

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

RAQUEL RAMOS RODRIGUES

**ANÁLISE ESTRUTURAL DA RAMPA 29 DA MINA VAZANTE: GEOLOGIA
ESTRUTURAL E AS IMPLICAÇÕES PARA LAVRA E DESENVOLVIMENTO**

**MONTE CARMELO
2024**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

RAQUEL RAMOS RODRIGUES

**ANÁLISE ESTRUTURAL DA RAMPA 29 DA MINA VAZANTE: GEOLOGIA
ESTRUTURAL E AS IMPLICAÇÕES PARA LAVRA E DESENVOLVIMENTO**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Geologia pela Universidade Federal
de Uberlândia (UFU), *campus* Monte
Carmelo – MG.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio
Delinardo da Silva
Coorientador (a): Mariana Nunes
Marçal Silva

**MONTE CARMELO
2024**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1H, Sala 1H18A - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4169 - igesc@ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Geologia				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso II - IGUFU32017				
Data:	02/12/2024	Hora de início:	10h00min	Hora de encerramento:	12h00min
Matrícula do Discente:	31811GLG014				
Nome do Discente:	Raquel Ramos Rodrigues				
Título do Trabalho:	ANÁLISE ESTRUTURAL DA RAMPA 29 DA MINA VAZANTE: GEOLOGIA ESTRUTURAL E AS IMPLICAÇÕES PARA LAVRA E DESENVOLVIMENTO				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?		(X) Sim () Não			

Reuniram-se de forma remota pela plataforma MS Teams, a Banca Examinadora, composta pelo Prof. Dr. Marco Antônio Delinardo da Silva (orientador e presidente da banca examinadora), docente da Universidade Federal de Uberlândia, pela Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva, docente da Universidade Federal de Uberlândia e pelo mestrando Fernando Resende Honorato da Universidade Estadual de Campinas e a discente Raquel Ramos Rodrigues.

Iniciando os trabalhos, o presidente da banca examinadora, Prof. Dr. Marco Antônio Delinardo da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público e concedeu a discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente seguiu as normas de trabalho de conclusão do curso de Graduação em Geologia.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores externo e interno, que passaram a arguir a candidata. O tempo de arguição e resposta seguiu as normas de trabalho de conclusão do curso de Graduação em Geologia. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a banca examinadora em sessão secreta, atribuiu o resultado, considerando a candidata:

(X) Aprovado com Nota [83]

() Reprovado com Nota []

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marco Antonio Delinardo da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/12/2024, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabiano Mota da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/12/2024, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Resende Honorato, Usuário Externo**, em 02/12/2024, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5918624** e o código CRC **1F8F803D**.

“Ela acreditava em anjo e,
porque acreditava,
eles existiam.”

Clarice Lispector

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a meus pais, Marina e Josias, por todo o apoio e incentivo. À minha mamadi, um agradecimento especial, por sempre estar ao meu lado, me aconselhando e acolhendo.

Ao meu namorado Leonardo, por todo amor, companheirismo, carinho e amizade.

Às minhas amigas Jéssica, Pam e Susana que estiveram sempre comigo, tanto nos momentos bons, quanto nos ruins.

A todos os amigos do GAPE (Grupo Alto Paranaíba de Espeleologia) e da República QG, que fizeram parte da minha trajetória na geologia e espeleologia, sempre agregando conhecimento e boas histórias.

Aos meus colegas e amigos da geologia, por todas as conversas geológicas, campos e bons momentos vividos juntos, especialmente, meus colegas da sétima turma de geologia.

Ao meu orientador Marco, por toda paciência e auxílio.

À minha co-orientadora Mariana, uma mulher incrível e profissional excepcional! Muito obrigada pela amizade e por toda ajuda durante o desenvolvimento desse trabalho.

À todas as mulheres incríveis que tive a oportunidade de conhecer e conviver durante meu estágio, em especial: Vivi, Tereza, Choco Mari, Duda Teodoro, Mari Dutra, Fernanda, Mayara, Ana Paula, Karine, Hayesca, Duda Oliveira, Ana Clara, Fernanda Raquel, Mirian, Amanda, Carol e Carla.

À toda equipe da geologia de mina, hidrogeologia, planejamento e sondagem, por todo apoio e ensinamentos, especialmente: Camilo, Mari (Marineide), Vivi, Jéssica, Tereza, Edmar, Fernanda, Rond, Heli e Glauber.

Ao meu “padrinho” Kawinã. Sem você esse trabalho não teria sido possível!

A todos os professores e demais funcionários da Geologia-UFU Monte Carmelo, por todo conhecimento repassado e apoio ao longo desses anos. Cada um de vocês exerceu um papel fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

À Nexa Resources, Unidade Vazante, responsável por me proporcionar uma experiência de estágio enriquecedora e por incentivar a execução desse trabalho.

Resumo

Depósitos Hipogênicos de Zinco são formados através de processos metamórficos e/ou hidrotermais. Estes depósitos podem ser estruturalmente controlados ou estratiformes. Dentre os principais depósitos estruturalmente controlados, é possível citar: Vazante (Brasil), Beltana Aroona (Austrália), Kabwe (Zâmbia) e Berg Aukas (Namíbia). O Distrito Zincífero de Vazante é caracterizado como um depósito hipogênico zinco-silicatado, no qual, a willemita é o principal mineral de minério. É composto pelas Minas Vazante e Extremo Norte, que atualmente estão sob concessão da empresa de capital aberto Nexa Resources. A mineralização de Vazante está inserida no contexto geológico do Grupo Vazante e ocorre na forma de veios ao longo de uma zona de falha de direção principal N50E/60NW, denominada Falha Vazante. O Grupo Vazante está inserido na zona externa da Faixa de Dobramentos Brasília, que se trata de um orógeno resultante da colisão entre os paleocontinentes Amazônico, São Francisco-Congo e Paranapanema. Atualmente, na Mina Vazante são utilizados os métodos *Vertical Retreat Mining* (VRM) e *sublevel stoping* (métodos em subníveis) para desenvolvimento e lavra. Esses métodos são aplicados para corpos de minério inclinados e competentes, entretanto, em uma determinada porção da mina Vazante, mais especificamente no sul da rampa 29, as lentes mineralizadas ocorrem subhorizontalizadas. Assim, o presente trabalho visa compreender quais estruturas condicionaram essa mudança na morfologia das lentes e qual a implicação disso para a lavra e desenvolvimento da mina. Para isso, foi realizada uma análise estrutural com foco em algumas travessas da rampa 29, com o intuito de compreender a cinemática e definir a influência do controle estrutural nas lentes mineralizadas vistas na porção sul da rampa 29.

Palavras-chave: Faixa Brasília, Grupo Vazante, Falha Vazante, Análise Estrutural.

Abstract

Hypogenic Zinc Deposits are formed through metamorphic and/or hydrothermal processes. These deposits can be structurally controlled or stratiform. Among the main structurally controlled deposits, notable examples include: Vazante (Brazil), Beltana Aroona (Australia), Kabwe (Zambia), and Berg Aukas (Namibia). The Zinc District of Vazante is characterized as a hypogenic zinc-silicate deposit, where willemite is the main ore mineral. It comprises the Vazante and Extremo Norte mines, which are currently under concession by the publicly traded company Nexa Resources. The mineralization of Vazante is part of the geological context of the Vazante Group and occurs in the form of veins along a fault zone with a main direction of N50E/60NW, known as the Vazante Fault. Currently, in the Vazante Mine, Vertical Retreat Mining (VRM) and sublevel stoping methods are used for development and mining. These methods are applied to inclined and competent ore bodies; however, in a specific portion of the Vazante mine, more precisely in the south of Ramp 29, the mineralized lenses occur subhorizontally. Therefore, this work aims to understand which structures condition this change in the morphology of the lenses and its implications for the mining and development of the mine. For this purpose, a structural analysis was conducted focusing on certain crosscuts of Ramp 29, to understand the kinematics and define the influence of structural control on the mineralized lenses observed in the southern portion of Ramp 29.

Keywords: Brasília Orogen; Vazante Group; Vazante Fault; Structural Analysis.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo.....	14
Figura 2 - Mapa indicando a localização aproximada das regiões Lumiadeira e Sucuri da Mina Vazante. O perfil longitudinal demonstra a área de estudo marcada pelo polígono rosa.....	15
Figura 3 - Técnica de mapeamento “exploded box”. Utilizada para locais complexos, nos quais é necessário ter uma visão do teto, face e paredes.....	17
Figura 4 – Tipos mais comuns de indicadores cinemáticos em zonas de cisalhamento.....	19
Figura 5 - Contexto tectono-estrutural do Brasil Central.....	20
Figura 6 – Unidades Tectônicas da Faixa Brasília.....	22
Figura 7 - Compartimentação da Faixa de Dobramentos Brasília.....	23
Figura 8 - Coluna simplificada do Grupo Vazante com idades e métodos de datação empregados.....	25
Figura 9 - Mapa geológico do Grupo Vazante demonstrando a inflexão do Rio Escuro.....	27
Figura 10 - Coluna litoestratigráfica do Grupo Vazante com o posicionamento dos principais depósitos minerais.....	28
Figura 11 - Principais estudos sobre a Geologia Estrutural do Grupo Vazante.....	30
Figura 12 - Seção esquemática na região de Vazante/MG.....	32
Figura 13 - Seção geológica da Mina Vazante, mostrando a relação espacial entre a rocha hospedeira, minério willemítico e a zona da Falha Vazante.....	34
Figura 14- Mapa geológico do Grupo Vazante e locais de ocorrência de depósitos de Pb-Zn (Distrito de Paracatu) e os depósitos zinco silicatados (Distrito de Vazante).....	35
Figura 15 - Figura esquemática demonstrando a disposição das galerias em relação aos stopes de lavra, a espessura dos pilares de sustentação entre os stopes e as dimensões das GM e GT.....	39
Figura 16 – A) Posicionamento das travessas mapeadas na região da rampa 29. B) Perfil longitudinal da Mina Vazante demonstrando a localização aproximada das rampas 29 e 28.....	40

Figura 17 - A) Dolomito margoso. B) Marga.	41
Figura 18 - A) Brecha ferrocarbonatada fraca. B) Brecha ferrocarbonatada moderada. C) Brecha ferrocarbonatada forte.	42
Figura 19 - A) Porções de brecha willemítica destacada pela linha tracejada. B) zona de brecha hematítica delimitada pela linha tracejada.	43
Figura 20 - A) Falha normal NE de atitude 195/40 marcada pela linha amarela tracejada transpondo a zona de cisalhamento. B) Falha NW de atitude 317/60 marcada pela linha amarela tracejada cortando as estruturas de baixo ângulo.	44
Figura 21 - Perfil geológico da parede direita de uma travessa do nível 305. Mostra a relação entre a rocha hospedeira e a mineralização, com foco em lente mineralizada de baixo ângulo de mergulho presente na região da rampa 29 da Mina Vazante.	45
Figura 22 - Perfil geológico de um trecho de uma travessa no nível 315. Demonstra as relações de sobreposição das principais estruturas identificadas nas paredes da travessa, com foco na lente mineralizada de baixo ângulo presente nessa porção da Mina Vazante.	46
Figura 23 – A) Dobras parasíticas. B) Charneira da dobra.	47
Figura 24 – A) Falha inversa de direção principal SE-NW que acompanha a zona de cisalhamento, marcada pela linha amarela tracejada. B) Fraturas de extensão associadas a zona de cisalhamento.	48
Figura 25 - A) Pares S-C indicando vergência para SE. B) Indicador cinemático do tipo delta.	48
Figura 26 - A) Galeria de minério do nível 185. O croqui ao lado demonstra as falhas NW que delimitam a lente willemítica. B) Galeria de minério do nível 255. O croqui ao lado demonstra a lente mineralizada sub-vertical claramente associada a zona de cisalhamento anastomosada.	49
Figura 27 - Lineação do tipo crista/vale (Lc).	50
Figura 28 - Zona de cisalhamento anastomosada subvertical cortando o acamamento sedimentar preservado.	51
Figura 29 - A) Falha normal NE de baixo ângulo. B) Falha normal N43E/62NW.	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Breve Histórico e Localização da área de estudo	13
1.2 Objetivos	15
2 MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1 Revisão bibliográfica	16
2.2 Mapeamento Geológico-Estrutural de galeria	16
2.3 Análise Estrutural	18
2.3.1 Análise Geométrica	18
2.3.2 Análise Cinemática	18
3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	20
3.1 Faixa Brasília	21
3.2 Grupo Vazante	24
3.2.1 Litoestratigrafia	28
3.2.2 Geologia Estrutural	30
3.2.2.1 Falha Vazante	31
4 MINA VAZANTE	33
4.2 Mineralização	34
4.3 Métodos de lavra utilizados na Mina Vazante	37
5 RESULTADOS	39
5.1 Rocha Hospedeira.....	40
5.2 Modo de ocorrência da alteração hidrotermal e mineralização	43
5.3 Controle Estrutural da Mineralização Willemítica da Mina Vazante na Rampa 29	44
5.3.1 Lentes de Minério Subhorizontais.....	44
5.3.2 Lentes de Minério Subverticais.....	49

5.3.3 Estruturas Tardias Pós-Mineralização	51
6 DISCUSSÃO	52
7 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A Faixa Vazante-Paracatu trata-se de um dos mais importantes distritos zincíferos do Brasil, abrangendo os municípios de Vazante, Paracatu e Lagamar, no noroeste de Minas Gerais (CPRM, 2015). Esse distrito hospeda depósitos de zinco silicatado (Mina Vazante e Extremo Norte) e sulfetado (Mina de Morro Agudo e os depósitos de Ambrósia e Fagundes) de classe mundial (MONTEIRO, 2002).

O depósito de Vazante é o maior depósito de zinco silicatado de origem hipógena do mundo, no qual o mineral de minério primário é a willemita (ZnSiO_4) (CPRM, 2015). Até a década de 90 acreditava-se que a origem do minério willemítico era supérgena, entretanto, a partir dos trabalhos de Monteiro (1997) e Monteiro et al. (1999 e 2007) comprovou-se a origem hidrotermal, concomitante ao desenvolvimento da Falha de Vazante (LEMOS, 2011).

Esse tipo de depósito possui forte controle estrutural, de forma que, a mineralização ocorre ao longo de zonas de falha (BONI, 2003 apud BAIA, 2013). Devido a isso, a caracterização estrutural é de extrema importância para compreender as implicações para as diversas áreas que atuam na mineração, conferindo maior previsibilidade e assertividade para o desenvolvimento da mina e lavra (ROSTIROLLA et al., 2002; BHERING, 2009; BAIA, 2013). Em Vazante/MG, a mineralização está inserida no contexto geológico do Grupo Vazante, e ocorre próximo ao contato entre os Membros Morro do Pinheiro Superior e Pamplona Inferior (MONTEIRO, 2002), ao longo da zona da Falha de Vazante que possui direção principal N40-50E e mergulhos que variam entre 50° e 70° para NW (ROSTIROLLA et al., 2002; BAIA, 2013; OLIVO et al., 2018).

