem interpretados para definição do contexto Geomecânico e suas influências na estabilidade do entorno das escavações.

O Mapeamento Geomecânico consiste na atividade de identificação e classificação de estruturas geológicas e suas características de maior importância no quesito Geotécnico. Faz-se necessário interpretar de forma segura as características do maciço e suas feições mais relevantes.

2.1.1 Definições

Visando a uniformização dos conceitos de maior importância para o Mapeamento Geomecânico foi elaborado um conjunto de definições para tal, sendo esses mostrados a seguir:

Rocha intacta: Agregado formado por um ou mais minerais e/ou restos orgânicos.

Descontinuidade: Plano de fraqueza da rocha ao longo da qual o material rochoso é estruturalmente descontínuo e apresenta uma menor resistência ao cisalhamento.

Família de descontinuidade: Descontinuidade que se repete ao longo do maciço rochoso com baixa variação de direção e inclinação.

Descontinuidade/Estrutura aleatória: Descontinuidade que não se repete ao longo do maciço rochoso, apresentando-se de forma localizada e única.

Maciço Rochoso: Porção de material natural composto da rocha intacta, as descontinuidades e água presente nos interstícios.

Descontinuidade mais desfavorável: Descontinuidade que apresenta maior probabilidade de causar uma movimentação/articulação do maciço rochoso em uma determinada escavação.

2.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS

O Mapeamento Geomecânico deverá ser registrado em formulário próprio, com o preenchimento de todos os campos que possibilitarão o cálculo da qualidade do maciço pelas metodologias de Barton (índice Q), Bieniawski (RMR) e Hoek (GSI).

As informações elencadas neste item são para caracterizar o local de mapeamento de forma geral, com características da escavação, do projeto e relacionadas à Geomecânica. Dentre as informações coletadas do mapeamento e inseridas no formulário destacam-se:

Litotipo predominante: no local mapeado pode ocorrer mais de um litotipo. Para esses dados deve ser assinalado aquele mais representativo para o local mapeado, aquele que mais ocorre, segundo já apresentado e já discutido anteriormente nesse trabalho, segundo proposto para a Mina Vazante.

Unidade Geotécnica: para este dado, deve ser assinalado em qual unidade geotécnica está sendo realizado o mapeamento segundo a classificação específica para a unidade de Vazante, conforme proposto na Tabela 2 abaixo:

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DA MINA DE VAZANTE										
LEGENDA	CLASSE	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRATURAMENTO	QUALIDADE DA ROCHA	PADRÃO ESTRUTURAL	LITOLOGIA	PRESENÇA DE FENDAS	FRAGMENTAÇÃO DOS BLOCOS	RECUPERAÇÃO (%)	ROD (%)
	II-A	A2	F2-F3	muito boa	laje	Dolomitos	não ocorre	m3	>95%	> 60
	II-B	A2	F2-F3	muito boa	cunha	Brecha	não ocorre	m3	>95%	> 60
	III-A	A2-A3	F3	muito boa	laje	Dolomitos	não ocorre	dm3 a m3	90% a 95%	50 a 75
	III-B	A2-A3	F3	muito boa	cunha	Brecha	não ocorre	dm3 a m3	90% a 95%	50 a 75
	IV-A	A3	F3-F4	boa / média	-	-	esp. cm a dm	cm3 a dm3	>90%	25 a 50
	IV-B	A3-A4	F3-F4	média / ruim	-	-	esp. cm a dm	cm3 a dm3	75% a 95%	25 a 50
	V	A3-A4	F4	muito ruim	-	-	esp. dm a m	cm3 a dm3	50% a 75%	<25
	VI	A2	F4-F5	muito ruim	laje	Filito	não ocorre	cm3 a dm3	>95%	<25
	VII	A4	F4-F5	muito ruim	-	-	espes. métrica	-	<50%	<25
	PILARES Independentemente dos parâmetros acima, considerar o efeito das tensões induzidas.									
Grau de Alteração					Grau de Fraturamento					
A2- Alteração pouco penetrante, descoloração de alguns minerais. A rocha perde muito pouca resistência ao impacto do martelo e não é friável.					F1- Pouco fraturado: espaçamento médio das fraturas maior 2m, formando blocos da ordem de m3.					
A3- Rocha muito descolorida, alteração dos minerais é muito penetrante, assumindo colorações predominante alaranjada e avermelhada. Material não é friável. Resistência moderada ao impacto do martelo.					F2- Pouco fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0,6 a 2m, formando blocos da ordem de m3.					
A4- Rocha totalmente alterada com porções de argila bem desenvolvidas. Fragmentos friáveis e preservam estrutura original da rocha.					F3- Medianamente fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0,2 a 0,6m, formando blocos da ordem de dm3 a m3.					
A5- Solo: textura original da rocha foi totalmente destruída, apresentando geralmente cores avermelhadas.					F4- Muito fraturado: espaçamento médio das fraturas de 0,06 a 0,2m, formando blocos da ordem de cm3 a dm3.					
					F5- Muito fraturado: espaçamento médio das fraturas menor que 0,06m, formando blocos menores ou da ordem de cm3.					

Tabela 1: Unidades Geotécnicas da Mina de Vazante e suas principais características

Geological Strength Index (GSI): Esse parâmetro destina-se à classificação do maciço segundo o âbaco apresentado abaixo (Tabela 3). Basta verificar qual opção melhor se adapta nos eixos horizontal e vertical do âbaco e marcar qual o valor numérico que classifica aquele maciço.

Resistência Estrutura		Muito boa	Boa	Moderada	Pobre	Muito pobre
		Quebra com muita dificuldade (>250 Mpa)	Quebra com varios golpes de martelo de geologo. (100-250 Mpa)	Quebra com 1 ou 2 golpes de martelo de geologo. (50-100 Mpa)	Ponta da martelo e introduzido superficialment e. (25-50 Mpa)	Ponta da martelo e introduzido profundamente. (<5 Mpa)
	Intacto ou massivo (<6 Frac/m)	90			N/A	N/A
	Fraturnado em blocos (6-12 Frac/m)	80	70			
	Muito fraturado (12-20 Frac/m)		60	50		
	Muito fraturado e perturbado (>21 Frac/m)			40	30	
	Desagregado Fragmentado (RQD: 0%)				20	
	Laminado (RQD: 0%)	N/A	N/A			10

Tabela 2: Âbaco de GSI adotado para a Mina Vazante

Rugosidade da descontinuidade (Jr): Neste campo será assinalada a condição de rugosidade que a família de descontinuidade mais desfavorável apresenta. Esta avaliação deve ser feita em grande escala e pequena escala conforme apresentado na Figura 2.

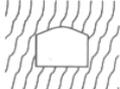
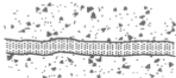
		<i>Grande Escala:</i>			
		Plana	Ondulada	Descontínua	
<i>Pequena Escala:</i>	<i>Jr</i> (Família mais desfavorável)				
	Estrias de Fricção		0.5	1.5	2.0
	Lisa		1.0	2.0	3.0
	Rugosa		1.5	3.0	4.0
	Planos contendo preenchimento espesso suficiente para prevenir contato entre paredes de rocha.		1.0	1.0	1.5

Figura 2: Classificação da rugosidade usado para a Mina Vazante.

Alteração das descontinuidades (Ja): Este campo é destinado à verificação da condição de alteração das paredes da família de descontinuidade mais desfavorável.

Ação da água (Jw): Este campo é destinado à verificação da influência da água na escavação. Basta assinalar a opção que melhor represente o local mapeado. Vale ressaltar que essa avaliação deve considerar a água que percola pelo maciço em suas descontinuidades. Não deve ser considerada, por exemplo, a água que chega à galeria através de um furo de sonda, mas sim a água que está presente no maciço e suas descontinuidades, mesmo que esta tenha origem a partir do furo de sonda ou de uma escavação adjacente inundada.

Presença de água: Semelhante ao campo “Ação da água (Jw)”, este campo é destinado a verificação da influência da água no maciço rochoso, entretanto em uma escala de verificação distinta ao campo já mencionado. Nessa parte, basta assinalar a opção que melhor represente comparativamente a presença ou ausência de água no maciço rochoso.

Georreferenciamento: Para esse dado, deverá ser feito o posicionamento geográfico do ponto do mapeamento em questão. Deve ser feito prioritariamente através de alguma feição característica da galeria, como por exemplo: interseções, emboque de outras galerias, janelas para tomada, etc. Nunca utilizar a face da galeria

desmontada para o georreferenciamento, pois com o avanço da galeria isso poderá mascarar a localização do mesmo.

2.3 LEVANTAMENTO ESTRUTURAL

Além do levantamento das informações gerais do local, dentro da metodologia do Mapeamento Geomecânico, ainda é requerido um levantamento estrutural detalhado. Nesse levantamento são caracterizadas todas as estruturas presentes no local de mapeamento a partir do preenchimento das informações abaixo. Estão disponíveis no formulário campos para mapeamento de até 6 estruturas diferentes. As definições a seguir, forma elaboradas pela própria equipe de Geomecânica da Nexa.

Família: Deve ser assinalado se a estrutura que está sendo mapeada naquele campo constitui uma família de descontinuidade ou não. Para este conceito, define-se família toda estrutura que apresenta repetitividade ao longo da escavação.

Esse conceito é muito importante para o presente trabalho, uma vez que se fez a modelagem de estruturas que não são famílias. Salvo raras exceções de estruturas que são famílias mas que possuem grande importância do ponto de vista geomecânico, foram modeladas.

Tipo de estrutura: Neste item será assinalado o tipo de estrutura que está sendo mapeada. Para tal foi desenvolvido um estudo das principais estruturas do maciço rochoso da mina de Vazante, sendo essas:

- **Acamamento:** estruturas formadas pela acumulação de material precipitado ou decantando ao longo de grandes períodos de deposição. Formar estratos com diferenciações, normalmente, facilmente visíveis a olho nu. São mais comuns em rochas sedimentares tendo a origem da deposição dos sedimentos associados as condições geológicas, físicas, químicas e/ou biológicas;
- **Foliação:** estrutura de origem tectônica, em geral, formada em regime plástico. Termo também usado para estruturas primárias, como estratificação ou acamamento primário (Fossen, 2012). São feições planas de rochas metamórficas;
- **Bandamento:** estrutura planar caracterizada por cristalização orientada e segregação de minerais metamórficos individualizados a olho nu, em bandas definidas (Fossen, 2012). Podem ser facilmente confundidas com acamamento

diferindo dessa por ter uma origem associados ao processo de metamorfismo durante a formação das rochas;

- **Junta:** Fratura extensional, com frequência tem grande extensão lateral e rejeito muito pequeno (Fossen, 2012). São facilmente identificáveis por serem formadoras de blocos bem definidos, porém onde não é possível perceber o deslocamento entre os blocos;

- **Falha:** feições, normalmente com grandes dimensões, onde se pode observar o deslocamento relativo entre as superfícies de contato. Estruturas onde se tem o domínio dos mecanismos de deformações rúpteis. Podem ser classificadas, normalmente, em falhas normais, inversa ou transformante, além de outros tipos segundo diversos autores (Figura 3);

- **Zona de Cisalhamento:** zona de deformação onde os mecanismos de deformação dúctil predominam. Sendo caracterizada por ser uma faixa tectonizada extensa e relativamente estreita (Fossen, 2012);

- **Veio:** descontinuidade de natureza variada, normalmente preenchendo fissuras que intercalam com a matriz rochosa. Em sua grande maioria origina-se por percolação de material fluído que infiltra nas rochas, podendo ocorrer solitário ou em conjunto que variam, desde paralelizados ou bifurcados e entrecruzados, como espessuras e comprimentos variando de poucos centímetros a dezenas de metros;

- **Estrias:** Ranhuras ou arranhões lineares originado pelo atrito de rochas ou elemento naturais, como geleiras ou deslizamento de rochas, que provocando sulcos de diferentes larguras e profundidades, normalmente, retilíneos e uniformes;

- **Contato litológico:** estruturas formadas pelo encontro de duas unidades geológicas distintas causando mudança brusca ou gradacional nas superfícies das rochas. São superfícies bem definidas que e nítidos ou difusos e mal definidos. Podem ter origem a partir de metamorfismo intrusivos ou tectônico;

- **Clivagem:** superfície de quebra preferencial na matriz rochosa tendo normalmente origem formada sob condições metamórficas de baixo grau com ligação a dobramentos.



Figura 3 - Falha mapeada na mina. Destaque para o plano de quebra rúptil característico a esse tipo de estrutura

A partir desse estudo e observações em campo foi possível chegar a um conjunto de definições para esses tipos de estruturas Geomecânicas a serem mapeadas nas escavações da Mina Vazante, sendo elas definidas conforme tabelas abaixo:

Símbolo	Nome	Descrição
So	Acamamento	Planos formados por diferenciações na deposição sedimentar durante a formação da rocha. Podem ser identificados por diferenças na coloração dos sedimentos, variação granulométrica e/ou diferentes tipos de sedimentos.
Sn	Foliação	Planos definido pela orientação dos minerais em função de um esforço / metamorfismo.
Sb	Bandamento	Planos formados pela segregação e/ou aglutinação mineral em rochas ígneas e de alto grau metamórfico.
Jn	Junta	Plano de quebra rúptil na matriz rochosa em que não há percepção de uma movimentação dos blocos paralelamente ao plano.
Fa	Falha	Plano de quebra rúptil na matriz rochosa em que há percepção de uma movimentação dos blocos paralelamente ao plano.
Zc	Zona de cisalhamento	Plano de quebra dúctil na matriz rochosa em que há percepção de uma movimentação dos blocos paralelamente ao plano.
Ve	Veio	Descontinuidade gerada pela intrusão de um material originalmente fluído.

Símbolo	Nome	Descrição
Es	Estria	Lineações geradas pela fricção entre os blocos de uma zona de cisalhamento ou falha definindo a direção da movimentação.
Ct	Contato litológico	Plano que define a diferenciação litológica na matriz rochosa.
Cl	Clivagem	Plano preferencial de quebra na matriz rochosa que normalmente é evidenciado superficialmente após um impacto mecânico (desmonte).