Devido as condições geológico-estruturais presentes na mina, os métodos utilizados para lavra e desenvolvimento são o *sublevel stoping* e *Vertical Retreat Mining* (VRM), que geralmente são aplicados para corpos de minério inclinados e competentes (HARTMAN e MUTMANSKY 2002; CURI, 2017). Entretanto, em uma região específica da Mina Vazante, denominada rampa 29, as lentes de minério não seguem o *trend* estrutural principal conhecido na mina, apresentado baixo ângulo de mergulho e consequentemente, morfologia sub-horizontal. Isso faz com que os métodos *sublevel stoping* e VRM (*Vertical Retreat Mining*) percam sua eficiência e eficácia.

Dessa forma, o presente trabalho visa compreender o que pode ter conduzido essa mudança de padrão conhecido da mineralização, utilizando a análise estrutural (geométrica e cinemática) das estruturas presentes em algumas travessas (TR) e galerias de minério (GM) da Mina Vazante. A partir disso, foi possível compreender melhor quais as implicações e os impactos dessa mudança de morfologia das lentes mineralizadas para essa porção da mina.

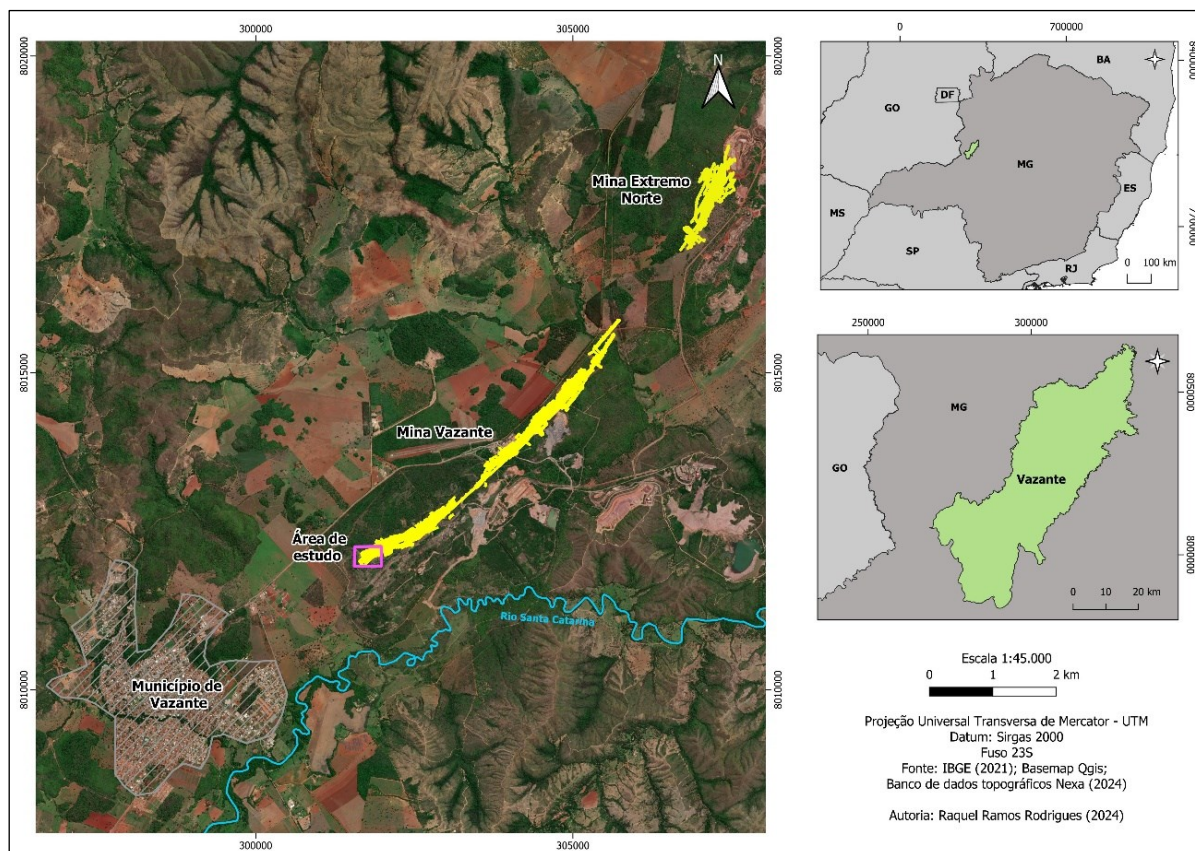
1.1 Breve Histórico e Localização da área de estudo

Em Vazante-MG, a ocorrência de Zn foi feita pela primeira vez em meados de 1930, através do trabalho pioneiro de Ângelo C. Solis (VIDAL, 2022). Esse trabalho foi responsável por reconhecer a presença de afloramentos ricos em Zn supérgeno, com a presença de calamina, derivada da alteração supergênica de fluidos meteóricos e de fluidos hidrotermais a partir da willemita (BHERING, 2009).

Posteriormente, em 1956, a Companhia Mineira de Metais (CMM) foi fundada. Em 1961 começaram a ser realizadas pesquisas de maior detalhe, viabilizando o início das atividades mineiras a céu aberto em 1969 e a lavra subterrânea em 1980, que obteve produção expressiva apenas em 1993 (BHERING, 2009; LEMOS, 2011). Concomitante ao início das pesquisas de maior detalhe, o antigo depósito de zinco da Mineração Areiense S/A (MASA), localizado a noroeste da Mina Vazante, começou a ser explorado pelo Grupo Ingá, que se manteve ativo até 1997. A partir daí, o Grupo declarou falência e a massa falida foi leiloadada em 2007 pelo Banco de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais (LEMOS, 2011).

A posse do depósito supracitado foi destinada a Votorantim Metais, antiga CMM, que foi renomeada em 2005 devido a uma reorganização societária. Assim, em 2008 a MASA passa a se chamar Extremo Norte decorrente de sua localização em relação a Mina Vazante (BHERING, 2009; LEMOS, 2011). Atualmente, a posse da Mina Vazante e da Mina Extremo Norte (Figura 1), pertencem a Nexa Resources S/A, que surgiu em 2017 através da fusão entre a Votorantim Metais e a empresa peruana Milpo (NEXA, 2024).

Figura 1 - Localização da área de estudo.

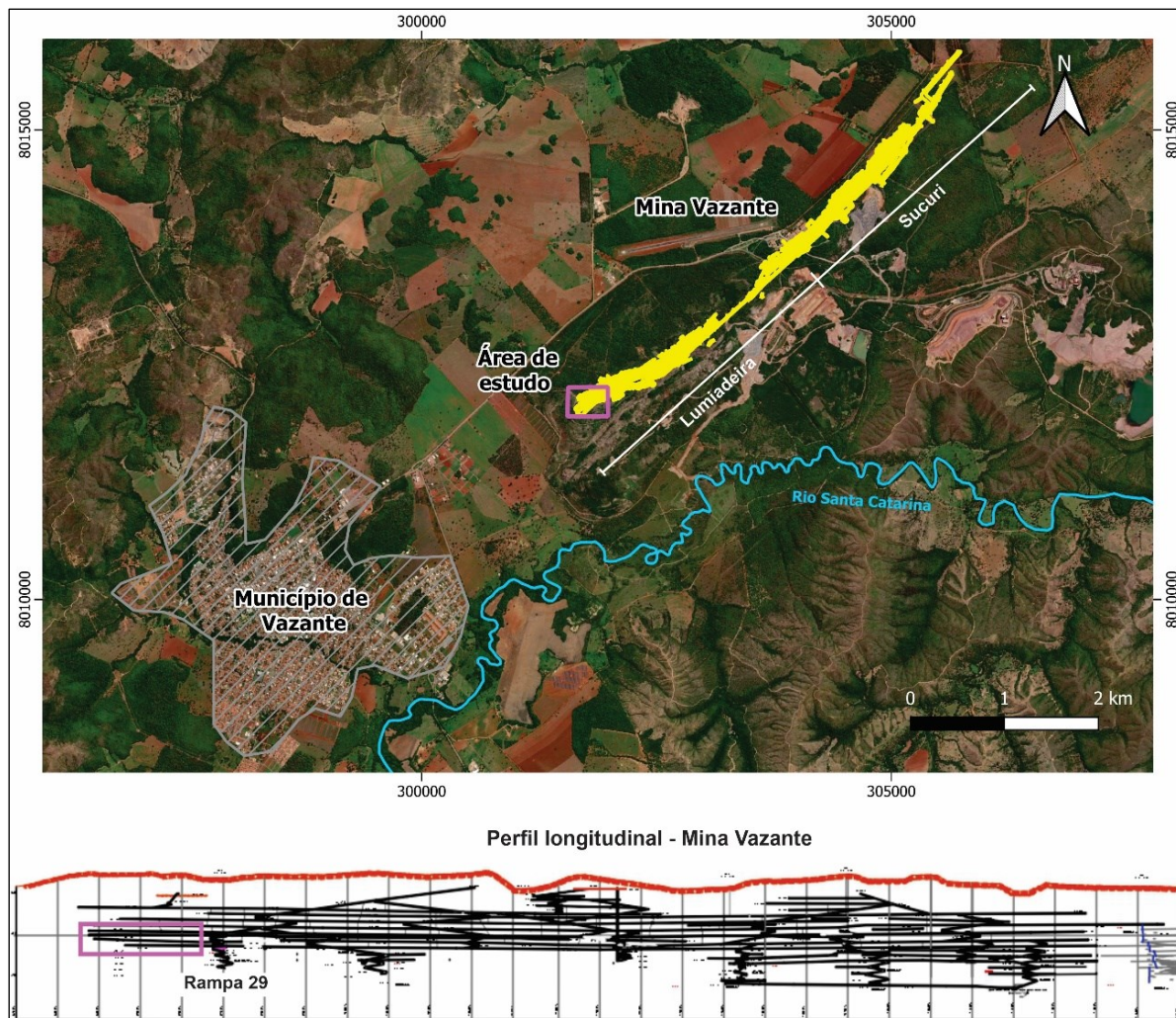


Fonte: a autora (2024).

A Mina Vazante, representa o maior e mais importante depósito de zinco não-sulfetado do Brasil e um dos principais do mundo (LEMOS, 2011; BAIA 2013). A Mina Vazante é dividida em duas regiões principais: Lumiadeira e Sucuri (Figura 2), sendo que, atualmente o desenvolvimento da mina se concentra principalmente na porção mais ao sul da Lumiadeira.

A região da Lumiadeira é composta pelas rampas 7, 25, 28 e 29. A rampa 7 trata-se da rampa de acesso a superfície, já as demais dão acesso aos níveis da mina onde está sendo realizada a lavra e desenvolvimento. Ao todo, existem cerca de 25 níveis na Mina Vazante, entretanto, para o presente trabalho foi feito o mapeamento e coleta de dados estruturais de algumas travessas (TR) e galerias de minério (GM) localizadas na porção mais ao sul da rampa 29 (Figura 2), nos níveis 305 e 315. Também foram coletados alguns dados em locais onde a lente apresenta-se subverticalizada, nos níveis 185 e 255 da rampa 28.

Figura 2 - Mapa indicando a localização aproximada das regiões Lumiadeira e Sucuri da Mina Vazante. O perfil longitudinal demonstra a área de estudo marcada pelo polígono rosa.



Fonte: Nexa (2023).

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar o controle e a evolução estrutural da mineralização presente na porção sul da rampa 29 da Mina Vazante. Assim, tem como objetivo específico definir a influência do controle estrutural da mineralização no sul da rampa 29 para desenvolvimento e lavra na Mina Vazante.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Revisão bibliográfica

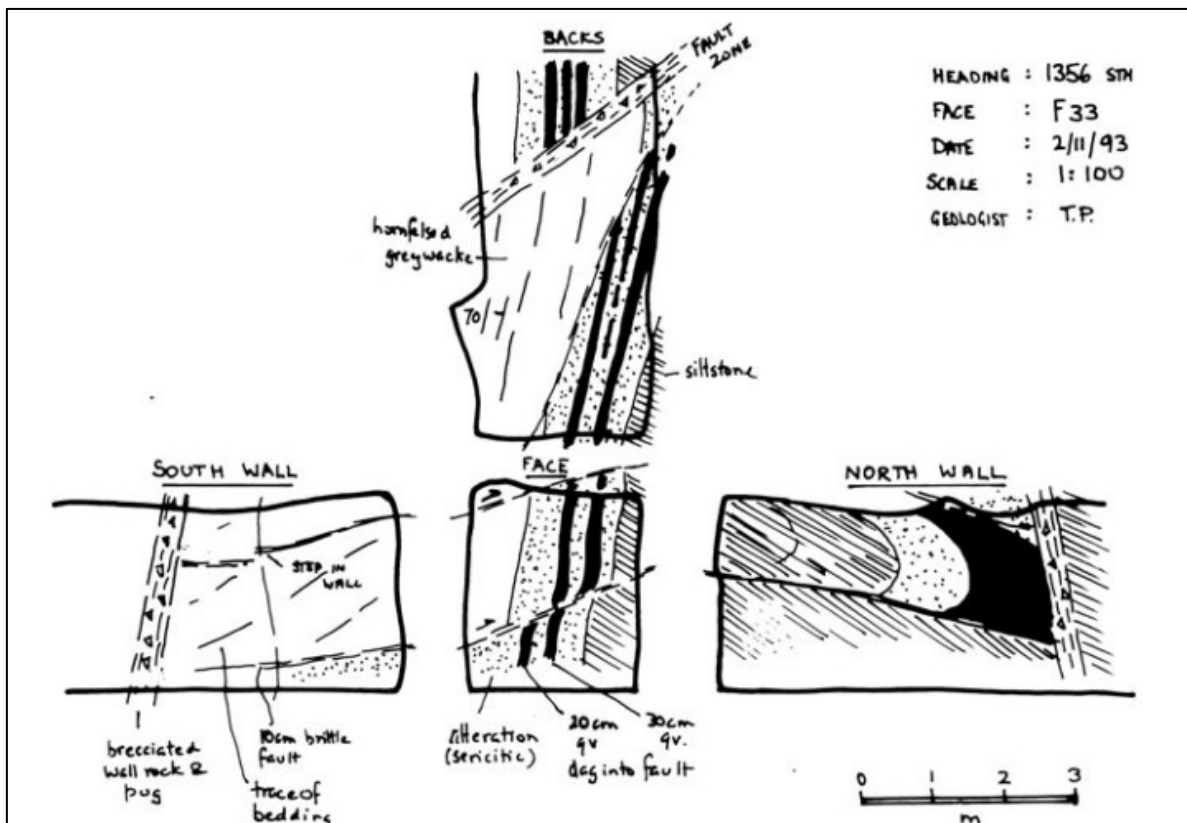
A revisão bibliográfica tem foco na compreensão do contexto geológico estrutural do Grupo Vazante, nos métodos adequados a caracterização do controle e evolução estrutural de mineralizações em depósitos semelhantes aos que ocorrem na Mina Vazante e no entendimento dos métodos de lavra em depósitos estruturalmente controlados. Esta etapa foi realizada pela análise de teses, dissertações, artigos de periódicos indexados, entre outras fontes bibliográficas. Também foram consultados arquivos pertencentes a empresa Nexa Resources.

2.2 Mapeamento Geológico-Estrutural de galeria

O mapeamento geológico-estrutural foi baseado no livro “Geological Methods in Mineral Exploration and Mining”. Assim, de acordo com Marjoribanks (2010) o mapeamento geológico em minas subterrâneas é feito em planta ou em seção, em uma escala de detalhe que geralmente é de 1:100 ou 1:10. Existem algumas técnicas de mapeamento que podem ser utilizadas, dependendo da finalidade e do nível de detalhe necessário (MARJORIBANKS, 2010).

Para mapeamentos extremamente detalhados que exigem uma visão completa da galeria, englobando paredes, teto e face é utilizado o método *exploded box* (Figura 3). Esse método consiste basicamente no mapeamento de todas as superfícies expostas, de modo que, os mapas de cada superfície (paredes, teto e face) são exibidos no mesmo plano. Entretanto, geralmente, esse nível de detalhe é desnecessário e o geólogo poderá optar por mapear apenas uma ou algumas das superfícies disponíveis (MARJORIBANKS, 2010).

Figura 3 - Técnica de mapeamento “*exploded box*”. Utilizada para locais complexos, nos quais é necessário ter uma visão do teto, face e paredes.



Fonte: Marjoribanks (2010).

De acordo com Marjoribanks (2010) para unidades que ocorrem ao longo do *strike* dominante, a face de avanço fornece uma visão de seção transversal mais efetiva. A Mina Vazante é semelhante ao exemplo citado, de forma que, na maioria das vezes, a face fornece a melhor visualização das estruturas.

Assim, para o presente trabalho, o mapeamento foi feito em seção e a escolha das superfícies a serem representadas objetivou a melhor visualização das principais estruturas e suas relações de corte. Foram feitos croquis em duas travessas (TR) dos níveis 305 e 315, assim como, em duas galerias de minério (GM) dos níveis 185 e 255. Para as travessas o mapeamento foi feito utilizando as paredes e para as galerias de minério, face e paredes.

Vale destacar que, devido ao fato de a mina ser um local dinâmico que sofre alterações significativas em um curto período, ocorreram alguns contratempos que impediram o mapeamento completo de toda extensão das travessas dos níveis 305 e 315, como por exemplo: poluição por particulado de poeira decorrente do transporte

de minério, poluição por gases provenientes do processo de desmonte, presença de equipamentos na área, dentre outros. Dessa forma, o mapeamento foi feito em uma determinada porção das travessas, nos locais onde havia estruturas mais representativas.

2.3 Análise Estrutural

A análise estrutural, conduzida juntamente com o mapeamento geológico-estrutural de galeria nos níveis 185, 255, 305 e 315, foi baseada nos conceitos, procedimentos e metodologias propostas por Turner & Weiss (1968); Passchier & Trouw (2005); Lin et al. (2007) e Fossen (2017).

2.3.1 Análise Geométrica

A análise geométrica considera forma, orientação geográfica, tamanho e relações geométricas entre as estruturas principais e secundárias (FOSSEN, 2017). É puramente geométrica, ou seja, desconsidera as condições de movimento que surgem da interação entre os corpos. Entretanto, os dados obtidos através dessa descrição, podem ser interpretados de forma cinemática ou dinâmica (TURNER & WEISS, 1968).

Para o presente trabalho, a descrição geométrica foi feita com base na proposta metodológica de Turner & Weiss (1968), que consiste basicamente:

- 1) Na descrição das estruturas presentes (dobras, falhas, lineações, fraturas);
- 2) Na coleta de dados estruturais (direção e ângulo de mergulho);
- 3) Na classificação das formas geométricas e;
- 4) Nas relações de corte das estruturas presentes.

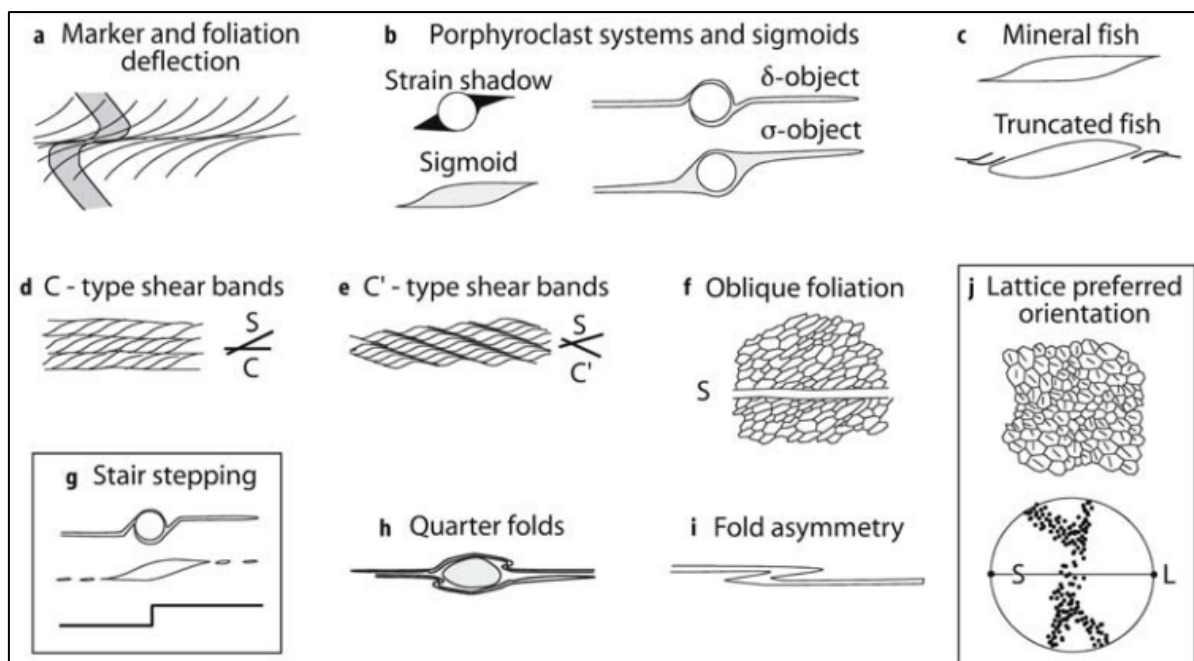
2.3.2 Análise Cinemática

A análise cinemática consiste na descrição dos movimentos (translação, distorção, rotação e dilatação) associados a deformação, podendo ser observados em estruturas de degraus presentes nas superfícies de falhas e através de indicadores cinemáticos (e.g., sigmoides) (FOSSEN, 2017).

De acordo com Fernandes et al. (1991), a análise cinemática busca compreender as condições de fluxo plástico e rúptil das rochas por meio da análise de estruturas, ou seja, através dos padrões de distribuição, orientação de lineações (estiramento, mineral) e análise dos indicadores cinemáticos presentes (Figura 4).

Dessa forma, o presente trabalho baseou-se na metodologia de Passchier & Trouw (2005) para a análise cinemática em zonas de cisalhamento, que pode ser descrita em etapas que incluem: observação e descrição das microestruturas (verificação da presença de porfiroclastos, pares S-C, fish e boudins); análise da geometria e orientação dos indicadores cinemáticos, visando a identificação das orientações preferenciais e análise da simetria (indicar se o movimento é dextral ou sinistral); determinação do sentido do cisalhamento com base em critérios de superposição e na consistência entre os indicadores; classificação dos indicadores cinemáticos em primários, secundários e indiretos).

Figura 4 – Tipos mais comuns de indicadores cinemáticos em zonas de cisalhamento.

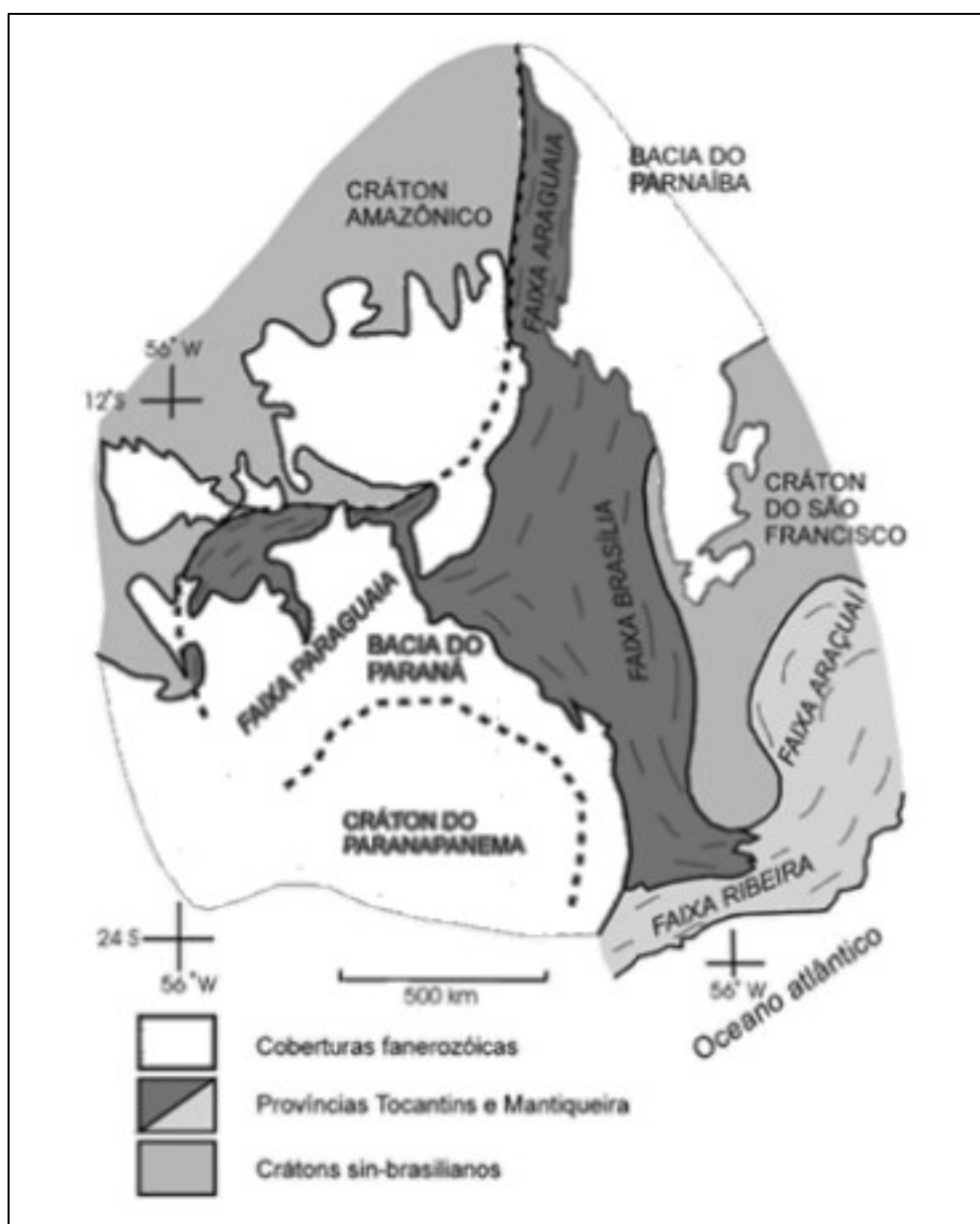


Fonte: Passchier & Trouw (2005).

3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Tocantins (Figura 5), localizada no Brasil central, corresponde a um sistema orogênico Neoproterozoico desenvolvido a partir da aglutinação entre os crátons São Francisco, Amazônico e Paranapanema durante o Ciclo Brasileiro (UHLEIN, 2012; PIMENTEL, 2016). A convergência resultou na formação de três faixas móveis de evolução diacrônica, denominadas de Faixas Paraguai, Araguaia e Brasília (ALMEIDA et al., 1977 apud LEMOS, 2011; ALMEIDA et al., 1981).

Figura 5 - Contexto tectono-estrutural do Brasil Central.



Fonte: Valeriano et al. (2004).

Essas faixas bordejam áreas cratônicas, sendo que, as Faixas Paraguai e Araguaia limitam o Cráton Amazônico, a leste e a Faixa Brasília o Cráton do São Francisco, a oeste (VALERIANO et al., 2004; LEMOS, 2011). A área de estudo do presente trabalho está inserida no contexto da Faixa Brasília.