Tabela 3 - Definição empregada para as estruturas do Mapeamento Geomecânico da Mina Vazante

Atitude: Registrar a direção e inclinação de cada família de descontinuidade (estrutura), conforme Figura 4, separadas por uma “/”, utilizando o sistema alemão de medidas (trama) (e.g. 348/45). Para esse campo tentar tomar sempre no mínimo três medidas da mesma estrutura em locais diferentes dentro da mesma célula de mapeamento.

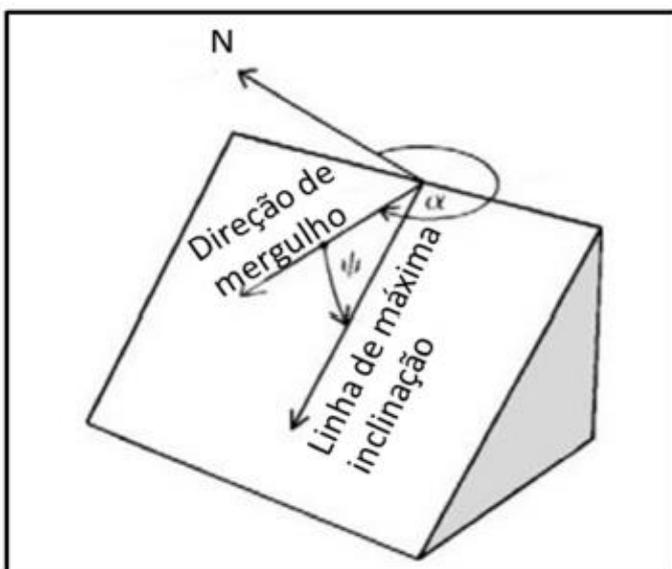


Figura 4: Orientação de uma descontinuidade – mergulho (ψ) e azimute de mergulho (α) (Brandy & Brown, 2004)

Para coletar a atitude das estruturas é necessário o uso de uma bússola que já esteja corrigida com a declinação do norte do local e o domínio dessa ferramenta para garantir a lisura dos dados coletados (Figura 5)



Figura 5 - Uso da bússola para coleta de atitudes das estruturas no Mapeamento Geomecânico da Mina Vazante

N (unid.): Para cada descontinuidade definida como família deve-se contar quantas descontinuidades são observadas em certo comprimento de amostragem. Para as descontinuidades que não se constituem como uma família esse campo não pode ser preenchido.

L (m): Anotar o comprimento de amostragem no qual foram contadas as descontinuidades daquela família mapeada. Essa medida deve ser sempre ortogonal ao plano da família de descontinuidade e o maior possível dentro das limitações da

escavação. Para as descontinuidades que não se constituem como uma família esse campo não pode ser preenchido.

Condições da descontinuidade: Nesses campos deverá ser feito um levantamento das características geotécnicas daquela descontinuidade mapeada conforme a Tabela 4.

Parâmetros	Coefficientes				
Persistência (comprimento da descontinuidade)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20
Abertura (separação) (mm)	Nenhuma	< 0,1	0,1 - 1	1 - 5	> 5
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente Rugoso	Quase liso	Liso
Alteração	Não alterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Em decompo sição
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessur a < 5 mm	Mole com espessur a > 5 mm

Tabela 4 - Características geotécnicas das descontinuidades

Martelo de Schmidt: destinado ao levantamento da resistência da família de descontinuidade que está sendo mapeada. Deve-se coletar até 10 (dez) medidas para anotar o valor numérico do ricochete obtido com o ensaio realizado com o Martelo de Schmidt naquela descontinuidade. Deve-se assinalar a posição em que o martelo está sendo utilizado e fazer todas as medidas em sobre a superfície da descontinuidade próximas umas das outras, sempre com o martelo na mesma posição. A superfície ensaiada deve ser relativamente plana e não apresentar material fragmentado para não mascarar o resultado. Se for observado preenchimento, mole ou duro, naquela descontinuidade, deve-se preferencialmente fazer o ensaio sobre a parede da descontinuidade preenchida, para se obter a resistência do preenchimento. Esse levantamento não é obrigatório para todas as descontinuidades pois são muitos os detalhes que devem ser atendidos para haver condições para realizar o

levantamento, porém se naquele ponto houver condições de ser realizado, esse deve ser feito.

Estereograma: Nesse campo é disponibilizado um estereograma graduado para que o responsável possa plotar os polos/linhas dos planos, lineações e eixo da escavação. O preenchimento desse campo é importante para exercitar a visão espacial do responsável pelo mapeamento e garantir que as informações estruturais formam levantadas de forma correta.

2.4 ABASTECIMENTO DO BANCO DE DADOS

Todas as informações levantadas no formulário de mapeamento devem ser abastecidas em um banco de dados único de mapeamento. As informações referentes ao mapeamento de frentes em desenvolvimento devem ser abastecidas obrigatoriamente ao final do turno na qual foi mapeada.

O banco de dados trata-se de um arquivo "Access" nomeado como "Mapeamento Geomecânico". Isso garante a composição e alimentação do banco de dados que é fonte de todas as informações do Mapeamento Geomecânico da Mina Vazante.

Ao abrir o arquivo "Mapeamento Geomecânico" deve-se lançar as informações do mapeamento no formulário "Formulário de Mapeamento", seguindo a ordem já estabelecida. Todos os campos presentes no formulário de mapeamento estão presentes no arquivo, sendo que ainda é solicitado o preenchimento das coordenadas X, Y e Z daquele ponto mapeado.

As coordenadas do ponto podem ser obtidas nas plantas topográficas dos níveis em confronto com a informação preenchida no campo "Georreferenciamento", porém devem ser reduzidas para inserção no formulário. As taxas de redução estão apresentadas na tabela abaixo:

Coordenada	Taxa de redução
X	-300000
Y	-8000000
Z	0

Tabela 5 - Taxas de redução para o Georreferenciamento no banco de dados de Mapeamento Geomecânico

As fotos tiradas do ponto de Mapeamento Geomecânico devem ser salvas em uma pasta nomeada com o número do ponto realizado. Todas as fotos ficam salvas na pasta destinada para esse fim.

2.5 MODELAGEM GEOMECÂNICA NO SOFTWARE GEM4D

A Modelagem Geomecânica consiste na elaboração de estruturas em 3 dimensões (3D) que são geradas a partir dos dados e informações geradas no Mapeamento Geomecânico e arquivadas na base de dados do software Access.

Essa atividade consiste em interpretar as estruturas mapeadas em campo no contexto tridimensional. As informações adquiridas em *in situ* serão extrapoladas para uma esfera além do visível nas escavações. Esse exercício de extrapolação e desenvolvimento de uma interpretação virtual, baseia-se pela experiência e conhecimento do profissional para que as correlações com outras unidades geotécnicas permitam uma interpretação mais concisa do impacto da estrutura na escavação.

Durante o processo de modelagem, deve-se ser usado dos arquivos de escaneamentos da equipe de topografia da região (Figura 6) para que os mesmos colaborem para identificação do prolongamento de estruturas para regiões no perfil mapeado, mas que não são possíveis de serem visíveis no local onde está sendo realizado o mapeamento na escavação.

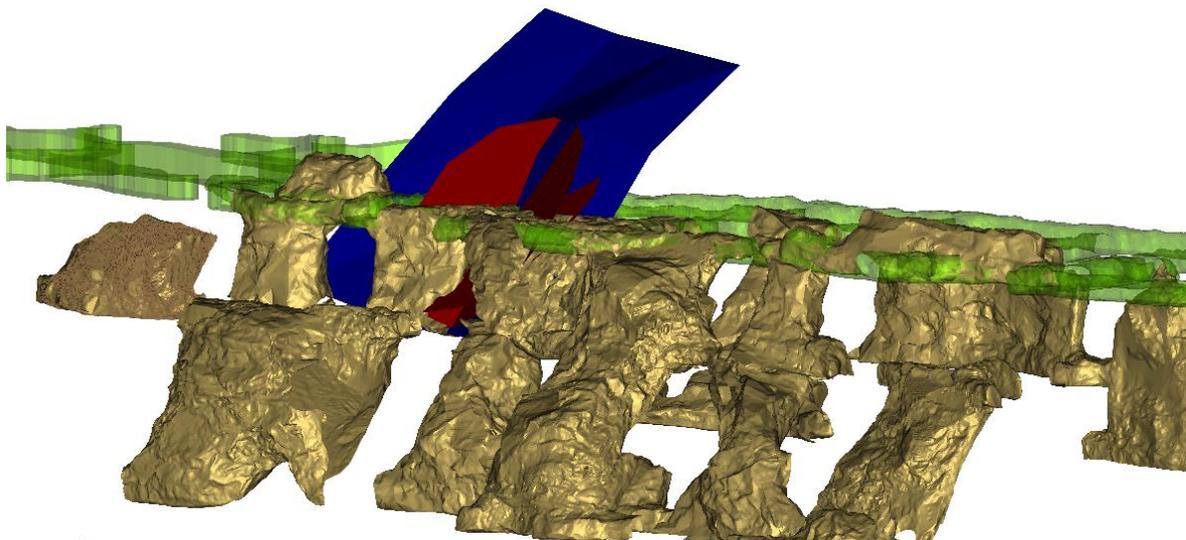


Figura 6 - Uso dos escaneamentos para auxiliar na modelagem das estruturas

Ao se modelar as estruturas deve-se atentar para dimensões, formato e feições das estruturas. Para obter um modelo que reflita o formato real, a experiência prática do modelador é um fator primordial para a acuracidade do trabalho. Para uma melhor elaboração dessa atividade é sempre importante ele ser feita imediatamente após a realização do Mapeamento Geomecânico, pois características marcantes das estruturas, observadas em campo, colaboram consideravelmente ao modelar as estruturas em 3D. Essa atividade deve ser completada com a confecção dos estereogramas elaborados no dips.

Após essa etapa, sempre que for identificado estruturas com riscos geotécnicos que surgiram nas escavações no local ou ao redor do ponto mapeado, bem como futuras galerias e blocos a serem abertos, deve-se relatar a ocorrências daquelas a equipe de Geomecânica para que as medidas sejam tomadas. Normalmente, quando é identificado estruturas grandes e com alto risco geotécnico um projeto de contenção ou tratamento para o local onde se encontra a estrutura será elaborado.

3. METODOLOGIA

Na Figura 7 é mostrado o diagrama de fluxo da metodologia aplicada para o presente trabalho.

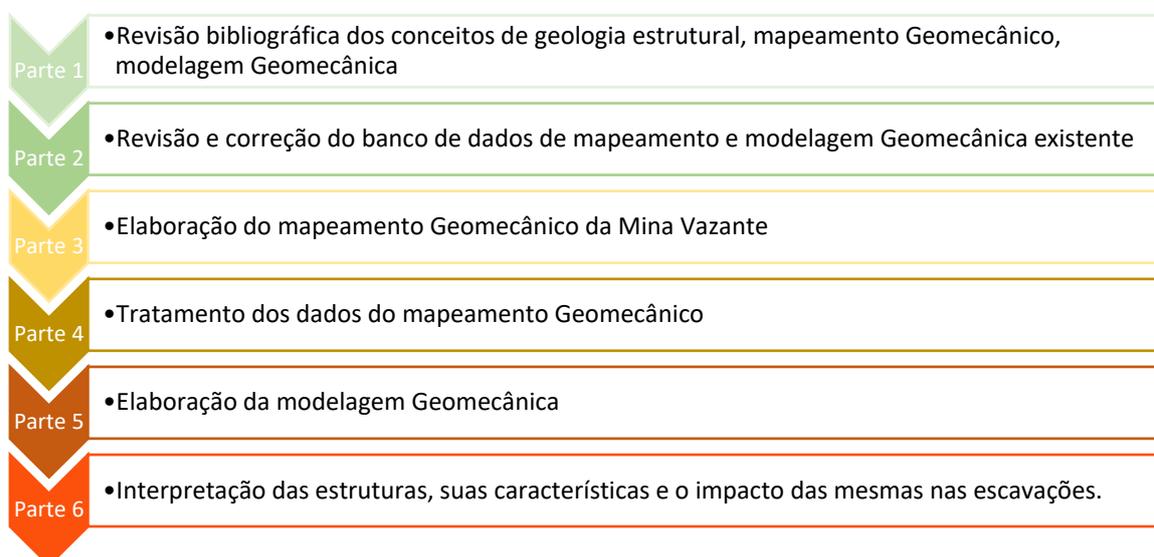


Figura 7 Diagrama apresentando as etapas aplicas.

Na fase 1 foi elaborado uma revisão bibliográfica de estudos e metodologias empregadas para o mapeamento Geomecânico e modelagem Geomecânica.

A fase 2 consistiu na elaboração de uma revisão e correção do banco de dados de mapeamento e modelagens Geomecânicas que haviam sido feitas anteriormente ao presente trabalho por outros geomecânicos. Os erros foram corrigidos para que fosse possível utilizar o banco de dados sem prejuízo.

Durante a fase 3 o mapeamento Geomecânico foi desenvolvido na mina. Foi priorizados as escavações de desenvolvimento e lavra presentes nos planos trimestrais, contemporâneos ao trabalho e regiões que foram identificadas estruturas que demonstravam riscos as escavações.

Após o mapeamento Geomecânico, as fases 4 e fase 5 eram elaboradas, sempre que possível, no mesmo dia ou em dias próximos a fase 3, seguindo a ordem apresentada no diagrama (Figura 7). Esse intervalo deve ser seguido pois facilita para quando se tem dúvidas sobre as estruturas mapeadas durante o tratamento e modelagem das mesmas

Na fase 4 é calculado, automaticamente, a partir dos dados do mapeamento, informações importantes sobre o local do mapeamento, sendo as principais: o RQD,

RMQ, Q-Barton, Q' e GSI. Isso será de grande importância no uso do modelo para a elaboração de projetos de estabilização.

Para fase 6 é feito uma interpretação das estruturas trabalhadas durante o processo visando encontrar suas correlações com as litologias e tipos de escavações. Aqui temos a elaboração dos estereogramas, análise quantitativa das estruturas, por meio de análises gráficas e outras observações que forem necessários, conforme o time de Geomecânica identificar essa necessidade. Também, sempre que usado a modelagem para elaboração de projetos de estabilidade de escavações, é importante correlacionar as características das estruturas identificadas nas fases anteriores.

4. ESTUDO DE CASO

O complexo de Vazante, composto pelos corpos de minério denominados Lumiadeira, Sucuri e Extremo Norte, está localizado a 7km do centro da cidade homônima (Figura 1). De propriedade da multinacional Nexa Resources, a mina está localizada em um depósito de Zinco de classe mundial, superando as 10 Mt de metal contido a um teor médio de @20%Zn (Oliveira, 2013), tendo suas atividades subterrâneas iniciadas na década de 1980. Hoje o complexo da Mina Vazante soma mais de 300km de galerias de lavra, desenvolvimento e infraestrutura escavadas.



Figura 8- Mapa aéreo de Vazante com destaque para cidade e o complexo da Mina Vazante (Adaptado de Google Maps)

Denominado por Distrito Zincífero de Vazante (DZV) (Pinto et al., 2001) essa unidade geológica está situada na região centro-sul da faixa de dobramento Brasília. O Grupo Vazante representa uma unidade metassedimentar que hospeda as mineralizações de zinco e chumbo.

Devido ao grande número de eventos formacionais o DZV caracteriza-se por ser uma unidade geológica com grande quantidade de estruturas e complexidade das mesmas. Devido a essas características o entendimento dos mecanismos geomecânicos que regem as estruturas inseridas nas escavações da mina Vazante é um fator primordial para o sucesso de um empreendimento mineiro dessa dimensão.

4.1 GEOLOGIA REGIONAL

Situada em um contexto geológico composto por uma série de eventos ao longo de sua formação, o Distrito Zincífero de Vazante (DVZ) compreende uma porção situada no centro-sul da Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967 e 1968), que compõem, juntamente com as faixas de dobramento Araguaia e Paraguai, a Província Tocantins (Almeida, 1977). Localizada na região noroeste do estado de Minas Gerais, abrangendo parte dos municípios de Vazante, Paracatu e Lagamar. Essa entidade geotectônica representa um cinturão orogênico formado no ciclo Brasileiro pela colisão dos paleo-continentes São Francisco, Amazonas e Paranapanema durante a união do supercontinente Gondwana (Valeriano *et al.* 2004; Pimentel *et al.* 2011).

Hospedeiro das mineralizações de Zinco e Chumbo, o Grupo Vazante (Dardenne *et al.* 1998), onde está inserido o DVZ, representa uma das unidades metassedimentares do segmento sul da Faixa de Dobramentos Brasília (Monteiro, 2002), inserido em um complexo sistema de nappes e falhas de empurrão com vergência para o Cráton do São Francisco (Dardenne, 2000).

A faixa de Dobramentos Brasília, possui aproximadamente 1200 Km de comprimento, em direção N-S, e 300 Km de largura (Figura 2). Essa entidade geológica mostra uma evolução complexa e possivelmente diacrônica. Essa unidade é fruto da interação entre os Crátons: São Francisco e Parapanema, na porção meridional, São Francisco e Amazonas, na porção setentrional, além de envolvimento de outras unidades tectônicas, como o Maciço Goiás, arcos magmáticos neoproterozóico e sequências sedimentares meso-neoproterozóicas, neste processo orogênico (Uhlein *et al.* 2012).

Segundo Dardenne (2000) e destacado por Monteiro (2002), a Faixa de Dobramentos Brasília possui as seguintes unidades principais:

- Sequência arqueana do Maciço Goiás;
- Arco Magmático de Goiás, caracterizado por faixas estreitas de rochas de sequência metavulcano-sedimentar separadas por ortognaisses cálcio-alcalinos a cálcios, milotinizados amiúde, com características químicas e isotópicas semelhantes às rochas plutônicas de arco de ilhas modernos;
- Sequências vulcano-sedimentares e intrusões ígneas de diferentes idades, incluindo os Complexos máficos-ultramáficos paleo-mesoproterozóicos de Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto, os granitos anorogênicos paleo-

mesoproterozóicos do Rio Paraná e Rio Tocantis, as sequências vulcano-sedimentares mesoproterozóicas de Juscelândia, Palmeirópolis e Indianópolis, os granitos neoproterozóicos e o magmatismo máfico-ultramáfico neoproterozóico;

- Sequências sedimentares e metassedimentares dos grupos Araí e Serra da Mesa (paleo-mesoproterozóicos); Paranoá e Canastra (mesoproterozóicos); Araxá, Ibiá e Vazante (meso-neoproterozóicos) e Bambuí (neoproterozóico).

A partir de seus compartimentos tectônicos, a Faixa Brasília pode ser dividida em: Zona Interna, Externa (Fuck *et al.* 1993 e 1994) e Domínio Cratônico, dispostos de oeste para leste refletindo estilos estruturais e condições de metamorfismo distintos (Dias *et al.* 2015) (Figura 9).

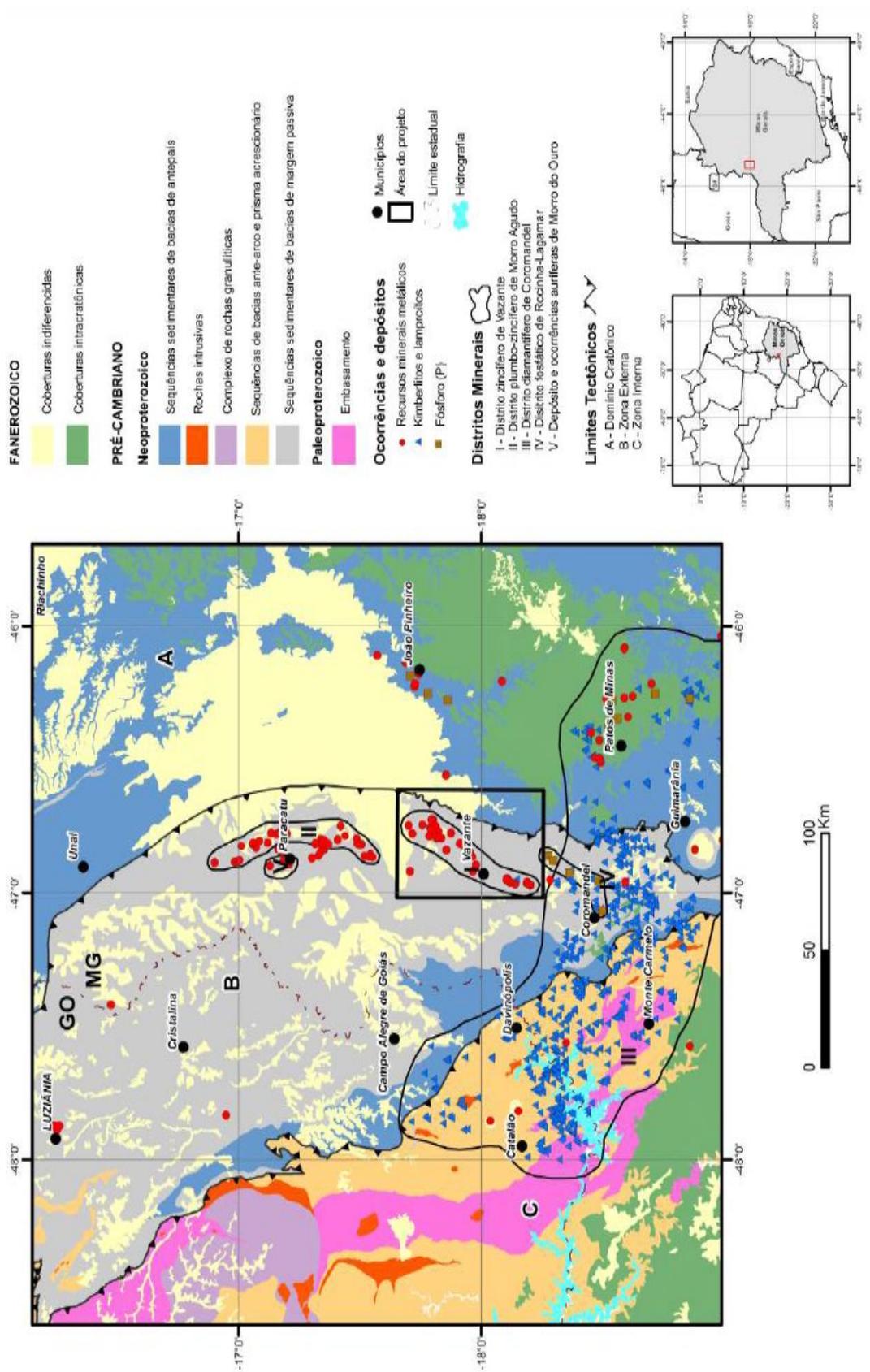


Figura 9 - Encarte tectônico da Faixa Brasília mostrando os principais distritos minerais com destaque para o Distrito Zincífero de Vazante (retirado de DIAS et al. 2015. CPRM)

Dentre os compartimentos tectônicos presentes na Faixa Brasília, para fins de maior importância ao presente trabalho, destaca-se a Zona Externa (Figura 9). Abrangendo às sequências sedimentares interpretadas como bacias de margem passiva representadas pelos grupos Canastra, Paranoá e Vazante (Dias *et al.* 2015). Segundo alguns autores, essas unidades geológicas possuem idade máxima de sedimentação de 1,0 Ga (Rodrigues, 2008. Pimentel *et al.*, 2011), sendo parte da sequência sedimentar associada a bacia de antepaís; Grupo Ibiá. Ainda pode-se definir essas unidades como um típico cinturão de dobras e falhas, sendo metamorfisadas sob condições de fácies xisto verde inferior e posicionadas por empurrão sobre o domínio cratônico durante a orogenia neoproterozoica (Fuck *et al.* 1994). Os distritos zincífero e plumbo-zincífero de Vazante e Morro Agudo, respectivamente e o depósito aurífero de Morro do Ouro (Figura 9), estão inseridos no domínio externo, sendo aqueles, associados ao Grupo Vazante (Dias *et al.* 2015).

Na Zona Externa, da Faixa Brasília de Dobramentos Brasília, podemos destacar a Província Mineral Vazante Paracatu (Dias *et al.* 2018) que propõe a divisão estratigráfica para a cartografia desse Província, a seguinte estruturação: Grupo Vazante – formações Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Serra da Lapa; Grupo Canastra – Formação Paracatu, dividida em membros Morro do Ouro e Serra da Anta; Formação Serra do Landim; e Grupo Bambuí – representado pelo Supergrupo Paraopeaba (Figura 10).

Designada Inflexão do Rio Escuro, essa região é responsável pela divisão da Província Mineral Vazante – Paracatu em dois distritos: Distrito Zincífero de Vazante (DZV) e Distrito Mineral de Paracatu – Unai (DPU). Essa segmentação mostra diferença no empilhamento estratigráfico e estruturação, além de separar o domínio das mineralizações de zinco silicato (DZV) e sulfetado (DPU) (Dias *et al.* 2018) (Figura 10).

Com direção NNE-SSW o Distrito Zincífero de Vazante (DZV) possui suas unidades estruturadas nesse *trend*. Entretanto, de forma geral, a arquitetura de toda o DZV revela unidades estruturadas por falhas inversas e de empurrão, com vergência para leste afetadas por falhas normais tardias, onde as falhas de empurrão colocaram as sequências sedimentares mais antigas sobre as mais jovens (Dias *et al.* 2018) (Figuras 10 e Figura 11).

A seção A-A', da Figura 11, demonstra, principalmente, a estruturação do DZV, que atravessa a região da Mina de Vazante, exemplificando as unidades estruturadas por dobras suaves e abertas com eixos sub-horizontais de direção NNE-SSW, cortadas por falhas normais NE-SW (Figura 10). Ainda segundo Dias *et al.* (2018), nessa seção a Formação Serra da Lapa está posicionada por falha de empurrão sobre a Formação Serra do Garrote. O contato a leste entre essas últimas formações se dá por meio de falha inversa, que apresentam um rejeito final normal.

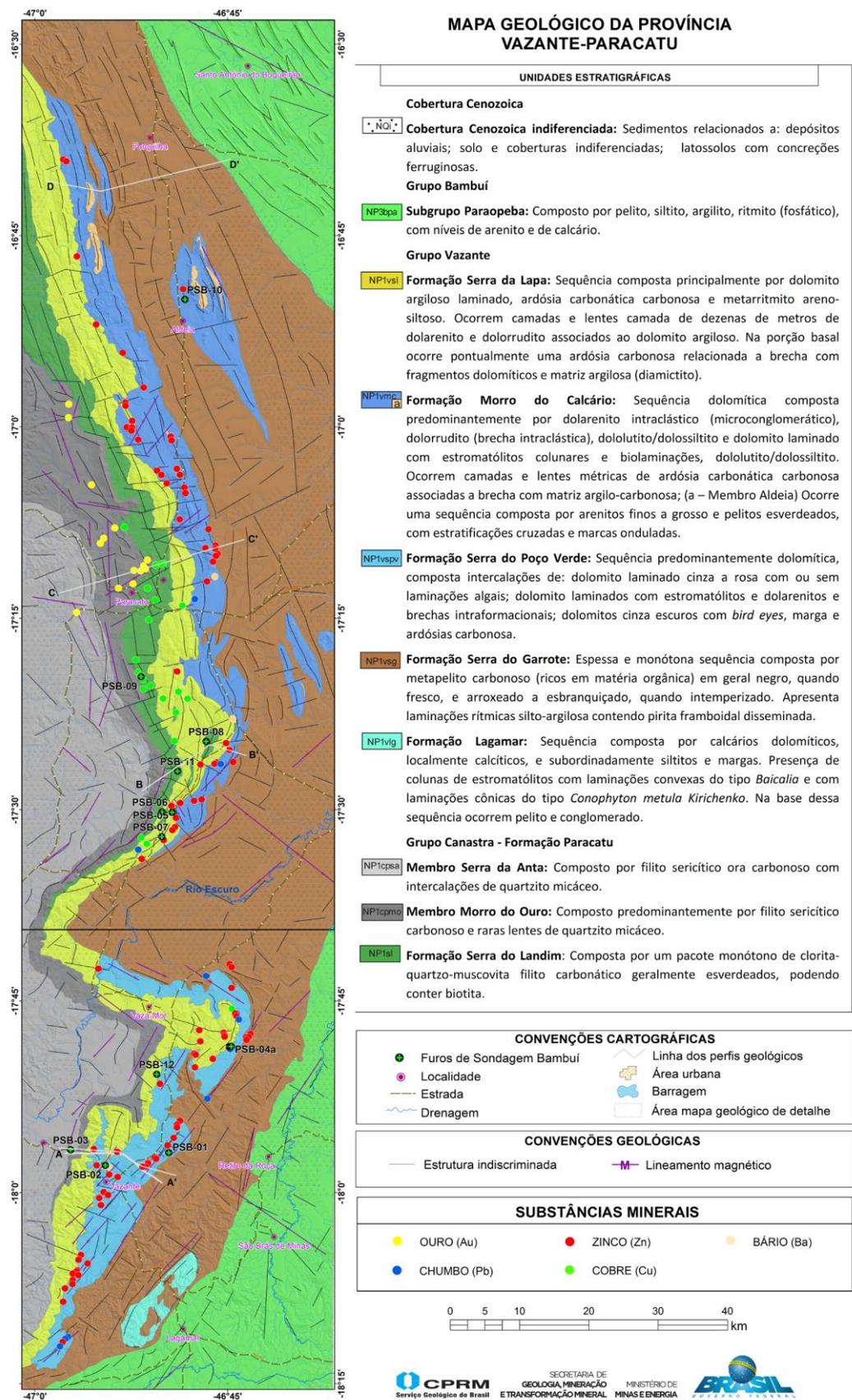


Figura 10 - Mapa geológico integrado simplificado com coluna estratigráfica e destaque para ocorrências minerais. (Retirado de Dias et al., 2018. CPRM)