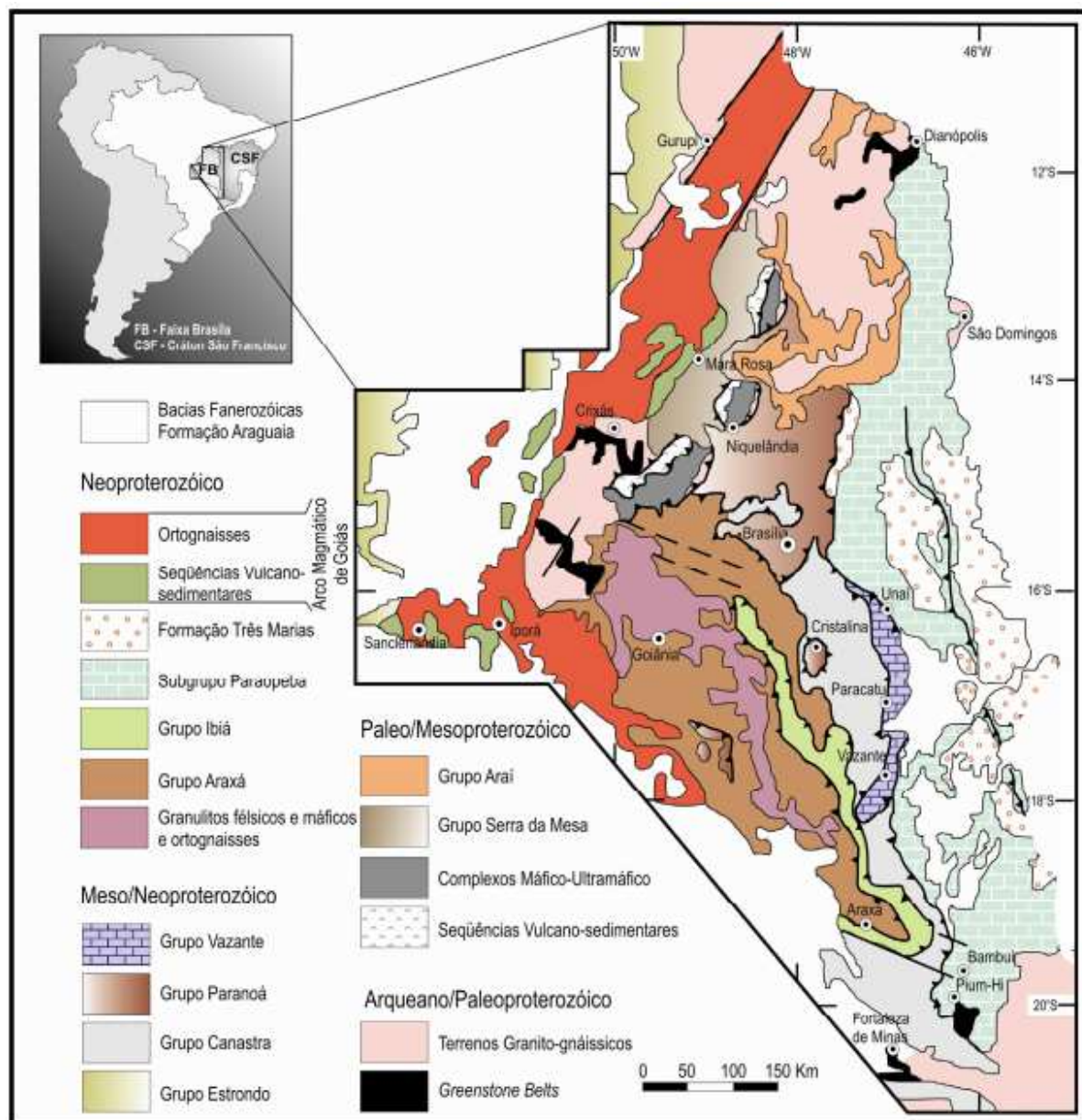
3.1 Faixa Brasília

Localizada no Brasil Central, a Faixa de Dobramentos Brasília (FDB) (Figura 6) trata-se de um orógeno Neoproterozoico (ALMEIDA, 1977; DARDENNE, 2000). A Faixa Brasília possui direção N-S, 300 km de largura e se estende por mais de 1200 km ao, abrangendo desde o sul de Minas Gerais até o norte de Tocantins (FUCK, 1994; DARDENNE, 2000; UHLEIN et al., 2012).

A Faixa Brasília pode ser subdividida nos setores Setentrional e Meridional, com base em diferenças estratigráficas, estruturais, tectônicas e geocronológicas (UHLEIN et al., 2012). O Setor Setentrional, de direção NE-SW (LEMOS, 2011), é composto principalmente por extensas áreas de embasamento retrabalhado e por coberturas paleoproterozoicas (UHLEIN et al., 2012). De acordo com Uhlein et al. (2012), há a presença de empurrões e falhas reversas com vergência para o Cráton do São Francisco, além de falhas e zonas de cisalhamento transcorrentes que aumentam em direção ao lineamento Transbrasiliano. Esse setor engloba os grupos Araí, Paranoá, Maciço de Goiás e Arco Magmático de Goiás (DARDENNE, 2000; UHLEIN et al., 2012; VALERIANO et al., 2004).

O Setor Meridional possui estrutura N-S, que inflete para WNW no centro-sul de Goiás (UHLEIN et al., 2012). O Setor Meridional é mais antigo, com deformação e metamorfismo entre 650-580 Ma (UHLEIN et al., 2012). Estruturalmente, esse setor é marcado pelo empilhamento de extensas *nappes* e cavalgamentos sub-horizontais com vergência para o Cráton São Francisco, sendo que o gradiente metamórfico diminui em direção ao cráton (LEMOS, 2011; UHLEIN et al., 2012). É composto pelos grupos Canastra, Vazante, Ibiá, Araxá e Andrelândia (UHLEIN et al. 2012; VIDAL, 2022).

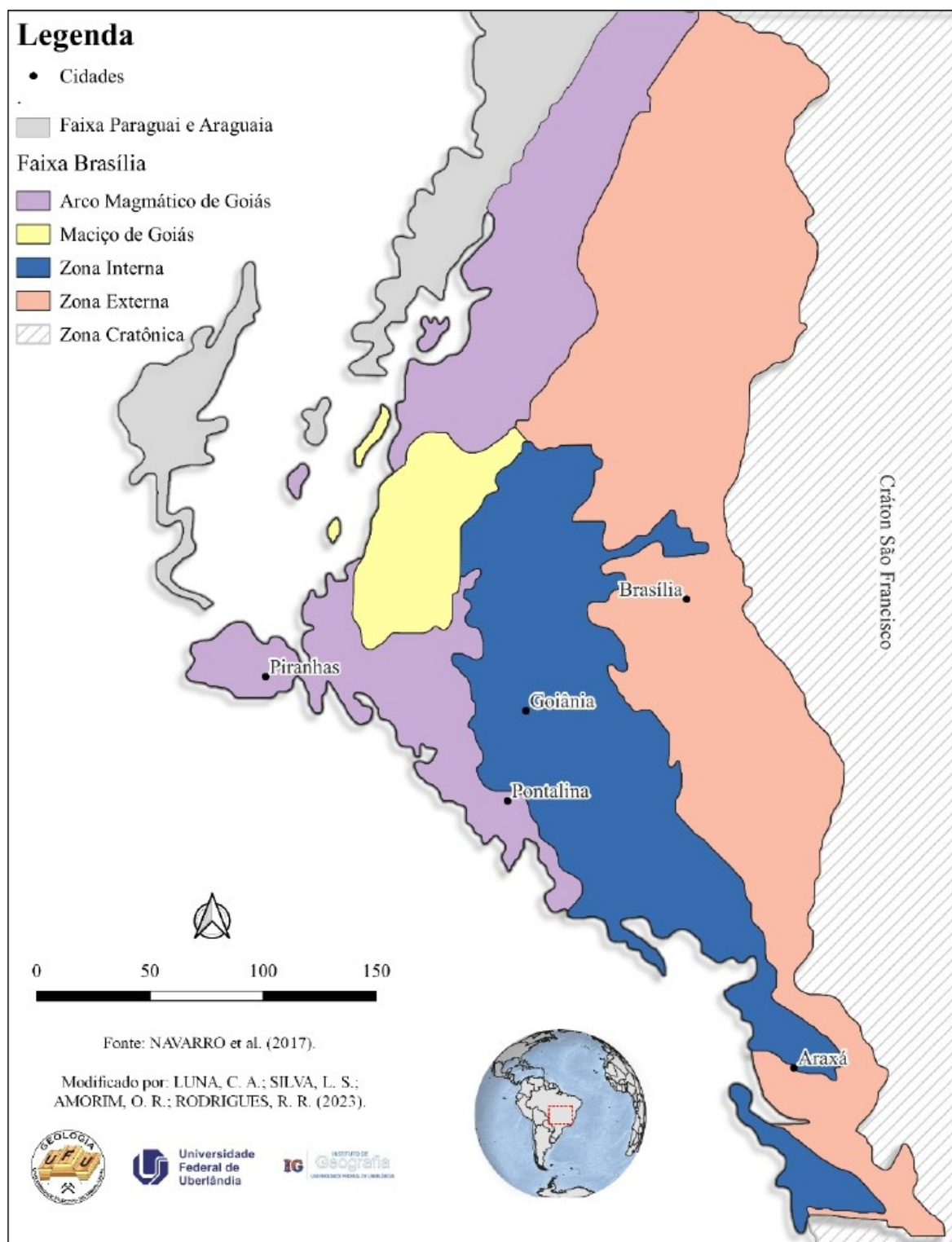
Figura 6 – Unidades Tectônicas da Faixa Brasília.



Fonte: Dardenne (2000) modificado por Rodrigues (2008).

De acordo com Fuck (1994) e Uhlein et al. (2012) a Faixa Brasília é compartimentada de oeste para leste (Figura 7) em: Arco Magmático de Goiás; Maciço de Goiás; Zona Interna; Zona Externa e Unidade estrutural do Cráton do São Francisco.

Figura 7 - Compartimentação da Faixa de Dobramentos Brasília.



Fonte: Modificado de Navarro et al. (2017) por LUNA; SILVA; AMORIM & RODRIGUES (2023).

O Arco Magmático de Goiás, trata-se de um arco acrecionário e representa um dos principais episódios de acreção crustal juvenil do Gondwana, composto por sequências supracrustais (rochas metavulcânicas cálcio-alcálicas, micaxistos, quartzitos e margas) e rochas plutônicas cálcio-alcálicas deformadas e Zona Externa, composta por unidades metassedimentares Mesoproterozoicas metamorfizadas (gabros, granitos e tonalitos) (FUCK, 1994; PIMENTEL, 2016). O Maciço de Goiás, representa a acreção de terrenos arqueanos-paleoproterozoicos constituído por greenstones belts, complexos TTG, rochas metavulcano-sedimentares e metavulcano-ultramáficas (CORDEIRO & OLIVEIRA, 2017).

Zona Interna, trata-se de um sistema de *nappes* composto por sucessões metassedimentares do Grupo Araxá metamorfizadas em fácies xisto verde superior a anfibolito superior e granulito, além de porções remobilizadas do embasamento. Além disso, na Zona Interna ocorrem rochas do Complexo Anápolis-Itaçu e Sequências metavulcano-sedimentares (VALERIANO et al., 2008). Já a Zona Externa, de plataforma proximal e rifte, representada pelos grupos Canastra, Ibiá, Paranoá, Natividade e Araí, além de porções do embasamento arqueano-paleoproterozoico (RODRIGUES, 2008; UHLEIN et al., 2012). Por fim, a Unidade Estrutural do Cráton do São Francisco é representada pelos Grupos Bambuí e Vazante que recobrem o embasamento arqueano-paleoproterozoico do Cráton (UHLEIN et al., 2012).

3.2 Grupo Vazante

O Grupo Vazante (DARDENNE & FREITAS-SILVA, 1998; DARDENNE, 2000; SOTERO et al., 2019) compõe o Distrito Zincífero de Vazante, o maior e mais importante distrito zincífero do país. O Grupo Vazante trata-se de uma unidade metassedimentar pelítico-carbonática que se estende por aproximadamente 250 km ao longo de uma faixa N-S (DARDENNE, 1979 apud ROSTIROLLA et al., 2002; MONTEIRO et al., 2006; RODRIGUES, 2008). Na porção leste, o Grupo Vazante é delimitado pelas sequências cratônicas do Grupo Bambuí e a oeste pelo sistema de falhas de cavalgamento do Grupo Canastra (ALVARENGA et al., 2019).

De acordo com Marini et al. (1984) o Grupo Vazante é composto por filitos, ardósias, quartzitos, metassiltitos, raros calcários e abundantes dolomitos de origem algal (MARINI et al., 1984). Alguns estudos correlacionam o Grupo Vazante com os

Grupos Paranoá e Canastra, devido a presença de um paleoalto estrutural e de estromatólitos do tipo *Conophyton* sp. (MOERI, 1972; CLOUD & DARDENNE, 1973; CAMPOS NETO, 1984a; DARDENNE, 1978; FUCK et al., 1993). Assim, os autores que seguem essa correlação (e.g ALMEIDA, 1993; FUCK, 1994) enquadram o grupo em um ambiente de margem continental passiva com condições de subsidência. Entretanto, há estudos que sugerem que o Grupo Vazante foi formado em um ambiente de bacia de antepaís, de forma análoga ao Grupo Bambuí (DARDENNE, 2000).

Diversos trabalhos já foram feitos com o intuito de determinar a idade do Grupo Vazante, entretanto, ainda é um tema dúbio na literatura (Figura 8). Dados geocronológicos provenientes de zircões detríticos demonstram um padrão de proveniência muito diverso, com idades que variam de 936 a 3409 Ma (RODRIGUES et al., 2012; OLIVEIRA, 2024).

Figura 8 - Coluna simplificada do Grupo Vazante com idades e métodos de datação empregados.