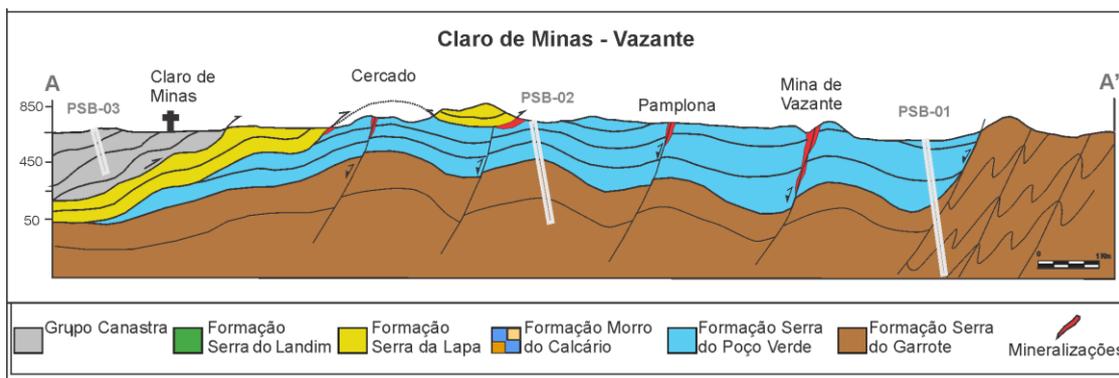


Figura 11 - Perfil geológico (A-A') do Distrito Zincífero de Vazante (modificado de Dias *et al.*, 2018. CPRM)

4.2 GRUPO VAZANTE

O Grupo Vazante ou Faixa Vazante (Dardenne *et al.* 1998 e Dardenne, 2000), possui extensão média de 250 Km com orientação geral N-S, tendo aproximadamente 30 Km de largura e 5 km de espessura, podendo ser dividida em dois domínios principais separados pela inflexão do Rio Escuro (Dias *et al.*, 2015). Ainda segundo esse autor, a parte sul caracteriza-se por um domínio de estruturas com direção NE-SW sendo caracterizado pela ocorrência de depósitos de zinco silicatado, enquanto o domínio norte possui estruturação NNW-SSW e depósitos de zinco sulfetado (Figura 10).

Tendo como constituintes uma sucessão pelítico-carbonática metamorfizada nas fácies xisto verde (Marques, 2015), as mineralizações do DZV estão, principalmente, relacionadas a esses tipos de rochas do Grupo Vazante (Rigobello *et al.*, 1988; Oliveira, 1998; Dardenne *et al.* 1998 e Dardenne, 2000). Alguns autores interpretam o Grupo Vazante como um depósito de margem continental passiva (e.g Campos-Neto 1984b, 1984b; Almeida, 1993; Alkimin & Martins-Neto, 2012), existem trabalhos que interpretam essa unidade como exemplo dos depósitos em bacias de antepaís (Dardenne *et al.* 1998).

Analisando as colunas estratigráficas das porções norte e sul da Faixa Vazante podemos observar uma grande variedade de litofácies, algumas com diferenças acentuadas entre si, fato esse já discutido em diversos trabalhos (e.g. Oliveira 1998). Tomando como base Dardenne *et al.* (1998) e Dardenne (2000), (Figura 12), sendo essa a coluna estratigrafia mais utilizada na literatura. Dardenne define o Grupo

Vazante como sendo composto por 7 (sete) formações sendo elas: Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Lapa (Serra da Lapa).

Diversos autores definem essas formações, segundo suas composições, da seguinte forma, da base para o topo, conforme organizado por Monteiro (2002):

- **Santo Antônio do Bonito:** segundo Dardenne (2001) é composta por quartzito, localmente conglomerático, intercalado à ardósia, e a corpos de diamictito com clastos e quartzito, dolomito, metassiltito e granitóide em matriz pelítica ou localmente, fosfática (apresentando níveis de rocha fosfática);
- **Rocinha:** (Dardenne *et al.* 1997; 1998): é constituída por arenitos rítmicos, pelitos, ardósias, metassiltito, ardósia com pirita e laminações fosfáticas que gradam para fosfarenito (Fosforito 2), que constitui o depósito fosfático de Rocinha.
- **Lagamar:** segundo Dias (2015) é uma formação composta por calcários dolomíticos, localmente calcíticos, e subordinadamente silitos e margas. Presença de colunas de estromatólitos com laminações convexas do tipo *Baicalia* e com laminações cônicas do tipo *Conophyton metula Kirichenko*. Na base dessa sequência ocorrem pelito e conglomerado.
- **Serra do Garrote:** ardósias verdes com intercalações de metassiltitos, ardósias negras carbonosas e lentes de fosforitos e de dolomitos com conglomerados basais (Monteiro, 2002, adaptado de Madalosso, 1979);
- **Serra do Poço Verde:** constituída por dolomitos cinza e rosa com laminações algais, ardósia verde e cinza, dolomito cinza escuro com bird's eyes, margas e folhelhos pretos carbonosos e com pirita disseminada (Monteiro, 2002);
- **Morro do Calcário:** segundo Dardenne (2000) representa um complexo de recife, com fácies de pós-recife (back-reef) e ante-recife (fore-reef). Possui na sua constituição dolomitos estromatolíticos (bióstromos) róseos a cinza-claros, dolomitos cinza-escuro com laminação algal e níveis de dolarenitos finos a grossos, cinza-claros, oolíticos e oncolíticos, doloruditos e brechas lenticulares constituídas por fragmentos centimétricos de dolomitos estromatólitos em matriz dolomítica.
- **Lapa (Serra da Lapa):** essa formação, segundo Monteiro (2002) adaptado de Madalosso (1979) é subdividida em 3 (três) subfácies; basal, constituída por quartzo sericita filitos, metassiltitos e filitos carbonosos; média, com doloruditos,

dolarenitos e dolomitos maciços e superior, com quartzo-sericita filitos, margas e calcários impuros.

Ainda segundo Monteiro (2002), com metamorfismo com idade relacionado ao início da fácies xistos verdes em decorrência da tectônica convergente brasileira, as unidades do Grupo Vazante, apresentam desenvolvimento de clivagem ardosiana, cristalização de sericita, clorita e quartzo, e uma foliação espaçada associada, com recristalização local de sericita (Rostirolla *et al.* 2001), e apresentam foliação milonítica superimposta a ambas. O Grupo Vazante compõe todas as litologias presentes na Minas Vazante.

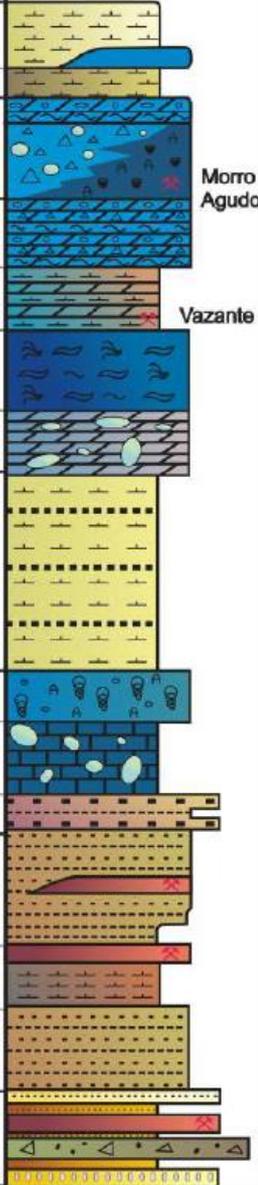
Grupo	Formação	Membro	Descrição e depósitos/ocor- rências minerais associadas	
VAZANTE	Lapa	Serra da Lapa	Ardósias carbonatadas cinzas e lentes de dolomitos	
		Serra do Velosinho	Ardósias carbonatadas pretas	
	Morro do Calcário	Pamplona Superior	Bioherma estromatolítica, fácies de brechas e dolarenitos Depósitos minerais: Morro Agudo, Fagundes e Ambrósia	
	Serra do Poço Verde	Pamplona Intermediário	Dolomitos rosados com esteiras estromatolíticas, nódulos de barita e gretas de ressecamento	
		Pamplona Inferior	Ardósias cinza a verde com intercalações de dolomitos rosados Depósito mineral: Vazante	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-escuros com esteiras estromatolíticas e <i>birds eyes</i>	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-claros a rosados com intercalações de brechas e dolarenitos	
	Serra do Garrote		Ardósias cinzas com lentes de quartzitos esporádicas	
	Lagamar	Sumidouro	Bioherma estromatolítica	
			Calcários cinza-escuros e brechas dolomíticas	
		Arrependido	Conglomerados	
	Rocinha		Ritmitos	
			Depósito mineral: Lagamar - fosforito	
			Ardósias cinza-escuras, piritosas e fosfatadas Depósito mineral: Rocinha - fosforito	
Ritmitos				
Santo Antônio do Bonito		Intercalações de quartzitos, fosforitos, diamictitos e ardósias Ocorrência mineral: Coromandel - fosforito		

Figura 12 - Coluna litoestratigráfica do Grupo Vazante, com indicações da posição dos depósitos minerais (Dardenne, 2000, retirado de DIAS et al. 2015. CPRM)

4.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL

Caracterizada por sua complexidade, a estruturação principal do Grupo Vazante está associada a esforços tectônicos rasos com vergência para leste (Oliveira, 2013). Evidenciado pela acomodação da deformação em dobras isoclinais e falhas de baixo ângulo, enquanto os dolomitos comportam-se como blocos rígidos, formando dobras suaves e fraturas espaçadas, as unidades pelíticas apresentam

comportamento reológico plástico (Dardenne, 1974). Ainda segundo Dardenne (*et al.* 1998) o preenchimento por fluidos conatos da estruturação maior identificada como falha normal lítrica é o controle tectônico para a mineralização hidrotermal de zinco está relacionada.

Trabalhos estruturais específicos foram realizados na região de Vazante e muitos autores propõem a evolução estrutural do Grupo Vazante em várias etapas. Destaque para Rostirolla (*et al.* 2002) e citado por Oliveira (2013), definiram 5 (cinco) fases deformacionais, a começar por esforços convergentes no início (fase D1 e D2), passando a direcional sinistral realcionada a uma tectônica de escape (fase D3) e posteriormente distensional (fase D4); esta última fase provavelmente relacionada ao relaxamento de tensões pós-convergência. As estruturas da fase D5 referem-se ao registro parcial de um segundo ciclo, correspondendo ao fraturamento generalizado com direção preferencial NW a EW, transversal ao trend estrutural do primeiro ciclo de direção NE.

Oliveira (2013) destaque que Pinho (*et al.* 1990) estabelecem, sobre os estudos relacionados a evolução da Falha mineralizada, 4 (quatro) fases de deformação, sendo (1) fase de caráter extensivo reativando antigas zonas de fraqueza de embasamento, com movimentação diferencial dos blocos, gerando altos paleogeográficos; (2) fase compressiva tangencial que gerou reativações com movimentação transcorrente; (3) fase de encurtamento tectônico marcado por falhamentos de empurrão e (4) fase de caráter extensivo, com alívio da compressão anterior e acomodações dos blocos.

Monteiro (1997) destaca que Almeida (1993) propõem que a Formação Vazante foi afetada por grupo de *nappes* oriundos da compressão que sucedeu a extensão formadora das bacias acarretando reflexo no desenvolvimento das áreas pericratônicas. Características direcionais estão presentes na etapa compressional (Alkimim *et al.* 1989) sendo associadas à tectônica transpressiva. Ainda sobre essa tectônica transpressiva proterozoica desenvolveu uma extensa zona de cisalhamento com sistemas transcorrentes sinistrais rúpteis- dúcteis e rúpteis de direção N50/ 60 NW, e *nappes* com vergência para E.

Slezak (2012) ao estudar a brecha tectônica associa a formação dessa ao desenvolvimento de uma zona de cisalhamento correlatas com as dobras D2 da deformação observada nas unidades pelíticas menos competentes. Está estrutura

atuou como conduto e controla a alteração hidrotermal e a mineralização. Essa tese tem importância chave ao presente trabalho para a interpretação dessas unidades estruturais ao longo das atividades em campo e no software.

4.4 MAPEAMENTO GEOMECÂNICO

Segundo Renó *et al.* (2014), o mapeamento Geomecânico possui como principais objetivos a obtenção da definição das principais estruturas geotécnicas, e por consequência, a qualidade do maciço rochoso.

O mapeamento robusto vai além de coleta da atitude as estruturas. Deve buscar identificar as características completas e variadas de toda a escavação. Deve-se definir uma escala de trabalho para a realização do mapeamento levando em consideração, as dimensões da galeria, a persistência das estruturas, a variação da qualidade do maciço em uma galeria, e demais fatores (Reno, et al. 2014).

Para elaborar um banco de dados robusto de mapeamento, é fundamental que o mapeamento consiga coletar o máximo de informações das principais estruturas do local mapeado.

4.5 MODELAGEM GEOMECÂNICA

Com desenvolvimento constante dos softwares de mineração a análise antecipada de informações geotécnicas é parte essencial para o planejamento e desenvolvimento de mina, no sentido de obter melhor previsão e controle de custos, da produtividade e dos riscos envolvidos (Vilca, 2019).

Com o papel estratégico desempenhado pela Geotecnia na mineração, a elaboração de um modelo Geomecânico possui grande importância para o entendimento do comportamento do maciço.

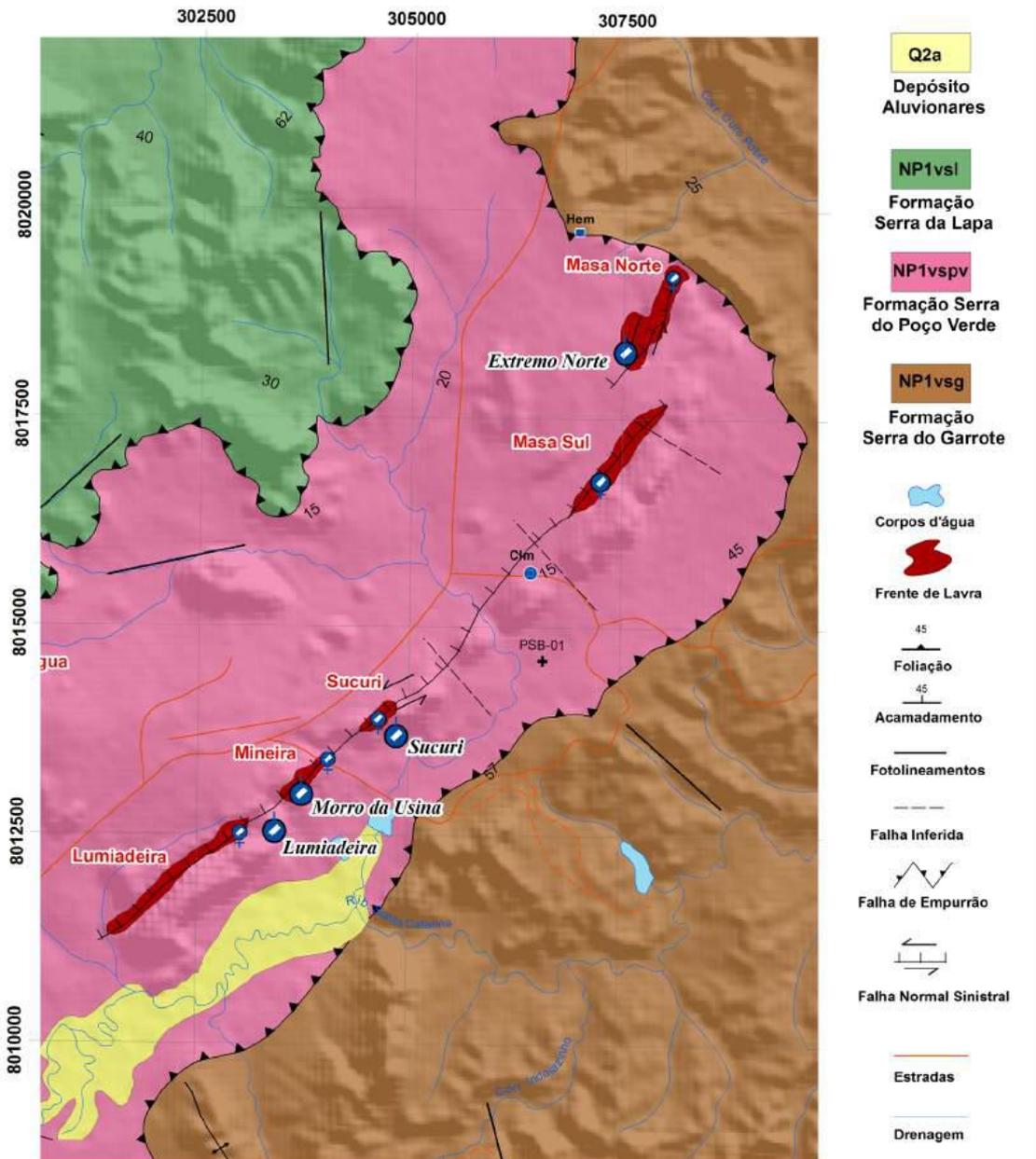
A utilização do software GEM4D, permite potencializar as informações coletadas no mapeamento Geomecânico para elaborar um modelo robusto contribuindo para o melhor entendimento do comportamento das estruturas no maciço e sua utilização para aprimorar os projetos de estabilização.

4.6 COMPLEXO DE MINAS SUBTERRÂNEAS DE VAZANTE

4.6.1 Aspectos Gerais

A Mina Vazante compreende a um complexo de duas minas, Mina Vazante e Extremo Norte, onde a exploração ocorre em três corpos mineralizados, Sucuri e Lumiadeira, pertencente a primeira mina e Extremo Norte, pertencente a mina homônima. Todo esse conjunto de empreendimentos encontram-se na Falha Vazante, compondo o depósito de Vazante (Figura 13)

O método de lavra usados na mina é o *sublevel stope*, sendo empregado duas variante desse método: o VRM (*Vertical Retreat Mining*) e o *Open Stopes*. Em ambos os casos, sempre que possível é feito tanto a lavra descendente quanto a ascendente, sendo que para esses casos é realizado o enchimento com estéril para o bloco lavrado descendente. Entretanto, para os locais em que, as tensões geomecânicas que atuam não permitem a retirado total do bloco, faz-se necessário deixar *rib pillar* ou *sill pillar* de minério para garantir a estabilidade.



CARACTERÍSTICAS DOS DEPÓSITOS

MORFOLOGIA (Orientada na direção dos corpos)	Situação	Tipo de Cava	TAMANHO/RECURSO GEOLÓGICO (2014)				
			UNID./ SUBST.	SEM INFORMAÇÃO	PEQUENO	MÉDIO	GRANDE
Filoniana	Ativa	Subterrânea	Toneladas de Zn	-	2.000 a 20.000	20.000 a 200.000	200.000 a 2.000.000
	Inativa	Céu aberto					

- + Sondagem
- Ocorrência (Calamina)

Figura 13 - Mapa geológico com os depósitos minerais distribuídos na Falha de Vazante compondo o depósito de Vazante (retirado de DIAS et al., 2015. CPRM)

A exploração de Zinco da região remonta fins dos anos 1960 pela CMM (Companhia Mineira de Metais), por lavra a céu aberto, sendo realizada pela extração de Calamina, minério de zinco formado por minerais hidratados a partir da alteração supergênica da Willemita ($ZnSiO_4$) (Gritti, 2014).

A extração através de lavra subterrânea deu-se no início nos anos 1980, através de exploração de Willemita ($ZnSiO_4$), um silicato de zinco. O empreendimento atualmente pertence a multinacional Nexa Resources, que detém os direitos de exploração. O Complexo atualmente opera apenas as minas subterrâneas que possuem mais de 300Km de galerias de desenvolvimento e lavra. Possui como subprodutos os concentrados de chumbo e prata.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DA MINA

4.7.1 Mineralização

A mineralização de Vazante está associada à zona de falha de Vazante de direção N50-60E/60NW e a brechas de falha associadas, ocorrendo como estreitas faixas deformadas. A mineralização é regida por controles estruturais, litológicos e estratigráficos (mudança de fácies de folhelho carbonoso do membro Morro do Pinheiro para dolomitos de origem algal do membro Pamplona).

Os minerais de minério são a Willemita (Zn_2SiO_4) que ocorre na mina subterrânea e a Calamina $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot 2H_2O$, dos quais, o último pode ocorrer associado a brechas de colapsos formadas por fragmentos angulosos de ardósia e dolomitos em matriz terrosa de alteração dos mesmos, localizando-se sempre a leste do corpo willemítico e sendo encontrada nos domínios lavrados a céu aberto (lavra a céu aberto na porção sul da mina e corpo Sucuri ao norte).

A willemita aflora com espessuras variáveis de 1 a 10 metros em média sobre a forma de blocos deslocados por falhas transversais à zona de cisalhamento. No seguimento sul da mina ao longo de 2500 metros na direção NE, no seguimento norte ocorre com espessura de 2 a 15 metros em subsuperfície ao longo de 1500 metros na direção N50E. As deformações que afetaram as rochas encaixantes também afetaram os corpos mineralizados conferindo-lhes forma lenticular. A willemita ocorre às vezes associada à hematita e pode ser cortada por pequenas concentrações de esfarelita e galena.

4.7.2 Estrutura Geológica

Trabalhos recentes de análise estrutural (Pinho, 1990) e de geoquímica isotópica e estudos genéticos (Monteiro L. V. S., 1997) trouxeram muitos fatos novos, como a elucidação da natureza da movimentação na zona de falha, sua interação com os processos de circulação de fluidos, precipitação de minerais, dentre outros. Sugere-se uma gênese hidrotermal para o depósito, que teria se formado em uma fase extensiva pré-brasiliana.

As mineralizações são associadas à Falha de Vazante, zona de cisalhamento que tem atitude N50E/60NW e natureza transcorrente sinistral (Pinho, 1990), com distribuição irregular ao longo da mesma, mas sempre na fácies inferior e base da fácies média do membro Pamplona. Na Figura 14 é mostrada a zona de cisalhamento e a abrangência lateral da alteração hidrotermal, que apresenta enriquecimento em ankerita, siderita, quartzo e hematita (Hitzman, 1977).

Segundo Monteiro, L. V. S. a alteração hidrotermal provocou enriquecimento em zinco e chumbo em todos os litotipos presentes na zona de falha. As evidências estruturais, petrográficas e isotópicas indicam que os episódios de deformação e de mineralização willemítica são sincrônicos ao desenvolvimento da zona de cisalhamento (de idade brasiliana).

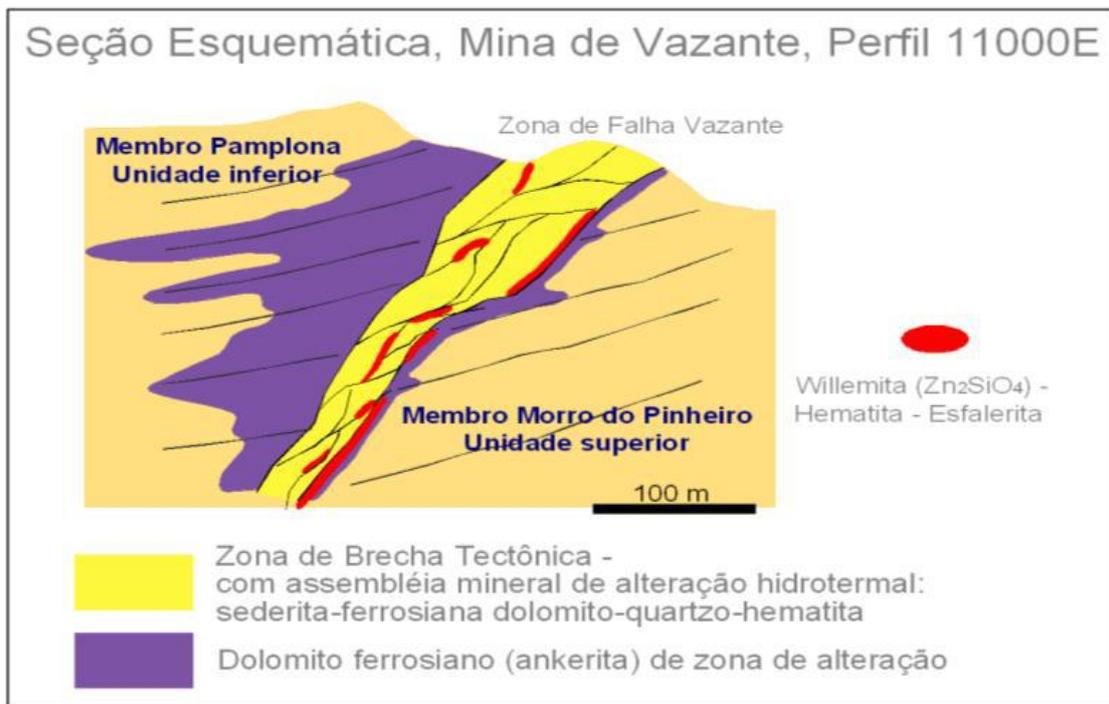


Figura 14 - Seção Esquemática da Zona de Falha de Vazante. Adaptado de Hitzman, 1977.

4.8 GEOTECNIA

4.8.1 Aspectos Gerias

As escavações de Vazante estão inseridas em um ambiente cárstico proveniente principalmente pela dissolução de rochas dolomíticas. De maneira geral, trata-se de um maciço rochoso fraturado o qual se encontra associado uma grande percolação de água, responsável por espessas zonas de alteração e de dissolução. Estas, por sua vez, são responsáveis pela formação de cavidades (fendas ou vazios), geralmente preenchidas por material argiloso bastante fluido (bocainas), apresentando blocos de rochas de diversos tamanhos em meio a argila.

Em meio a estratigrafia local são observados níveis centimétricos a decamétricos de filitos e margas. Nos níveis de filito, muitas vezes carbonosos e escuros, a alteração e dissolução é inexistente, porém o grau de fraturamento das rochas é mais acentuado. Já as margas podem se apresentar alteradas e, dependendo da sua composição, pode apresentar um grau de dissolução incipiente.

Todo esse pacote estratigráfico apresenta-se sub-horizontal em um contexto geral, sendo perturbado consideravelmente nas proximidades da faixa mineralizada, onde são observadas as brechas dolomíticas. A principal característica da faixa mineralizada é ser constituída de uma espessa zona de cisalhamento onde várias superfícies anastomosadas que se entrecruzam, isolando corpos lenticulares com dimensões decimétricas a métricas. As rupturas do maciço são geralmente controladas pelas descontinuidades que possuem espaçamento irregular, variando de dessimétrico a métrico. As falhas de médio e grande porte possuem baixa resistência, sendo planas a pouco onduladas na escala de lavra e comumente preenchidas por material argiloso de espessura milimétrica.