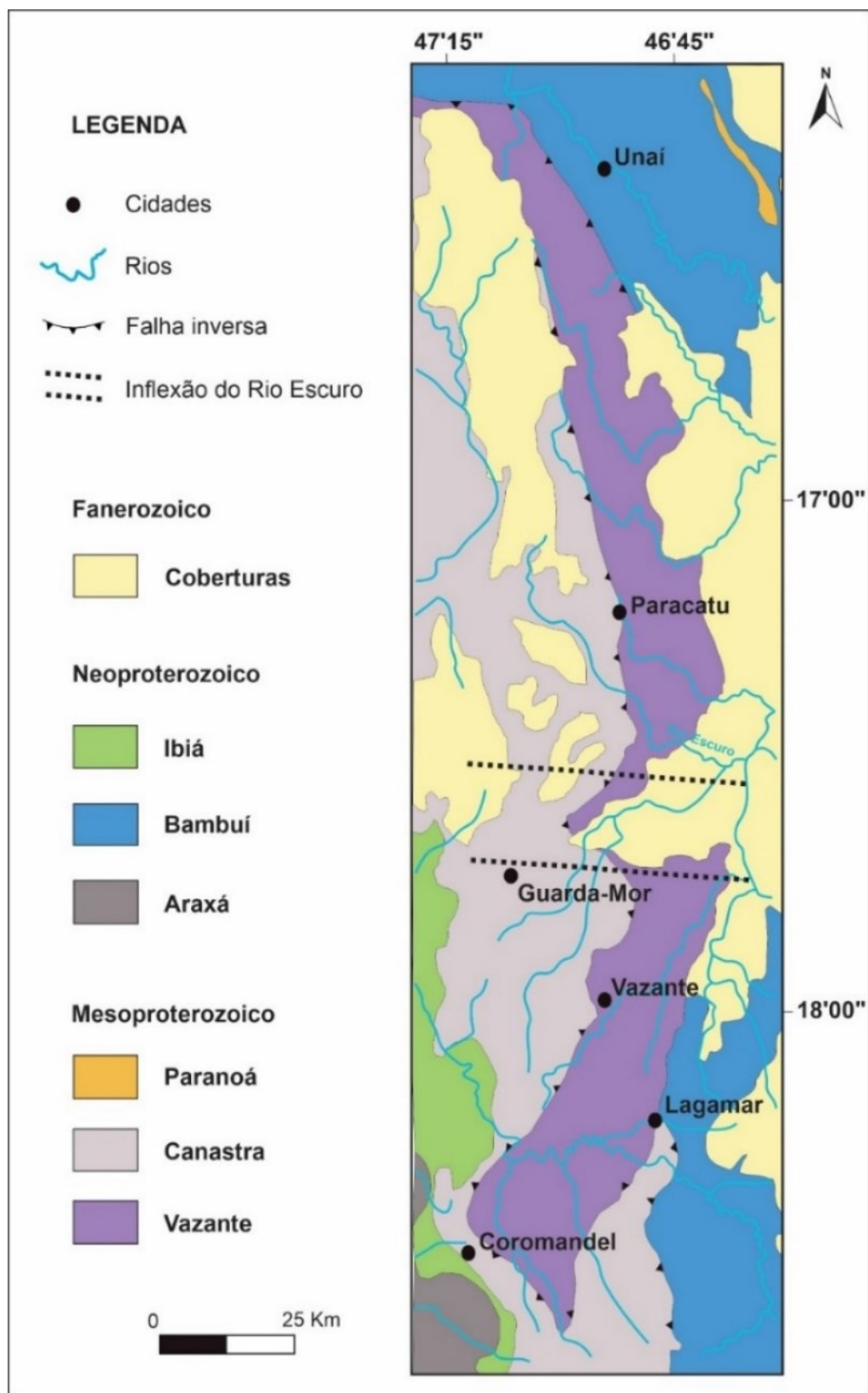
AUTOR	MÉTODO	IDADE	GRUPO VAZANTE	FORMAÇÃO
Azmy et al. (2008)	U/Pb	1.1 - 1.0 Ga		LAPA
Rodrigues et al. (2012), Pimentel et al. (2001)	U/Pb	1.2 Ga		MORRO DO CALCÁRIO
Carvalho et al. (2019)	Sm-Nd	2.0 - 1.7 Ga		
Carvalho et al. (2019)	Sm-Nd	1.8 Ga		
Rodrigues et al. (2012), Carvalho et al. (2019)	U/Pb	1.2 Ga		SERRA DO POÇO VERDE
Carvalho et al. (2019)	Sm-Nd	2,06 Ga		
Pimentel et al. (2001)	Sm-Nd	2.1 Ga		
Pimentel et al. (2001)	Sm-Nd	2.1 - 1.8 Ga		
Carvalho et al. (2019)	Sm/Nd	2 Ga		SERRA DO GARROTE
Rodrigues et al. (2012), Pimentel et al. (2001)	U/pb	2.13 - 2.08 Ga		
Geboy et al. (2013)	Re/Os	2.23 - 2.05 Ga		
Carvalho et al. (2019)	Sm/Nd	1.35 - 0.99 Ga		
Dardenne (2005); Dardenne et al. (2005); Cloud & Dardenne (1973)	Conophyton Cylindricum (Fóssil Index)	1.35 - 0.9 Ga		LAGAMAR
Pimentel et al. (2001)	Sm/Nd	2,10 Ga		
Rodrigues et al. (2012)	U/Pb	1.9 Ga		
Rodrigues et al. (2012)	U/Pb	2.08 Ga		
Rodrigues et al. (2012), Pimentel et al. (2001)	U/pb	2.5 - 0.94 Ga		ROCINHA
Pimentel et al. (2001)	Sm/Nd	2.02 - 1.87 Ga		
Rodrigues et al. (2012)	U/Pb	~ 997 Ma		
Rodrigues et al. (2012)	U/Pb	~ 997 Ma		

Fonte: Oliveira (2024).

Apesar de o ambiente de sedimentação e posicionamento estratigráfico não serem bem definidos (RODRIGUES, 2008; VIDAL, 2023), a idade de deposição da sequência superior do Grupo Vazante, onde concentra as mineralizações de zinco, varia de 1300 a 1100 Ma (DARDENNE, 2000; DARDENNE e FREITAS-SILVA, 1998; RODRIGUES, 2008; MISI et al., 2014; RODRIGUES et al., 2012). De acordo com Sotero et al. (2019), o Grupo Vazante pode ser dividido em dois domínios, Sul e Norte, marcados pela inflexão do Rio Escuro (Figura 9).

O domínio Sul apresenta mineralização zinco silicatada e estruturas NE-SW, já o domínio Norte possui mineralização zinco sulfetada e estruturas NNW-SSW (CPRM, 2015). A mineralização zinco silicatada presente na Mina Vazante é relacionada a rochas pelítico-carbonáticas, e ocorre ao longo de uma zona de falha de direção predominante N40-50E e mergulhos que variam de 50° a 70° (ROSTIROLLA et al., 2002; LEMOS, 2011).

Figura 9 - Mapa geológico do Grupo Vazante demonstrando a inflexão do Rio Escuro.



Fonte: Modificado de Rodrigues (2008).

3.2.1 Litoestratigrafia

A estratigrafia do Grupo Vazante (Figura 10) é composta por sete formações, sendo elas, da base para o topo: Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Lapa (DARDENNE, 2000; RODRIGUES, 2008). A mineralização de vazante ocorre próximo ao contato das Formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário, nos membros Pamplona Inferior e Pamplona Superior, respectivamente (MONTEIRO, 2002; RODRIGUES, 2008; LEMOS, 2011).

Figura 10 - Coluna litoestratigráfica do Grupo Vazante com o posicionamento dos principais depósitos minerais.

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

Fonte: Dardenne (2000), extraído de Neves (2011).

A Formação Santo Antônio do Bonito, unidade basal do Grupo Vazante, consiste na intercalação de quartzitos, conglomerados, diamictitos e ardósias (DARDENNE, 2000; BAIA, 2013; ALVARENGA et al., 2019). Nas imediações dos Rios Santo Antônio do Bonito e Santo Inácio estão presentes horizontes de diamictitos de matriz pelítica, localmente fosfatados (BAIA, 2013).

A Formação Rocinha é composta por uma sucessão rítmica entre arenitos e pelitos, que apresenta contato gradacional em relação à porção inferior da Formação Santo Antônio do Bonito (RODRIGUES, 2008). Seu topo é limitado por uma falha reversa, responsável por separar a Formação Rocinha das Formações Lagamar e Serra do Garrote (ALVARENGA et al., 2019). Nos quartzitos e metassiltitos presentes na porção superior se encontra o depósito de fosfato de Lagamar em fosfarenitos (BAIA, 2013).

A Formação Lagamar trata-se de uma unidade carbonática psamo-pelítica. Sua porção basal é composta pela alternância de metaconglomerados, quartzitos, metassiltitos e ardósias (RODRIGUES, 2008). Sobreposta a essas, ocorrem brechas dolomíticas intraformacionais, que gradam para camadas de calcários cinza-escuro bem estratificados com intercalações de brechas lamelares (RODRIGUES, 2008). No topo ocorrem biohermas estromatolíticas de *Conophyton* e *Jacutophyton* (BAIA, 2013; ALVARENGA et al., 2019).

A Formação Serra do Garrote é composta por um pacote espesso de metapelitos cinza escuros a cinza esverdeados, podendo ser rítmicos, carbonosos e piritosos com pequenas intercalações de quartzito (RODRIGUES, 2008; ALVARENGA et al., 2019). Já a Formação Serra do Poço Verde apresenta dolomitos laminados cinza a rosados, ardósias, sericita filito, dolomitos cinzas com estruturas do tipo *bird eyes*, margas e filitos carbonosos com pirita (RODRIGUES, 2008). É subdividida, da base para o topo, nos membros Morro do Pinheiro Inferior, Morro do Pinheiro Superior, Pamplona Inferior e Pamplona Intermediário. O Membro Pamplona Inferior, contém a mineralização de Zn de Vazante, e é composto por filitos carbonosos e ardósias carbonosas com níveis dolomíticos finos (DARDENNE, 2000; BAIA, 2013).

Na Formação Morro do Calcário ocorrem dolomitos estromatolíticos de coloração rosada (RODRIGUES, 2008). Na região de Morro Agudo, Paracatu e Unaí, possui uma espessura considerável, indicando que provavelmente as Formações Morro do Calcário e Serra do Poço Verde representam uma única sequência

dolomítica contínua (DARDENNE, 2000). Vale ressaltar que é justamente nessas formações que estão hospedados os depósitos de zinco de Morro Agudo e Vazante, respectivamente (BAIA, 2013).

Por fim, a Formação Lapa, topo do Grupo Vazante, é composta por filitos carbonosos, metassiltitos carbonáticos, lentes de dolomito e níveis de quartzito (BAIA, 2013). O contato dessa unidade com a Formação Morro do Calcário é marcado por uma pequena zona de cisalhamento, sugerindo um contato tectônico (CARVALHO et al., 2017; ALVARENGA et al., 2019).

3.2.2 Geologia Estrutural

Devido à complexidade estrutural do Grupo Vazante diversos trabalhos já foram realizados (LADEIRA et al., 1963; AMARAL, 1969; DARDENNE, 1974; CAMPOS NETO, 1984b; FREITAS-SILVA & DARDENNE, 1992b; ALMEIDA, 1993; PINHO, 1990; ROSTIROLLA et al., 2002) sendo que, os principais trabalhos (Figura 11) estabelecem entre quatro e sete fase deformacionais (BAIA, 2013).

Figura 11 - Principais estudos sobre a Geologia Estrutural do Grupo Vazante.

GEOLOGIA ESTRUTURAL - GRUPO VAZANTE										
Ladeira et al. (1963) e Amaral (1969)	Dardenne (1974)	Campos Neto (1984b)		Freitas-Silva & Dardenne (1992b)		Almeida (1993)	Pinho (1990)	Rostirolla et al., 2002		
Região de Vazante	Grupo Vazante	Faixa Paracatu-Vazante		Região de Paracatu		Grupo Vazante	Região de Vazante	Região de Vazante		
		Fase	Principais Características	Fase	Principais Características		Fase	Principais Características		
Mencionaram uma estruturação geral, com a mineralização orientada segundo N40-50E, e a ocorrência de zonas de empurrão e/ou cavalgamentos mais antigos e fraturas NW mais recentes, responsáveis pela morfologia atual das várias pequenas serras presentes na região	Grupo Vazante: Esforço tectônico de Oeste para Leste. Pelitos evidenciam um dobramento intenso que pode chegar a dobras isoclinais e os dolomitos comportam-se como blocos resistentes aos esforços, formando pequenas dobras suaves com eixos de direção tanto leste-oeste, como norte-sul	D1 e D2	Representadas por dobras com eixo para sudoeste	F1	Geradora de uma clivagem de fluxo S1, paralela ao acamamento sedimentar	Foi afetado pelo sistema de nappes resultantes da compressão que sucedeu a extensão formadora das bacias e que teve reflexo no desenvolvimento das áreas pancratônicas	D1	Caráter extensivo reativando antigas zonas de fraqueza do embasamento, com movimentação diferencial dos blocos, gerando altos paleogeográficos;	D1 e D2	Deformação progressiva em regime dúctil, tendo sido responsáveis pela formação do arcoabouço regional, com a geração de dobramentos holomórficos em larga escala e superfícies de foliação penetrativas, associadas a uma tectônica convergente com formação de empurrões e dobramentos, que apresentam vergência para E-SE.
		D3	Cavalgamentos paralelos às estruturas	F2	Principal fase de deformação marcada pela clivagem de fluxo F2 que corresponde à foliação regional, gerada com uma foliação do tipo SC.					
		D4	Dobras com eixo para NW	F3	Dobras em chevron e a falhas transcorrentes		D2	Fase compressiva tangencial gerando reativações com movimentação transcorrente	D3	Principal fase de mineralização de Zinco da Mina de Vazante, gerando um sistema de falhas direcionais sinistrais com direção predominante NE, dobramentos homoclinais descontínuos e basculamentos, em regime dúctil-rúptil
		D5	Dobras com eixos para NE	F4 e F5	São associadas, respectivamente, a kinks e ondulações suaves com incipiente clivagem espaçada		D3	fase de encurtamento tectônico marcado por falhamentos de empurrão	D4	Sistema distensional NE rúptil, durante o qual a mineralização de zinco foi parcialmente remobilizada
		D6	Dobras com eixo leste-oeste	F6	Representada por fraturas de cisalhamento e híbridas e falhamentos normais		D4	fase de caráter extensivo, com alívio da compressão anterior e acomodação dos blocos	D5	Gerou um reticulado de falhas distensionais EW e NW, que controlam, em grande parte, o fluxo hidrológico nos aquíferos cársticos formados em decorrência da dissolução da sequência carbonática. As relações observadas indicam claramente uma evolução em dois ciclos tectônicos
		D7	Falhas transversais							

Fonte: Baia (2013).

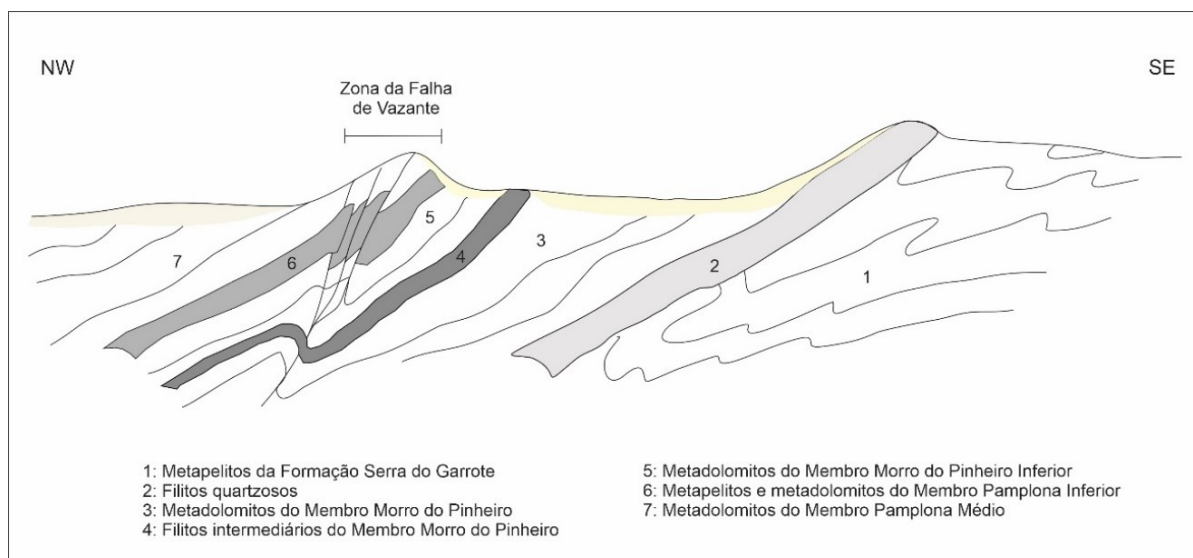
A estruturação tectônica do Grupo Vazante está relacionada a esforços extensivos E/W, de forma que, as diferentes unidades que compõe o grupo têm uma resposta distinta em relação ao esforço, devido a sua reologia (DARDENNE, 1974). De acordo com Sotero et al. (2019), a porção meridional do Grupo Vazante é delimitada por zonas de cisalhamento transcorrentes regionais com orientação N-S. Além disso, são comuns falhas de empurrão orientadas na direção N-NE, associadas à compressão ocorrida após o rifteamento do Cráton do São Francisco. Essas falhas, possivelmente reativadas durante o Brasiliano, culminaram na formação de zonas de cisalhamento transcorrentes sinistrais, dobras assimétricas com vergência para leste e falhas normais tardias (VIDAL, 2022).