4.8.2 Unidades Geotécnicas

Para facilitar os estudos Geomecânicos e a individualização dos maciços de Vazante, foi criado um agrupamento dos tipos de maciço rochosos denominados como Unidades Geotécnicas (Tabela 1). Esse agrupamento engloba maciços com características geotécnicas semelhantes, realizado a partir de classificações de qualidade do maciço consagradas na literatura (Índice Q e RMR), assim como os mecanismos de ruptura associados a cada um desses maciços.

Para a Mecânica das Rochas, por mais que existem diversos tipos de rochas diferentes na mina Vazante, para efeitos de análises geotécnicas, são individualizados apenas 6 litotipos principais: Dolomito cinza, Dolomito Rosa, Marga, Filito, Brecha e Argila (Solo e Fendas).

4.8.3 Padrão Estrutural

Existem na mina descontinuidades com grandes persistências que são responsáveis pela instabilidade de cunhas ou lajes de grande porte, tanto em relação às escavações dos realces como das galerias. As famílias de descontinuidades de menor porte são responsáveis por auxiliar na desarticulação desses grandes blocos e lajes, além de permitir a liberação de pequenos blocos.

O grau de fraturamento é diretamente proporcional ao número de famílias de descontinuidades que de maneira geral, é de três famílias mais aleatórias nos dolomitos cinza e rosa, quatro famílias mais aleatórias na brecha e três nos filitos e margas.

As fraturas que segmentam o maciço rochoso, de maneira geral, não apresentam diferenças significativas nas condições de suas paredes, as quais são geralmente planas a pouco onduladas, preenchidas por material argiloso de espessura milimétrica, suficiente para evitar contato rocha a rocha, favorecendo o deslizamento de blocos. No caso do filito as superfícies são planas e polidas.

4.8.4 Parâmetros de Resistência da rocha intacta

Em Vazante foram realizados testes de resistência da rocha intacta para vários dos litotipos individualizados acima. Esses ensaios foram realizados por laboratórios externos (IPT, Bhering e UFMG-DEMIN) em várias datas (1994, 2009 e 2017) e contextos diferentes. Os dados existentes englobam ensaios de resistência a compressão uniaxial, triaxial, diametral, ensaios de flexão, dentre outros. Não foi possível rastrear a origem das amostras e alguns dados são pouco confiáveis. Foi realizado um trabalho de compilação dessas informações a fim de gerar um resumo das propriedades da rocha intacta para os litotipos individualizados para os trabalhos da Mecânica das Rochas, as quais são mostradas na Tabela 6.

Litotipo	Rocha intacta						
	Densidade média (g/cm ³)	RCU (MPa)	Coesão (MPa)	Ângulo de atrito (°)	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poison	mi
Dolomito cinza	2.987	178	31.5	56.7	54068	0.23	9
Dolomito rosa	2.959	123	31.5	56.7	54068	0.23	9
Marga	2.991	87	15.6	47.3	53700	0.24	7
Filito	2.982	108	15.4	55.9	69100	0.24	7
Brecha	3.091	192	24.1	59.7	63861	0.25	19

Tabela 6 - Resumo dos parâmetros de resistência da rocha intacta para os principais litotipos da Mina Vazante

Independentemente do litotipo envolvido, há áreas na mina onde o maciço encontra-se alterado, conseqüentemente devem ser penalizados os valores de resistência apresentados acima, conforme as características do local, condição de alteração e objetivo da análise.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A elaboração da Modelagem Geomecânica no software GEM4D permite gerar estruturas em 3D que representam as estruturas mapeadas da Mina Vazante. Esse trabalho proporciona um maior entendimento estrutural das estruturas nas escavações, os mecanismos que as regem e o impacto das mesmas nas atividades da mina.

O Mapeamento Geomecânico permite entender a atitude das principais estruturas que ocorrem na Mina Vazante. A Modelagem Geomecânica no *software* GEM4D possibilita entender as principais características, comportamentos e impactos das unidades geomecânicas nas escavações e a extrapolação delas ao além do limite visível em campo.

Ao mapear as escavações da mina Vazante foi possível observar que os tipos de estruturas que mais comuns são: acamamento, foliação, junta, falha, zona de cisalhamento e veios. Todas essas estruturas mapeadas possuem, no máximo, persistências de até algumas dezenas de metros. A partir dessa atividade, também foi possível traçar uma relação dos tipos estruturas mais frequentes em cada tipo de escavação devido a associação daquelas com as litologias.

A respeito da correlação citada no parágrafo anterior, temos na mina Vazante a ocorrência de dolomitos cinza, dolomito rosa e filito, unidades litológicas com presença frequente em escavações de galerias de transporte, estações de bombeamento e rampas. Já a brecha predomina nas galerias de minério e travessas.

Com relação as estruturas mapeadas mais comuns nas litologias, podemos destacar o acamamento e as juntas no dolomito cinza e rosa e no filito, destaque também para a presença de foliação nesse último, sendo a direção horizontal a sub-horizontal mais comum para essas estruturas. Já na brecha possuímos grande número de juntas, zonas de cisalhamento e falhas.

Do ponto de vista Geomecânico, analisando as correlações supracitas, para as rampas, galerias de transporte e estações de bombeamento temos cunhas e lajes ocorrendo com maior frequência no teto das escavações. Os planos de acamamento e juntas são os principais responsáveis pelo surgimento dessas estruturas que podem acarretar riscos geotécnicos.

Fazendo a correlação anterior, para as galerias de minério e travessas temos o surgimento de cunhas e blocos na lateral e teto devido ao encontro de estruturas

como zonas de cisalhamento, falhas e juntas. Na brecha, litologia predominante das galerias de minério e travessas, encontramos mais de uma direção principal de famílias de estruturas. Por isso existe maiores ocorrências de estruturas que possam gerar riscos geomecânicos nas laterais que as demais escavações. Entretanto, devido à complexidade geológica da maciço rochoso da mina Vazante, as exceções às correlações supracitadas podem ocorrer. Por isso a importância de elaborar o Mapeamento Geomecânico robusto para que a modelagem seja uma representação fiel da realidade e permita identificar as estruturas que possam gerar riscos geotécnicos mais elevados.

A alimentação do banco de dados de Mapeamento Geomecânico, permite calcular de forma automática informações de grande importância a respeito das escavações sendo essas: Q-Barton, RMR, RQD e GSI. Esses dados também permitem melhorar a compreensão das estruturas e região onde elas estão inseridas possibilitando uma informação mais robusta e importante para os projetos de suporte das regiões mapeadas.

A partir desse trabalho foi possível observar também que a mineralização se delimita por planos bem definido e marcante, de rugosidade lisa a ligeiramente lisa. Esses, possuem fortes indícios de comportamento dúctil e rúptil em sua formação, fato esse corroborado por observações e campo, tipos de mecanismos de formação, metamorfismo presente, como recristalização mineral, no local que se encontram, e nas estruturas modeladas (Figura 15)

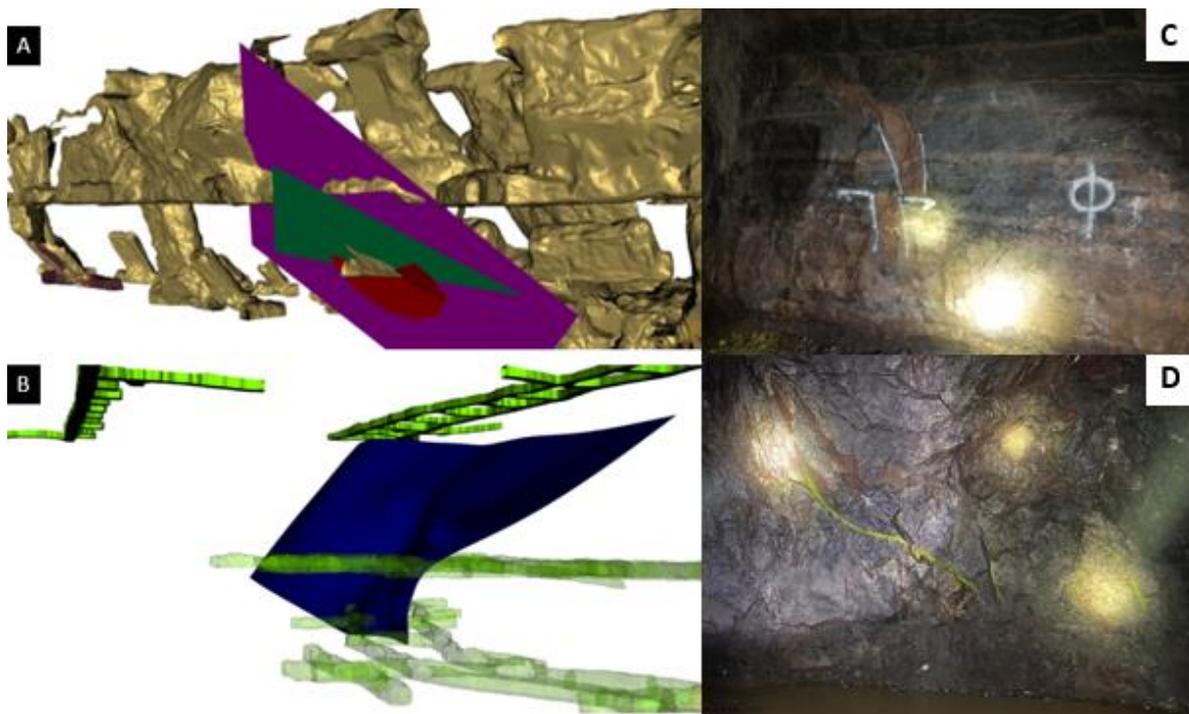


Figura 15 - Estruturas modeladas e mapeadas. A: Falha modelada onde é possível evidenciar pelos os escaneamentos os planos dessa estrutura na escavação (“plano liso”); B: Zona de Cisalhamento modelada onde se pode observar o comportamento dúctil ao longo de sua e extensão, fato esse sustentado pelos mapeamentos ao longo das escavações; C: Plano de quebra rúptil de uma falha que controla a mineralização; D: plano dúctil de uma zona de cisalhamento que controla a mineralização (é possível ver as feições do plano liso)

Essas observações também são colaboradas por experimentações como a observação do formato das estruturas modeladas, valores das atitudes medidas pela bússola, feições, análise estereográfica no software Dips, análise gráfica das características das estruturas e formações observáveis a olho nu. Com isso, juntamente com os trabalhos práticos de Modelagem Geomecânica a partir do Mapeamento Geomecânico realizado, anteriormente ao presente trabalho na mina, pelo Engenheiro Geólogo Consultor de Geomecânica Rodolfo Renó, que observa as mesmas características dúcteis e rúpteis dessas estruturas.

Ademias trabalhos de outros autores evidenciam essa teoria destaque para Alkimim, et al (1989) interpretam essas estruturas como eventos tectônicos onde há uma extensa zona de cisalhamento e Slezak (2012) associa a formação da Brecha tectônica associada ao desenvolvimento de uma zona de cisalhamento sendo essas estruturas canalizadora que controla a alteração hidrotermal e a mineralização, conforme já mencionado no presente trabalho.

Com isso, ao se mapear e modelar o contato entre a brecha e encaixante definiu-se essa estrutura como uma zona de cisalhamento ou falha, sendo as atitudes, feições e comportamento das estruturas ao longo das escavações as condicionantes para definir qual tipo se trata. Por, normalmente, possuir uma persistência muito grande, maior que 20 metros, e hospedar a mineralização, essa unidade geotécnica possui grande impacto na modelagem da mina merecendo atenção especial nos trabalhos que as envolvem.

Devido a sua grande persistência, da estrutura que delimita a mineralização, há locais em que a mesma abrange vários níveis Figura 16. A Modelagem Geomecânica dessa estrutura permite adequar melhor o posicionamento de uma galeria de minério para que essa possa ficar numa disposição que favoreça a abertura do bloco aproveitando o contato (“plano liso”) com a encaixante possibilitando que o minério se desagregue com mais facilidade.

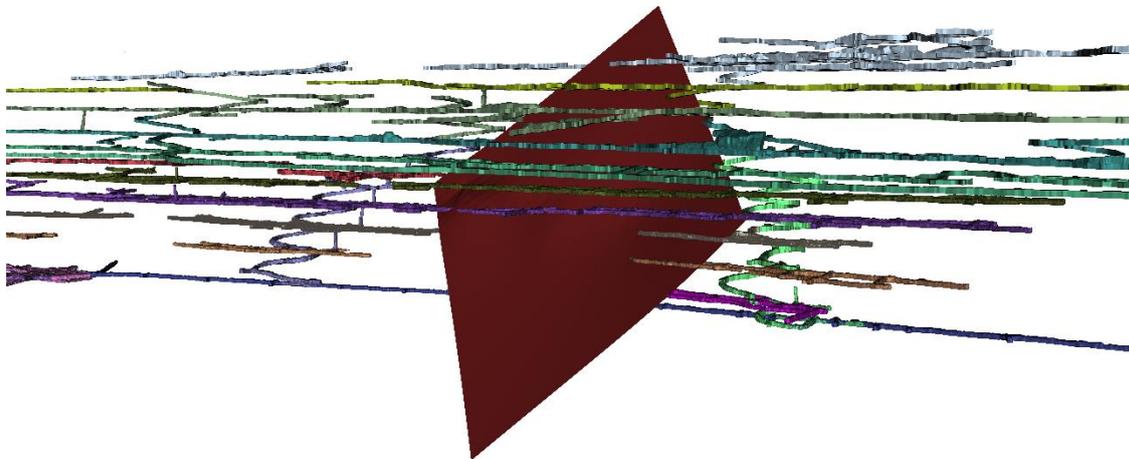


Figura 16 - Exemplo da estrutura que delimita a mineralização (“plano liso”) que possui grande persistência, mapeada em vários níveis

O Mapeamento e a Modelagem Geomecânica também permitem destacar estruturas que possam acarretar problemas de instabilidade Geomecânicos nas escavações. Estruturas grandes, que extrapolam a parte visível em campo, ao interceptarem formam cunhas e/ou que possuem preenchimento mole, não são rugosas e que possuem água devem ser modeladas e repassadas para os responsáveis por elaborar os projetos de estabilização do local onde elas se encontram. Com isso, é possível propor os mecanismos de contenção que melhor se

enquadram para o local, sendo atirantamento, cabeamento, ancoragem com cambotas e projeção de concreto projetado os usados na Mina Vazante.

Outro ponto importante a ser discutido, é fato de ser perceptível que a Modelagem Geomecânica no *software* GEM4D a partir do Mapeamento Geomecânico possuem grande margem para melhorias no modelo. Vale mencionar que a metodologia de trabalho aqui elaborada, possui suas limitações. Algumas estruturas podem não ser totalmente fieis à realidade.

O contorno e a geometria que é elaborado no *software* para a modelagem das estruturas aqui proposta, em muitos casos, pode destoar da realidade. Ademais, alguns divergência de interpretação e erros na elaboração do mapeamento podem colaborar para esse desvio no modelo. Entretanto, a modelagem aqui proposta, é uma ferramenta poderosa e de grande acuracidade na elaboração dos mecanismos de controle geomecânico e entendimento do maciço rochoso.

Esse trabalho permitiu revisão e correção do processo de Modelagem Geomecânica a partir do Mapeamento Geomecânico e a retomada do mesmo. Foi possível alimentar o banco de dados com dezenas de novas estruturas (Figura 17), contribuindo ainda mais para os projetos de estabilização das escavações e o maior entendimento do maciço rochoso como um todo.

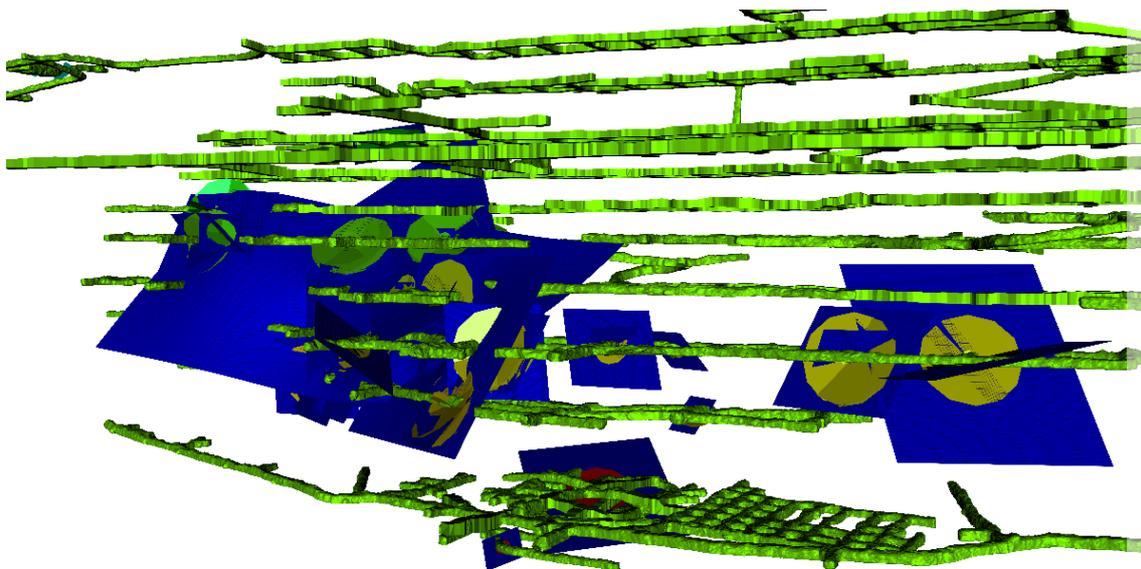


Figura 17 - Modelagens elaboradas em uma dada região da Mina Vazante

Entretanto, mesmo o modelo gerado possuir suas limitações, como todos os modelos possuem, esses déficits no trabalho não o comprometem totalmente. A Modelagem Geomecânica no *software* GEM4D a partir do Mapeamento Geomecânico é uma ferramenta muito útil para interpretação das estruturas, definição dos suportes de estabilização empregados, entendimento dos comportamentos Geomecânico da mina Vazante, contribuindo para que as atividades mineiras possam ocorrer de forma eficiente, economicamente viável e segura.

Visando aumentar o entendimento geomecânico das características das estruturas mapeadas e modeladas, é feito uma análise mais criteriosa. No *software* Power BI são elaborados gráficos que apresentam uma descrição mais quantitativa das estruturas.

Essa análise permite um maior controle das características das estruturas e um entendimento mais completo. É separado por litologias, o que permite aumentar a compreensão das estruturas identificadas nelas, conforme as figuras apresentadas abaixo.



Figura 18 - Análise quantitativa das estruturas mapeadas na Brecha.



Figura 19- Análise quantitativa das estruturas mapeadas no Dolomito cinza.



Figura 20 -Análise quantitativa das estruturas mapeadas no Dolomito rosa.



Figura 21 - Análise quantitativa das estruturas mapeadas na Marga.



Figura 22 - Análise quantitativa das estruturas mapeadas no Filito.

Complementando a análise geomecânica, é feito o estudo dos estereogramas das estruturas modeladas. Aqui é possível identificar mais facilmente as atitudes das estruturas, como se seguem nas imagens abaixo.

Para as juntas não há uma atitude preferencial, evidenciando as diferentes famílias que são encontradas nas escavações (Figura 23). Para as estruturas

identificadas como acamamentos (Figura 24), podemos perceber atitudes preferencial. Isso se dá pelas características dos acamamentos estarem subhorizontais e em uma direção muito similar ao longo de toda a mina, isso tanto no Filito quanto nos Dolomitos.

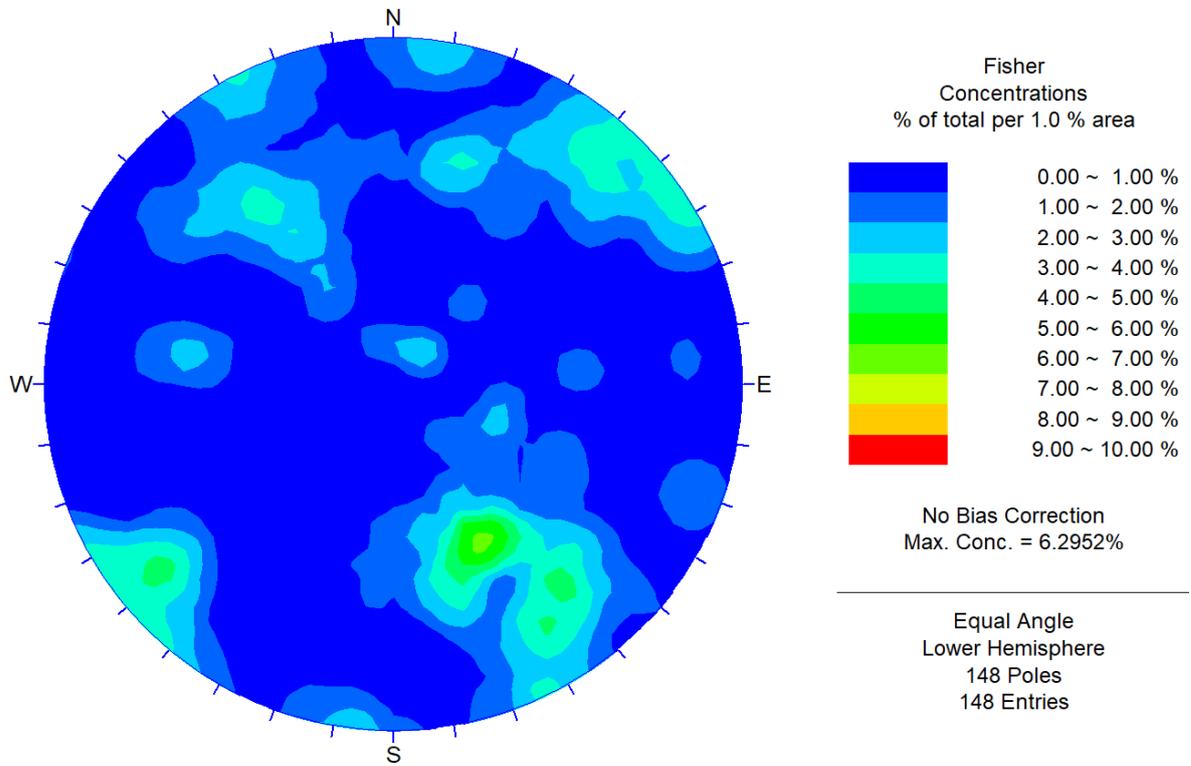


Figura 23 - Estereograma das juntas mapeadas e modeladas

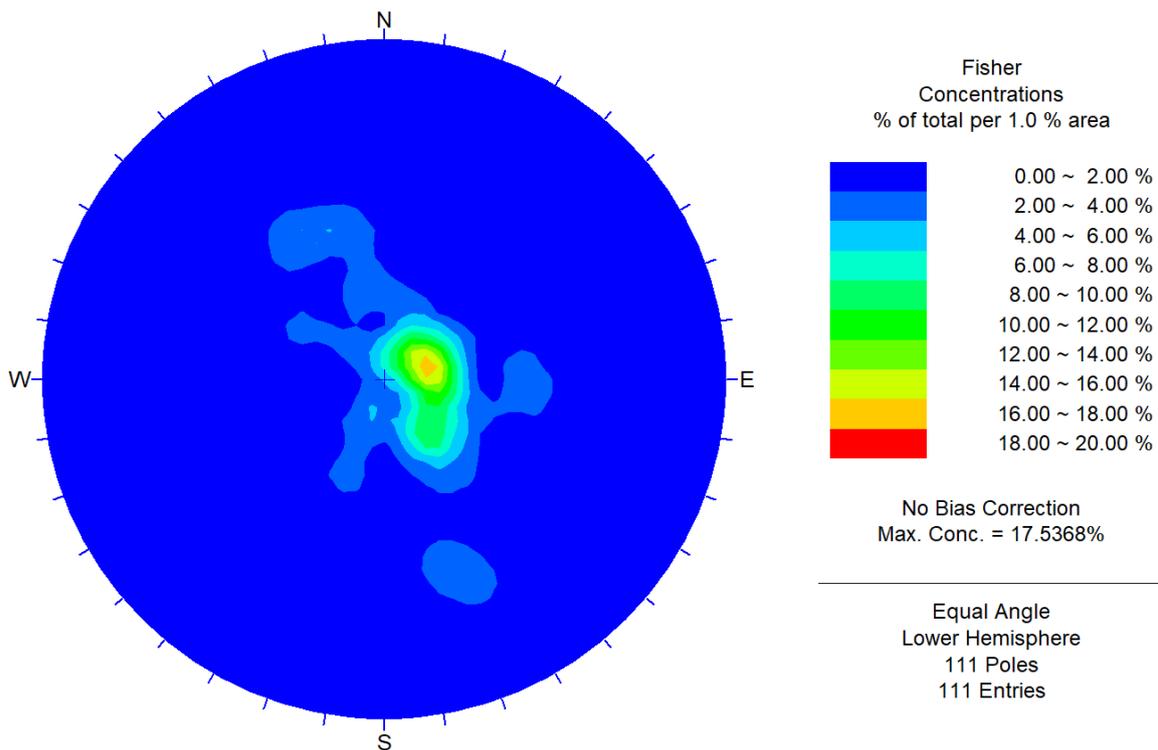


Figura 24 - Estereograma dos acamamentos mapeadas e modelados

Na estruturas identificadas como zona de cisalhamento (Figura 25) quanto nas falhas (Figura 26), temos os valores de atitude seguindo uma correlação. Esse fato evidencia que os comportamentos dúctil e rúptil ocorre ao mesmo tempo para a mineralização em diferentes partes da mina. Para a zona de cisalhamento (Figura 25) existe uma variação maior nas atitudes devido ao fato do comportamento dúctil realizar uma mudança no mergulho e na direção da estrutura.

Essas análises permitem potencializar ainda mais a modelagem geomecânica desenvolvida aqui. Sempre que os projetos de estabilização específicos essa análises prévias já possibilitam direcionar as melhores metodologias a serem adotadas.