As fases deformacionais descritas por Rostirolla et al. (2002) podem ser relacionadas a tectônica de *nappes* da Faixa Brasília no Neoproterozóico (DARDENNE, 2000). Inicialmente houve variação de convergente para direcional sinistral ligada a uma tectônica de escape e posteriormente distensional. A última fase deformacional correspondente ao fraturamento generalizado e marca o registro parcial de um segundo ciclo (NW-EW) transversal ao primeiro ciclo (NE), possivelmente oriundo da deformação mesozoica da plataforma Sul-Americana (BAIA, 2013).

3.2.2.1 Falha Vazante

A Falha Vazante (Figura 12) estende-se por aproximadamente 12 km e possui atitude principal N50E/70NW. Pinho (1990) apud Rostirolla (2002) definiu quatro fases de deformação da Falha de Vazante, sendo elas: i) de caráter extensivo, na qual zonas de fraqueza do embasamento foram reativadas; ii) de caráter compressional tangencial, culminando em reativação com componentes de transcorrência; iii) de encurtamento tectônico, caracterizada pela presença de empurrões e iv) de caráter extensivo gerando alívio da compressão e acomodação dos blocos.

Figura 12 - Seção esquemática na região de Vazante/MG.



Fonte: Adaptado de Rostirolla (2002).

Já Freitas-Silva & Dardenne (1992b) apud Rostirolla (2002) propuseram uma evolução tectônica a partir de um único evento orogenético, identificando seis fases, *F1* a *F6*, de forma que: *F1* foi responsável pela geração da clivagem *S1* paralela ao acamamento sedimentar; *F2* é caracterizada principalmente pela clivagem de fluxo correspondente a foliação regional do tipo S-C, e trata-se da principal fase de deformação; *F3* corresponde a formação das dobras em *Chevron* e falhas transcorrentes; *F4* e *F5* são marcadas pela presença de *kink bands* e ondulações suaves com clivagem espaçada incipiente e *F6* é reconhecida pela presença de fraturas de cisalhamento e falhas normais.

Além disso, eventos epirogenéticos posteriores denominados Eventos de Deformação Secundária (Paleozóico até o Quaternário) também atuaram na região, e teriam corroborado para o controle tectônico da mineralização hidrotermal. Assim, esse controle tectônico estaria relacionado ao preenchimento por fluidos conatos na estrutura principal, classificada como uma falha normal lístrica (DARDENNE & FREITAS-SILVA, 1998; 2000 apud ROSTIROLLA, 2002).

Em suma, a Falha Vazante é entendida como sin-sedimentar, sendo que, durante a fase compressional do Evento Brasileiro é uma falha oblíqua, apresentado tanto uma componente de transcorrência, quanto movimento reverso (LEMOS, 2011). Posteriormente, durante o colapso gravitacional passa a ser uma falha normal lístrica (DARDENNE, 1979; MONTEIRO, 2002; PINHO, 1990 apud LEMOS, 2011). É

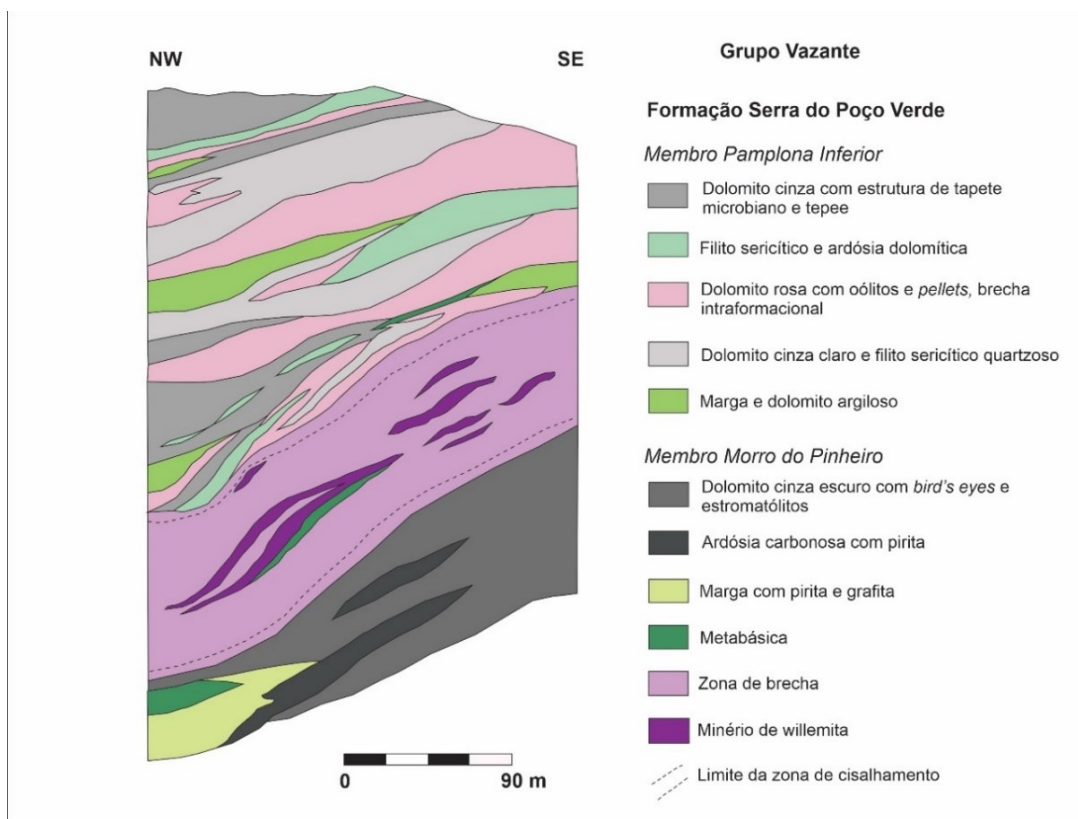
caracterizada por zonas irregulares e complexas, com geometria anastomosada resultante da interseção entre planos de foliação C e fraturas por cisalhamento (MONTEIRO et al., 2006).

4 MINA VAZANTE

A Mina Vazante está inserida no contexto do Grupo Vazante, nos metadolomitos, ardósias e filitos da Formação Serra do Poço Verde, que hospeda a mineralização zinco silicatada (LEMOS, 2011; CARVALHO et al., 2017). A estruturação tectônica se dá principalmente pela presença da Falha de Vazante, bem como, por zonas de empurrão e/ou cavalgamentos e por fraturas NW (ROSTIROLLA et al., 2002).

A mineralização é marcada por uma zona de brecha hidrotermal associada a Falha Vazante que ocorre próximo ao contato do Membro Morro do Pinheiro Superior (*footwall*) com o Membro Pamplona Inferior (*hanging wall*) (MONTEIRO et al., 2006) (Figura 13). O Membro Morro do Pinheiro é caracterizado de forma geral, por metadolomitos cinza e xistos carbonosos contendo pirita e marga, já o Membro Pamplona Inferior é composto por ardósia e sericita filito intercalado com metadolomito cinza claro a rosa (MONTEIRO et al., 1999).

Figura 13 - Seção geológica da Mina Vazante, mostrando a relação espacial entre a rocha hospedeira, minério willemítico e a zona da Falha Vazante.

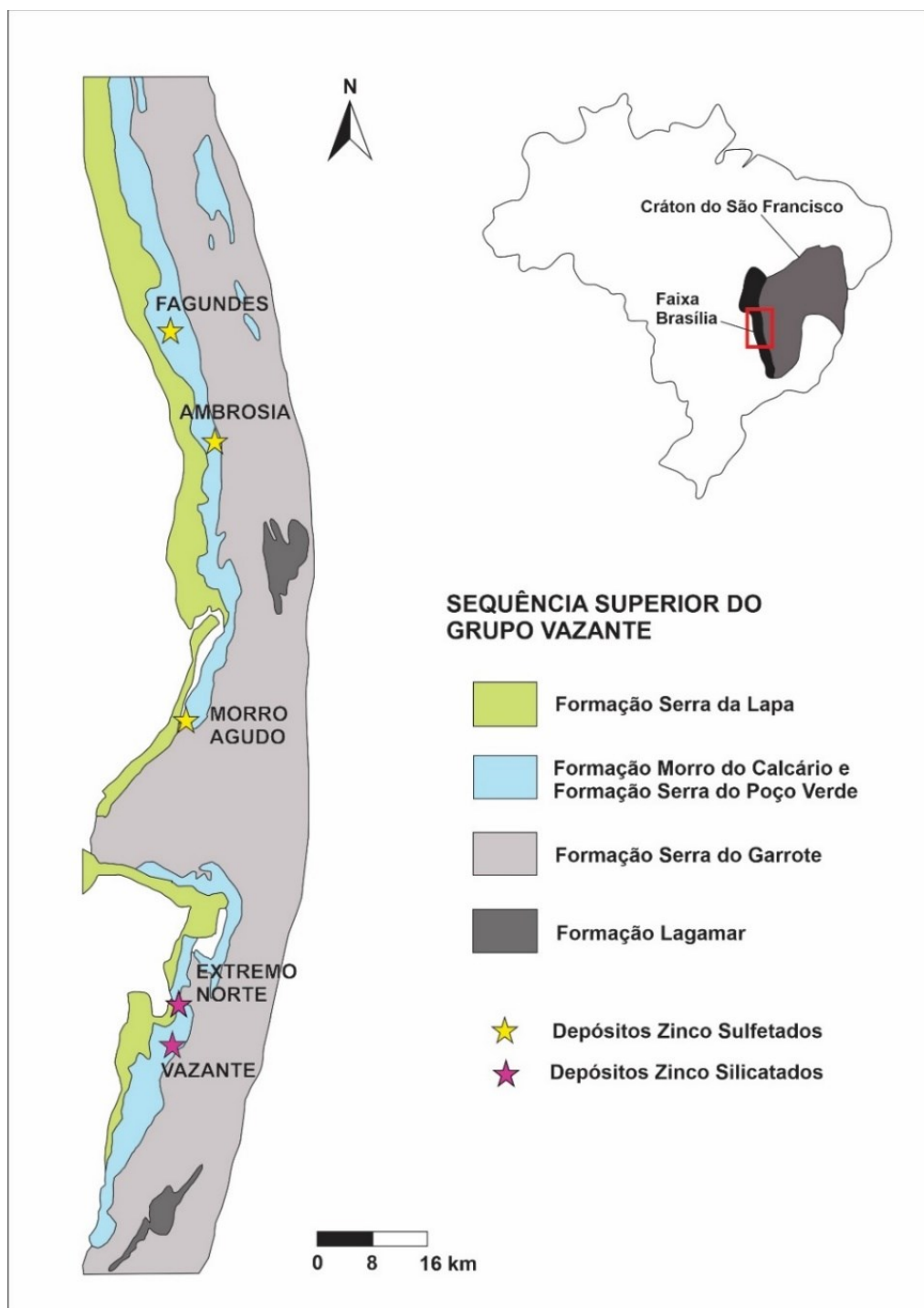


Fonte: Modificado de Monteiro et al. (2006).

4.2 Mineralização

A mineralização de Vazante pode ser dividida em dois domínios (Figura 14), sendo eles: Norte (mineralização zinco-sulfetada) e Sul (mineralização zinco-silicatada) (CPRM, 2015; SOTERO et al., 2019). O domínio Norte, zinco sulfetado, é representado pelas minas de Fagundes, Ambrosia e Morro Agudo. Já o domínio Sul, zinco silicatado, é composto pelas minas Vazante e Extremo Norte.

Figura 14- Mapa geológico do Grupo Vazante e locais de ocorrência de depósitos de Pb-Zn (Distrito de Paracatu) e os depósitos zinco silicatados (Distrito de Vazante).



Fonte: Adaptado de Olivo et al. (2018).

A mineralização hipogênica possui forte controle estrutural, associada a reativação da Falha Vazante, mais especificamente, ao final da fase compressional

da evolução da Faixa Brasília (BAIA, 2013), que foi responsável por condicionar a percolação do fluido hidrotermal mineralizante (CPRM, 2015).

A mineralização pode ser dividida em primária e secundária (MONTEIRO, 2002; BAIA, 2013). A mineralização primária é a principal do depósito, caracterizada por bolsões podiformes de willemita, hematita, siderita e dolomita com franklinita, zincita, magnetita, clorita, barita, smithsonita e apatita subordinados, que ocorrem imbricados em relação a corpos menores de sulfeto hospedados em metadolomitos brechados (MONTEIRO, 2002; MONTEIRO et al., 2006; BAIA, 2016). Já a secundária trata-se do minério calamínico, constituído por hemimorfita, hidrozinco, smithsonita e piromorfita (AMARAL, 1968a, 1968b apud MONTEIRO, 2002; BAIA, 2013), podendo atingir profundidades de até 50 metros e está associada a zonas de brecha de colapso controladas por falhas NE (BAIA, 2013).

Baia (2013) afirma que a alteração hidrotermal é marcada por “intensa sideritização, hematização, dolomitização, cloritização, silicificação e forte brechificação”. De acordo com Monteiro (2002), a alteração hidrotermal pode ser dividida em 3 fases, sendo elas:

- a) alteração hidrotermal pré-mineralização willemítica, relacionada a processos de silicificação pervasiva, substituição por dolomita baroque e ankerita e a alteração fissural. Essas alterações são restritas a zona de Falha de Vazante e culminaram para a formação de uma zona de brechas através da injeção de cimentos químicos;
- b) alteração hidrotermal sin-mineralização willemítica, caracterizada por intensa alteração fissural acompanhando a mineralização willemítica e a formação de brechas;
- c) alteração hidrotermal pós-mineralização willemítica, na qual há substituição das rochas mineralizadas por hematita, dolomita e, subordinadamente, clorita. Ocorre concentração de hematita e clorita principalmente nos planos de falha e na foliação milonítica. Já a dolomita está presente como matriz em brechas cataclásticas.

Monteiro (2002), propõe um modelo baseado na mistura de fluidos metalíferos quentes, derivados da própria bacia e do embasamento com alta razão fO_2/fS_2 , com fluidos meteóricos canalizados em zona de cisalhamento (BAIA, 2013). Essa mistura seria responsável pela intensa alteração hidrotermal fissural, caracterizada pela

formação de veios e brechas preenchidas por siderita, dolomita, hematita e jaspe, além da formação da mineralização de willemítica (MONTEIRO, 2002).

4.3 Métodos de lavra utilizados na Mina Vazante

O método de lavra trata-se de um dos principais e mais importantes elementos a serem considerados durante a análise econômica de uma mina. Assim, é determinante no quesito de viabilidade econômica, pois a escolha equivocada do método de lavra acomete negativamente a viabilidade da mina (BATISTA, 2019). Dessa forma, a seleção do método de lavra leva em consideração, principalmente, a geometria do corpo (inclinação e espessura), classificando os depósitos em: maciços, camadas com corpos tabulares, lenticulares e veios. Além disso, as características de resistência e estabilidade do maciço, facilidade no processo de fragmentação da rocha, produção máxima e a lavra rápida também possuem grande influência (GERMANY, 2002; CURI, 2017).