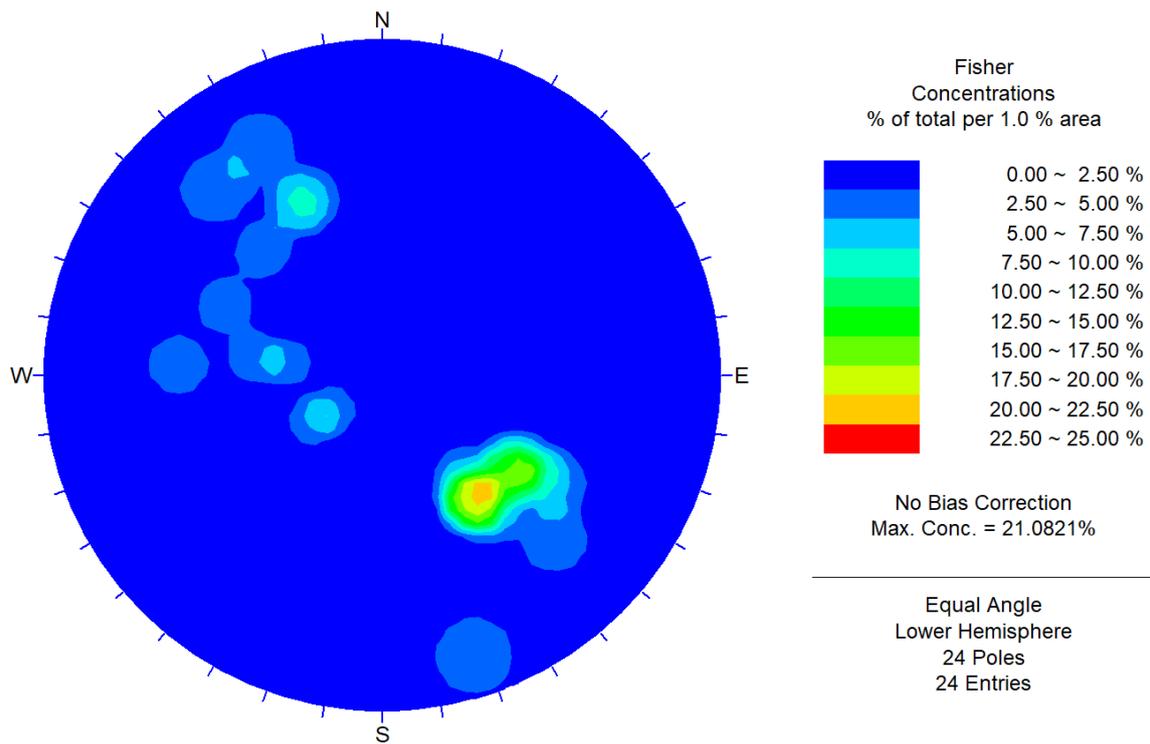


Figura 25 -Estereograma das zonas de cisalhamento mapeadas e modeladas

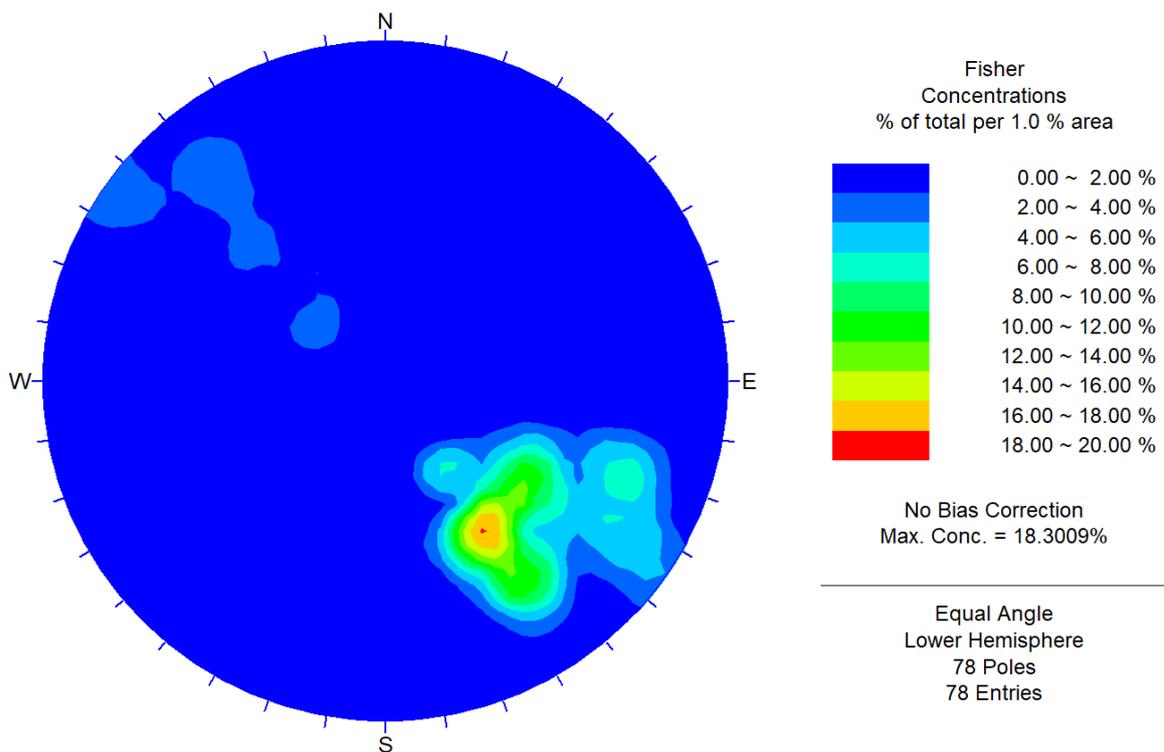


Figura 26 - Estereograma das falhas mapeadas e modeladas

CONCLUSÕES

Ao longo de 8 meses, entre os anos de 2020 e 2021, foi elaborado na unidade de Vazante a revisão e reestruturação do Mapeamento Geomecânico, sendo essa atividade base para a Modelagem Geomecânica das estruturas mapeadas. A retomada desse trabalho permitiu a identificação e modelagem de estruturas na ótica da Geomecânica para o Mina Vazante.

A modelagem Geomecânica no *software* GEM4D a partir do Mapeamento Geomecânico *in situ* na Mina Vazante provou ser uma ferramenta de grande importância para subsídio aos projetos de suporte das escavações, caracterização e entendimento dos mecanismos Geomecânicos que regem as estruturas presente nas escavações da mina.

Esse trabalho permitiu uma maior caracterização dos tipos de estruturas presentes em cada unidades litológicas predominantes nos pontos onde foram feitos o mapeamento. Também foi possível entender os tipos de estrutura e suas posições predominantes em cada tipo de escavação, que possam acarretar problemas Geomecânicos de instabilidade.

Concomitantemente, foi possível propor uma nova abordagem sobre a brecha onde se hospeda a mineralização da mina, sendo perceptível que essa apresenta comportamento tanto dúctil como rúptil em ao longo da mina. Essa variação está associada ao grau de metamorfismo em cada local ao longo da formação dessa unidade litológica.

É perceptível que, a metodologia proposta para a modelagem nesse trabalho, existe grande margem de melhoria. Algumas feições das estruturas, principalmente as que estão condicionadas por mecanismos dúcteis em sua formação não é possível elaborar o desenho fiel que representa a atitude ao longo da persistência da estrutura. Ademais, o acompanhamento do mapeamento das equipes de Geologia e Hidrogeologia da unidade permitiria uma maior robustez ao mapeamento Geomecânico. Entretanto esses desvios não comprometem de forma significativa o presente trabalho sendo esse uma ferramenta de grande importância para o entendimento geotécnico da mina.

Também é elaborado uma análise quantitativa das estruturas mapeadas em cada litologia. Isso permite potencializar o entendimento geomecânico do maciço, não apenas como todo. Isso permite potencializar o as análises geomecânicas.

Em síntese, é possível concluir que a Modelagem Geomecânica no *software* GEM4D a partir do Mapeamento Geomecânico *in situ* na Mina Vazante provou ser uma ferramenta de extrema importância para o entendimento dos mecanismos de Mecânica de Rochas que regem as estruturas presente no maciço rochoso da mina. Ademias esse trabalho permite contribui para que a atividade de mineração seja feita de forma viável sob as esferas econômica e operacional e com alto grau de segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M de; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. (1977) Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, Campina Grande, 1977. Ata. Campina Grande, SBG/NE, p.363-391.
- ALKMIN, F. F.; CHEMALE Jr., J.; BACELLAR, Ç. A. P.; OLIVEIRA, J. R. P.; MAGALHÃES, P. M. 1989. Arcabouço estrutural da Porção Sul da Bacia do São Francisco. In: V Simpósio de Geologia do Núcleo Minas Gerais / I Simpósio de Geologia do Núcleo Brasília. Anais, SGB. Brasília, p. 289 – 293.
- ALKMIN, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentar sequences of the São Francisco craton, estern Brazil. Marine and Petroleum Geology, S.L., n.33, S.N.T, p.127-139.
- ALMEIDA, F. F. 1968. Evolução Tectônica do Centro-Oeste Brasileiro no Proterozóico Superior. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, n. 40, p. 285-295.
- ALMEIDA, F. F. 1993. Limites do cráton do São Francisco em Minas Gerais – Síntese dos conhecimentos. In: Simpósio do Cráton do São Francisco, Salvador, SBG. Anais, p.256-259.
- ALMEIDA, F.F.M. 1967. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro, DNPM, Boletim n. 241, 36p.
- BRADY, B. H.; BROWN, E. T. Rock Mechanics for Underground Mining - 3rd ed, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 628 p, 2004.
- DARDANNE, M. A. 1974. Geologia da região de Vazante, Minas Gerais, Brasil. In: SGB, XXVIII. Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, Resumos, p.182- 185.

DARDENNE M. A. & FREITAS-SILVA F. H. 1998. Modelos Genéticos dos depósitos de Pb-Zn nos Grupos Bambuí e Vazante. Workshop Depósitos Minerai s Brasileiros de Metais Base, Salvador, CPGG-UFB/ADIMB, p.86 – 93.

DARDENNE M. A. 2000. The Brasilia fold belt. In: Cordani, U.G., Milani, E. G., Thomaz Filho, A. e Campos, D.A. (eds.), Tectonic evolution of South America, p. 231-263.

DARDENNE M. A. 2001. Lithostratigraphic sedimentary sequences of the Vazante Group. In: MISI, A. & TEIXEIRA, J. B. G. (org.) Proterozoic base metal deposits of Africa and South America. Contributions presented at the 1st Field Workshop, International Geological Correlation Programme 450, Belo Horizonte, CNPq/UNESCO/UGS, p.48 – 50.

DARDENNE M. A., FREITAS-SILVA F. H., SOUZA J. C. F., CAMPOS J. E. G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. In: SBG, XXXX Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, Resumos, p. 26.

DARDENNE, M. A.; FREITAS-SILVA, F. H.; NOGUEIRA, G. M. S; SOUZA, J. C. F. 1997. Depósitos de fosfato de Rocinha e Lagamar, Minas Gerais. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T; COELHO, C. E. S. (coord). Principais Depósitos Minerai s do Brasil, DNPM/CPRM, v. 4C, p. 113 – 122.

DIAS P. H. A.; MARINHO M. S.; SOTERO M. P.; VILELA F. T.; MARQUES E. D.; MATOS C. A. 2015. Metalogenia das Províncias Minerai s do Brasil: Distrito Zinífero de Vazante, MG – Estado de Minas Gerais. Programa de Geologia do Brasil, Gestão Estratégica da Geologia da Mineração e da Transformação Mineral, Informe de Recursos Minerai s, Série Províncias Minerai s do Brasil, nº05, CPRM, Brasília, p. 11 - 33.

DIAS P. H. A.; SOTERO M. P.; MATOS C. A.; MARQUES E. D.; MARINHO M. S.; JUNIOR M. A. C. 2018. Área de Relevante Interesse Mineral – ARIM: Distrito Mineral de Paracatu-Unai (Zn- Pb – Cu), MG. Programa de Geologia do Brasil, Avaliação dos Recursos Minerai s do Brasil, Informe de Recursos Minerai s, Série Províncias Minerai s do Brasil, nº14, CPRM, Brasília, p. 31 -43.

FOSSEN H. 2012. Geologia Estrutural. Tradução Fábio R. D. de Andrade – São Paulo: Oficina do Texto.

FUCK R. A.; PIMENTEL M. M.; D'EL-REY SILVA, L.J.H. 1994. Compartimento Tectônico na porção oriental da Província Tocantins. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Camboriú (SC), Anais, p. 215-216.

GRITTI R. M. 2014. Correlação dos Parâmetros da Classificação Geomecânica de Vazante Obtidos através da Caracterização Geomecânica de Testemunhos de Sondagem e Observações *In Situ*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

MADALOSSO, A. 1979. Stratigraphy and Sedimentation of the Bambuí Group in Paracatu Region, MG, Brazil. Dissertação de Mestrado.

MARQUES, C. S. de S. 2015. Geologia e quimioestratigrafia do Grupo Vazante em Lagamar (Minas Gerais, Brasil). Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerias, Belo Horizonte, p. 22.

MATUMOTO, C. 2012. Estudo da inflexão da Serra do Garrote e sua influência na zona de falha de Vazante (MG). Universidade Estadual Paulista (UNESP). Instituto de Geociências e Exatas. Rio Claro. SP.

MONTEIRO L. V. S., 1997. Contribuição à gênese das mineralizações de Zn da mina de Vazante, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, p. 37.

MONTEIRO L. V. S., 2002. Modelamento Metalogenético dos Depósitos de Zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, Associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais. São Paulo, p. 12 – 42.

OLIVEIRA, G.D. 2013. Reconstrução paleoambiental e quimioestratigrafia dos carbonatos hospedeiros do depósito de zinco silicatado de Vazante, MG. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 2013.

PIMENTEL, M. M.; RODRIGUES, J. B.; DELLA GIUSTINA, M. E. S; JUNGES, S; MATTEINI, M. E; ARMSTRONG, R. 2011. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS UePb sedimentary provenance data: A review. Journal of South American Earth Sciences, S.N.T., n. 31, p. 345 – 357, 2011.

PINHO J. M. M., DARDENNE M. A., RIGOBELLO A. E. 1990. Caracterização da movimentação transcorrente da Falha de Vazante, Vazante, MG In Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal, 1990, Anais Natal, SBG, v 5, p. 2284-2295.

RENÓ, R., GONTIJO, A. A., HERRERA, J. A. C., 2014. Procedimento Operacional de Mapeamento Geomecânico em Escavações Subterrâneas. Mecânica das rochas para Recursos Naturais e Infraestrutura. SBMR 2014- Conferência Especializada ISRM 09-13 Setembro 2014.

RIGOBELLO A. E; BRANQUINHO J. A.; DANTAS M. G. DA S.; OLIVEIRA T. F.; NEVES FILHO W. 1988. Mina de zinco de Vazante. In: Shobbenhaus C & Coelho C. E. S. Principais depósitos minerais do Brasil. DNPM, 3: p.101-110.

ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; REIS NETO, J. M.; FIGUEIRA, E. G. 2002. Análise estrutural da mina de Vazante e Adjacências: Geometria, Cinemática e Implicações para a hidrogeologia. Revista Brasileira de Geociências, 31 (1): 59-68.

ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; REIS NETO, M. dos. 2001. Evolução estrutural da zona da falha de Vazante; exemplo de deformação Tradi-Orogênica na Faixa

Brasília. Simpósio de Estudos Tectônicos, Recife, 2001. Resumos Expandidos. Recife, SBG, p. 229 – 232.

SLEZAK, P. R. 2012 – Geology, Mineralogy and Geochemistry of the Vazante Northern Extension Zinc Silicate Deposit, Minas Gerais, Brazil. Dissertação de Mestrado. Queen's University, Kingston, Canada. 116p.

UHLEIN A., FONSECA M. A., SEER H. J., DARDENNE M. A. 2012. Tectônica da faixa de dobramentos Brasília – Setores Setentrional e Meridional, Brasília, p. 1.

VALENTE, C. R. 1993 – A tectônica Transpressiva Proterozoica da Borda Ocidental do Craton do São Francisco. In II Simpósio do Cráton do São Francisco, Anais, Salvador, p. 292 – 294.

VILCA, Y. C., 2019. Modelagem geoestatística de variável geomecânica estudo de caso [manuscrito]: mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara / MG. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.