De acordo com Germany (2002) os métodos de lavra podem ser divididos em três grupos, quais sejam: auto-portantes, com suporte das encaixantes e com abatimento. Os métodos com realces auto-portantes necessitam que o minério tenha alta continuidade e homogeneidade, sendo que, os mais utilizados no Brasil são câmaras e pilares e o método de sub níveis. Em relação aos métodos com suporte das encaixantes os mais comuns são o recalque (*shrinkage*) e corte e aterro (*cut and fill*), nos quais o suporte pode ser feito com o próprio minério ou com material externo. Já dentre os métodos com abatimento é possível citar abatimento em subníveis (*sublevel caving*), abatimento por blocos (*block caving*) e *longwall* (GERMANY, 2002).

Atualmente, na Mina Vazante, os métodos utilizados para lavra são VRM (*Vertical Retreat Mining*) e Método por subníveis (*Sublevel stoping*).

- **Método por subníveis (*sublevel stoping*)**

O método de lavra por subníveis (*sublevel stoping*), geralmente é aplicado em corpos de minério inclinados (entre 50 e 90°) e competentes. O corpo de minério é dividido em níveis, de forma que, entre cada par de níveis adjacentes são feitas aberturas protegidas por pilares estruturais. Dentre os tipos de pilares, vale destacar:

os pilares de teto (*crown pillar*), os pilares de base (*sill pillar*) e os pilares laterais ou verticais (*rib pillar*) (HATMAN, 2002; CURI, 2017).

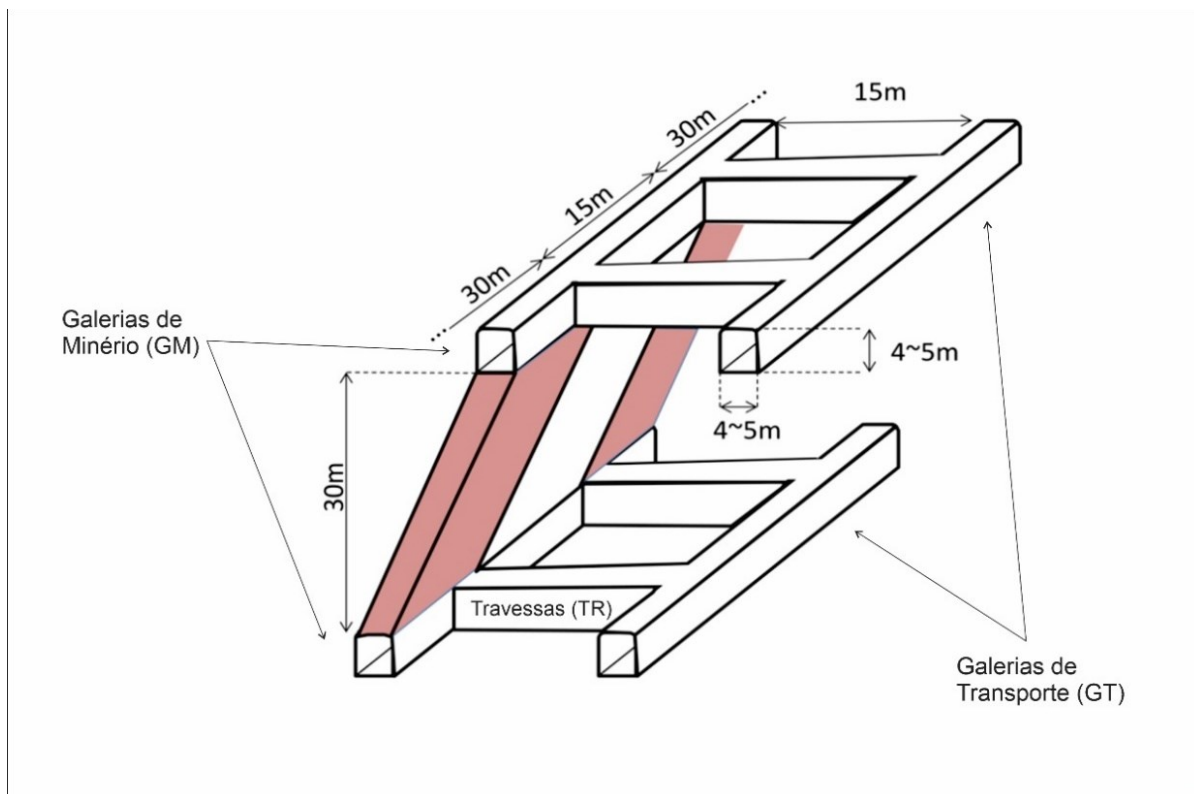
Para obtenção do minério utiliza-se um método de perfuração longa, sendo que, após a detonação o minério escoia através do realce. Geralmente, há subníveis e um nível, de forma que os subníveis são para perfuração e desmonte, e o nível para transporte (HATMAN, 2002).

- **VRM (*Vertical Retreat Mining*)**

O método VRM, assim como o *sublevel stoping*, (Figura 15) é aplicado para corpos de minérios inclinados (alto mergulho) (GRITTI, 2014). Esse método tem ganhado destaque nos últimos anos, pois faz com que a recuperação de lavra seja melhor, devido a possibilidade de lavra de pilares, que geralmente, seriam abandonados sistematicamente, com o intuito de conferir estabilidade regional para mina (FILHO, 2012).

Nesse método é feita a abertura de galerias na base e topo do corpo de minério, de forma que, após a detonação o minério é retirado através da galeria de base utilizando galerias e travessas auxiliares que são feitas paralelamente ao corpo de minério. Depois da detonação do realce, os locais escavados são preenchidos para que seja feita a lavra do realce superior (FIGUEIREDO, 2016).

Figura 15 - Figura esquemática demonstrando a disposição das galerias em relação aos stopes de lavra, a espessura dos pilares de sustentação entre os stopes e as dimensões das GM e GT.

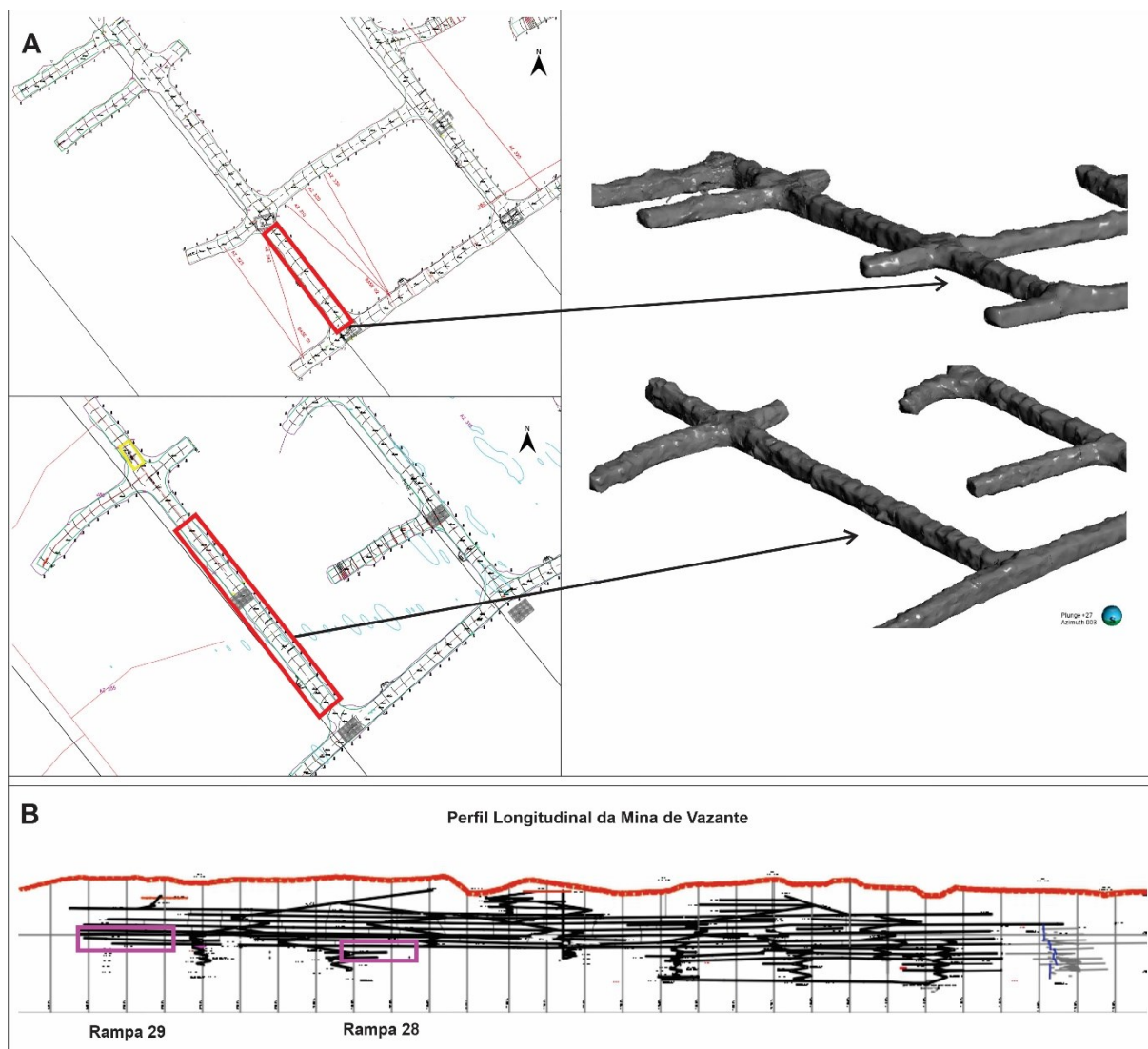


Fonte: Figueiredo (2016).

5 RESULTADOS

Durante o mapeamento geológico-estrutural de galeria foi possível identificar dolomitos margosos, margas e brechas dolomíticas, que ocorrem de forma adjacente a mineralização willemítica em uma zona brechada. O mapeamento geológico-estrutural teve foco em duas travessas dos níveis 305 e 315 (Figura 16-A), localizadas na rampa 29. Entretanto, também foi realizado em duas galerias de minério, localizadas nos níveis 185 e 255, fora do contexto da rampa 29 (Figura 16-B), com o intuito de obter uma visão da “morfologia padrão” das lentes willemíticas.

Figura 16 – A) Posicionamento das travessas mapeadas na região da rampa 29. B) Perfil longitudinal da Mina Vazante demonstrando a localização aproximada das rampas 29 e 28.



Fonte: a autora (2024).

5.1 Rocha Hospedeira

As rochas que hospedam a mineralização de Vazante compreendem rochas pelito-carbonáticas dos Membros Pamplona Inferior e Morro do Pinheiro Superior. Na área de estudo ocorrem dolomitos róseos com intercalação de margas. Especialmente os dolomitos sofreram intensa brechação, sendo que, a mineralização concentra-se justamente nessa porção, denominada brecha dolomítica ferrocarbonatada.

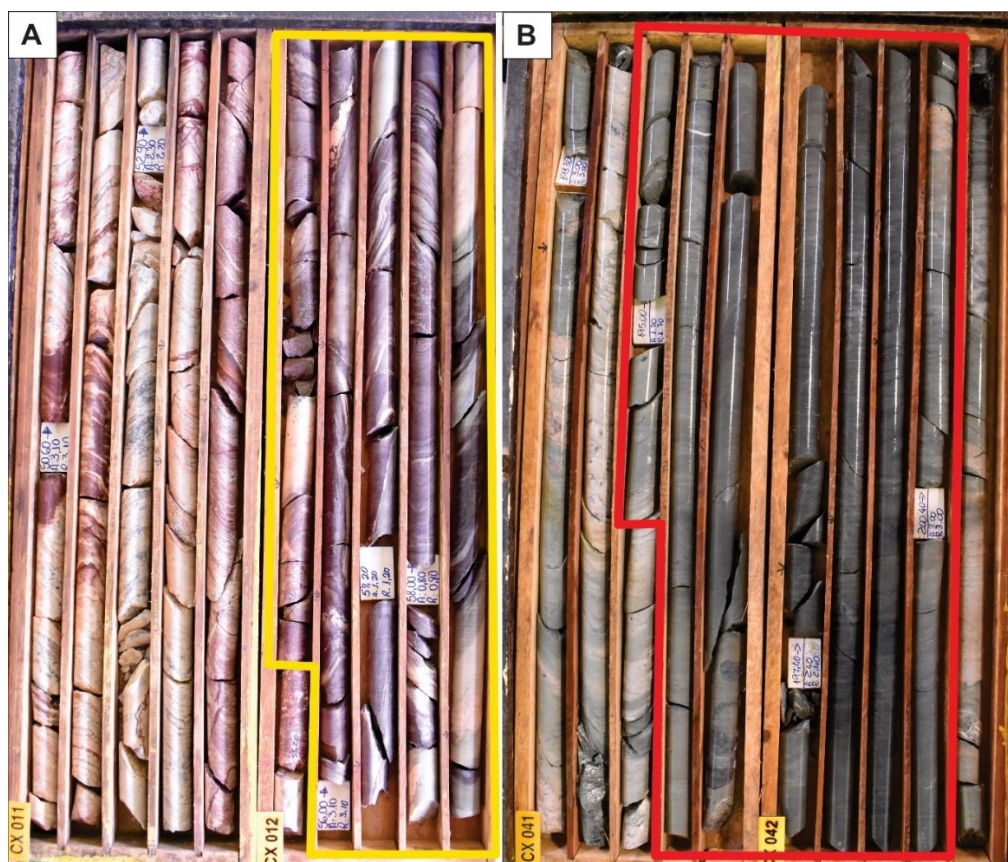
Os dolomitos róseos com intercalação de marga (Figura 17-A) possuem coloração cinza a rosa claro, laminação centimétrica a decimétrica com intercalação de marga roxa e verde. Eventualmente pode apresentar porções de dolomito maciço

cinza claro a branco e rosa. A mineralogia observada a olho nu é composta principalmente por micas, em especial por clorita. Nota-se também que os minerais micáceos possuem uma certa orientação preferencial que marca a foliação milonítica bem desenvolvida, sendo mais evidente próximo a zona de brecha.

O acamamento sedimentar (S0), foi identificado em dolomitos numa determinada porção da galeria de minério do nível 255, possui orientação principal N70W com mergulho que varia de 20° a 40° para SW. Apresenta estrutura laminada, com variação de cor entre cinza e cinza claro.

A marga (Figura 17-B) apresenta coloração verde, em algumas porções a laminação é bem-marcada pela intercalação entre marga verde clara e escura. Na área mapeada, este litotipo ocorre principalmente próximo a zona intensamente brechada, inserida na zona de cisalhamento. Neste contexto, a rocha desenvolve foliação milonítica contínua e granulação muito fina, impossibilitando a identificação de minerais a olho nu.

Figura 17 - A) Dolomito margoso. B) Marga.



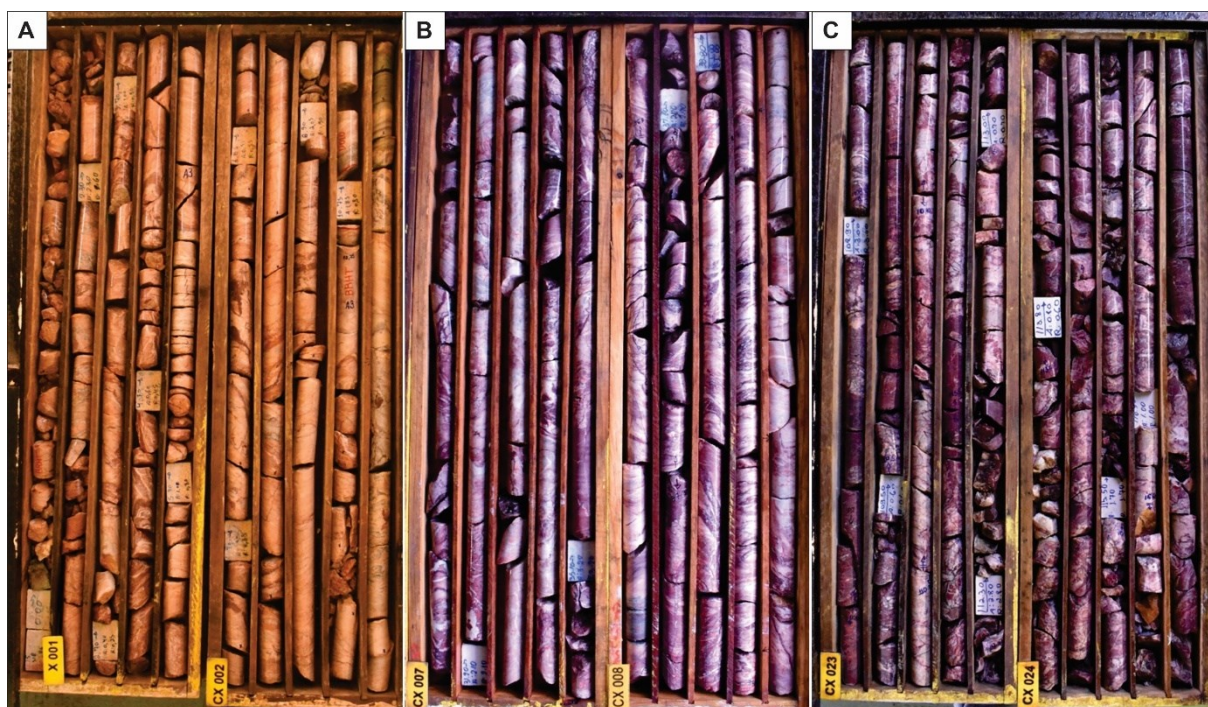
Fonte: a autora (2024).

A brecha dolomítica ferrocarbonatada pode ser classificada, quanto a intensidade da brechação em: fraca, moderada e forte. A brecha dolomítica ferrocarbonatada fraca (Figura 18-A), possui coloração cinza claro a rosa, clasto suportada com clastos que variam de finos a grossos, podendo ser sub-angulosos a angulosos. É caracterizada principalmente por vênulas de ferro-carbonatação pervasivas extremamente finas e relativamente dispersas.

A brecha dolomítica ferrocarbonatada moderada (Figura 18-B) varia de rosa escuro a vermelho claro, é suportada por clastos, com vênulas e veios pervasivos mais abundantes em relação a brecha fraca. A ferrocarbonatação é mais expressiva e abrange uma porção maior da rocha. Os clastos são predominantemente angulosos.

A brecha dolomítica ferrocarbonatada forte (Figura 18-C) apresenta cor vermelho escuro, dependendo da porção pode ser clasto ou matriz suportada. Nos locais onde é suportada pela matriz, ela apresenta composição dolomítica e ferrocarbonatada (carbonatos de ferro). Os clastos variam de finos a grossos, com composição predominantemente dolomítica e são majoritariamente angulosos. Há veios incipientes de dolomita. Nessa brecha também pode ser identificado a presença de hematita.

Figura 18 - A) Brecha ferrocarbonatada fraca. B) Brecha ferrocarbonatada moderada. C) Brecha ferrocarbonatada forte.



Fonte: a autora (2024).

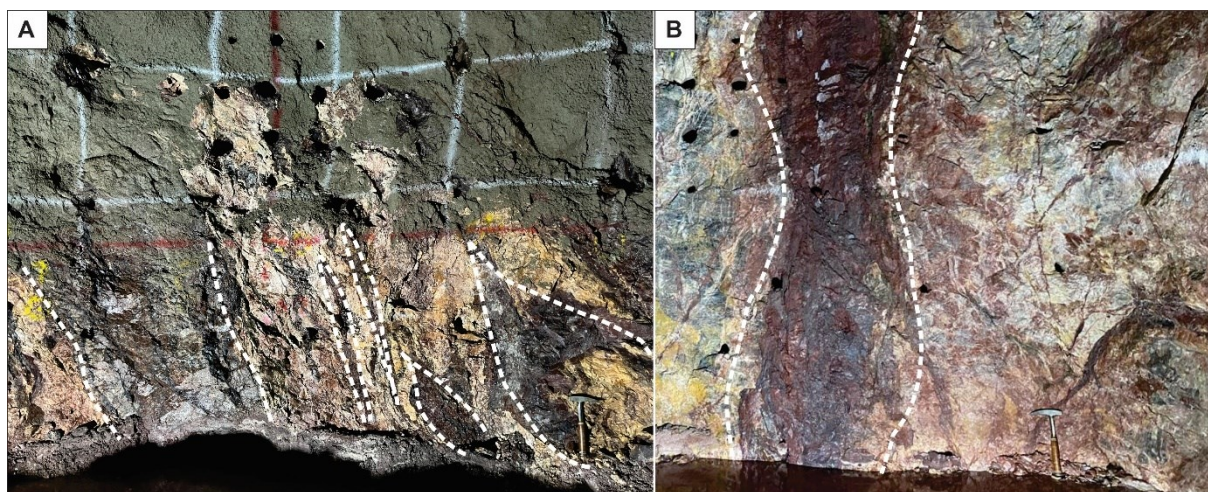
5.2 Modo de ocorrência da alteração hidrotermal e mineralização

A alteração hidrotermal, marcada pela interação fluido-rocha, resultando principalmente em minerais como: willemita, dolomita, quartzo e hematita. Ocorre associada a brechas hidráulicas que estão inseridas na zona da Falha de Vazante e, por conseguinte, seguem o *trend* principal da estrutura (N50E/70NW).

A zona mineralizada é caracterizada por brechas willemíticas e hematíticas. A brecha willemítica (Figura 19-A) é definida por lentes de willemita maciça. Apresenta coloração cinza bem semelhante a brecha hematítica, distinguindo-se principalmente devido ao brilho resinoso, característico da willemita. A willemita encontra-se disseminada na matriz da brecha, entretanto, em alguns trechos é possível identificar cristais finos de willemita que apresentam coloração marrom.

A brecha hematítica é caracterizada pela presença de lentes de hematita maciça (Figura 19-B). Apresenta coloração que varia de cinza a cinza escuro. Possui brilho metálico bem característico da hematita, que ocorre como cristais finos a muito finos. Em algumas porções a hematita pode apresentar-se como cristais prismáticos, entretanto, ocorre principalmente na forma de agregados, que substituem os clastos dolomíticos e a matriz da rocha. Além disso, vale destacar que é uma rocha com densidade significativa devido à grande quantidade de hematita em sua composição.

Figura 19 - A) Porções de brecha willemítica destacada pela linha tracejada. B) zona de brecha hematítica delimitada pela linha tracejada.



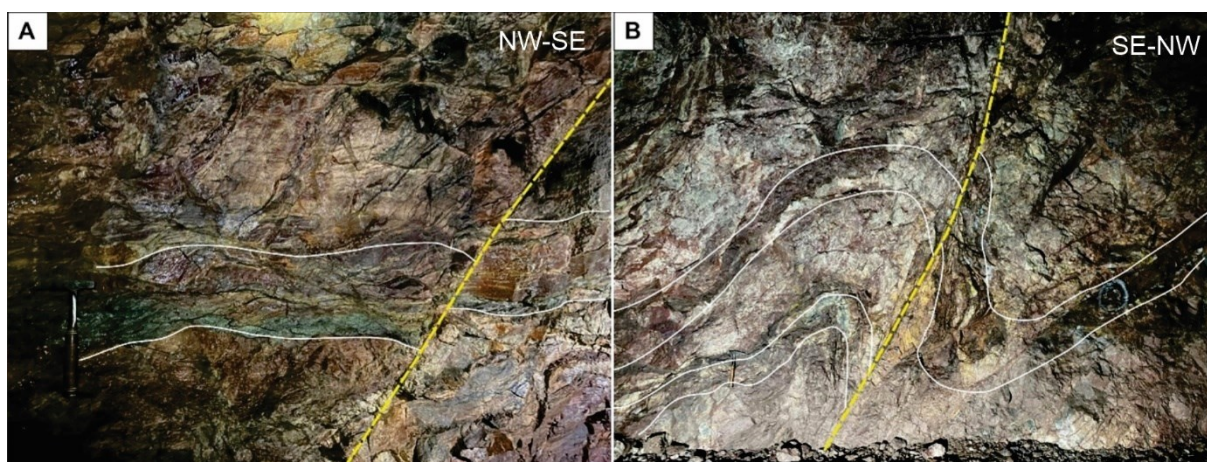
Fonte: a autora (2024).

5.3 Controle Estrutural da Mineralização Willemítica da Mina Vazante na Rampa 29

Com base em critérios de sobreposição observados em campo, nota-se que a mineralização willemítica ocorre associada a zona de cisalhamento transcorrente decorrente da Falha de Vazante. Assim, a identificação das principais estruturas, especialmente o acamamento sedimentar, contribuiu para a hierarquização das estruturas.

Falhas normais NE, foram identificadas interceptando a zona de cisalhamento, assim como a lente mineralizada e as camadas dobradas (Figura 20-A). Essas falhas apresentam ângulos de mergulho baixos, de 30° a 40°. Também ocorrem falhas normais NW com ângulo de mergulho maior (50° a 60°) que transpõe as estruturas de baixo ângulo (Figura 20-B).

Figura 20 - A) Falha normal NE de atitude 195/40 marcada pela linha amarela tracejada transpondo a zona de cisalhamento. B) Falha NW de atitude 317/60 marcada pela linha amarela tracejada cortando as estruturas de baixo ângulo.

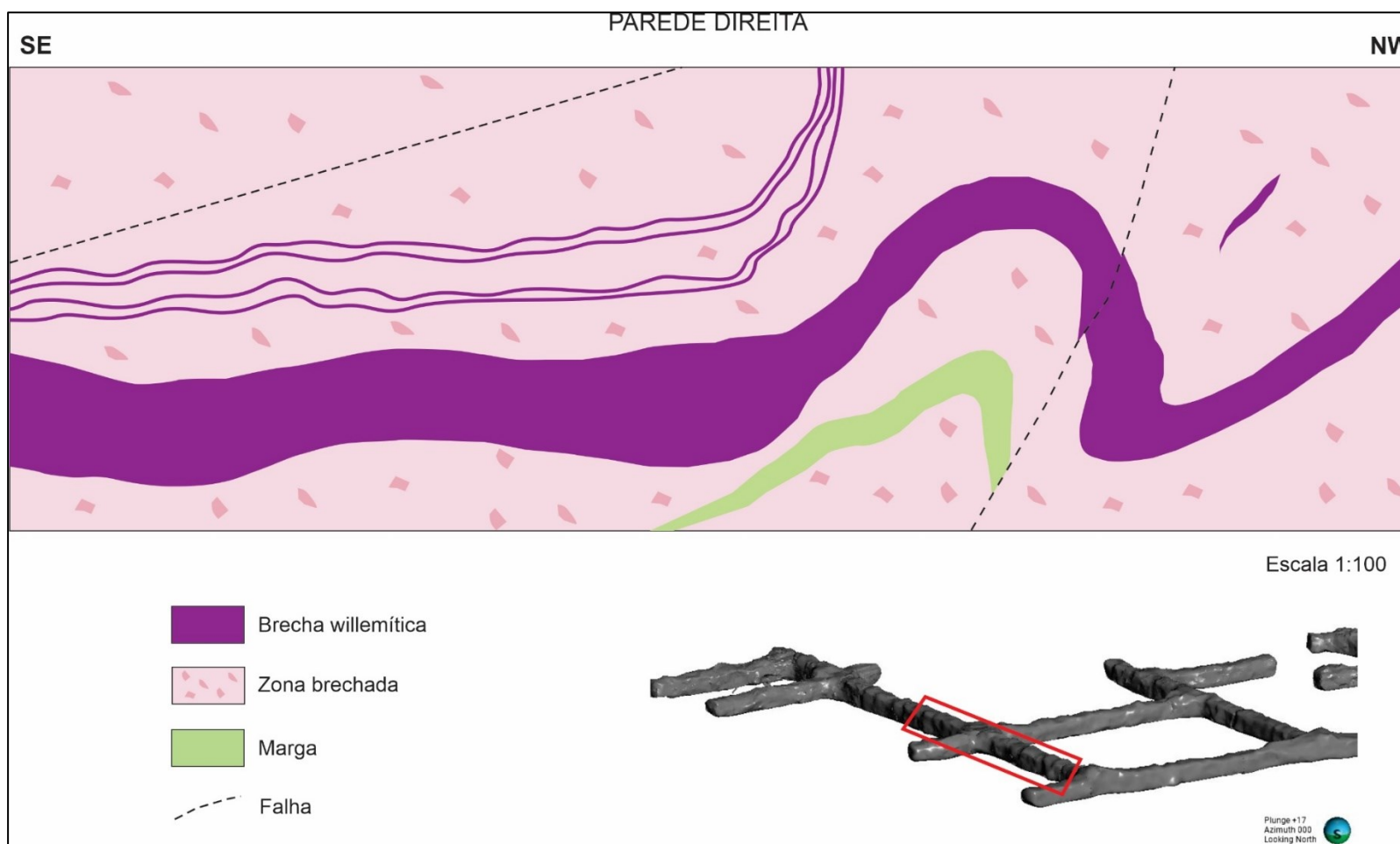


Fonte: a autora (2024).

5.3.1 Lentes de Minério Subhorizontais

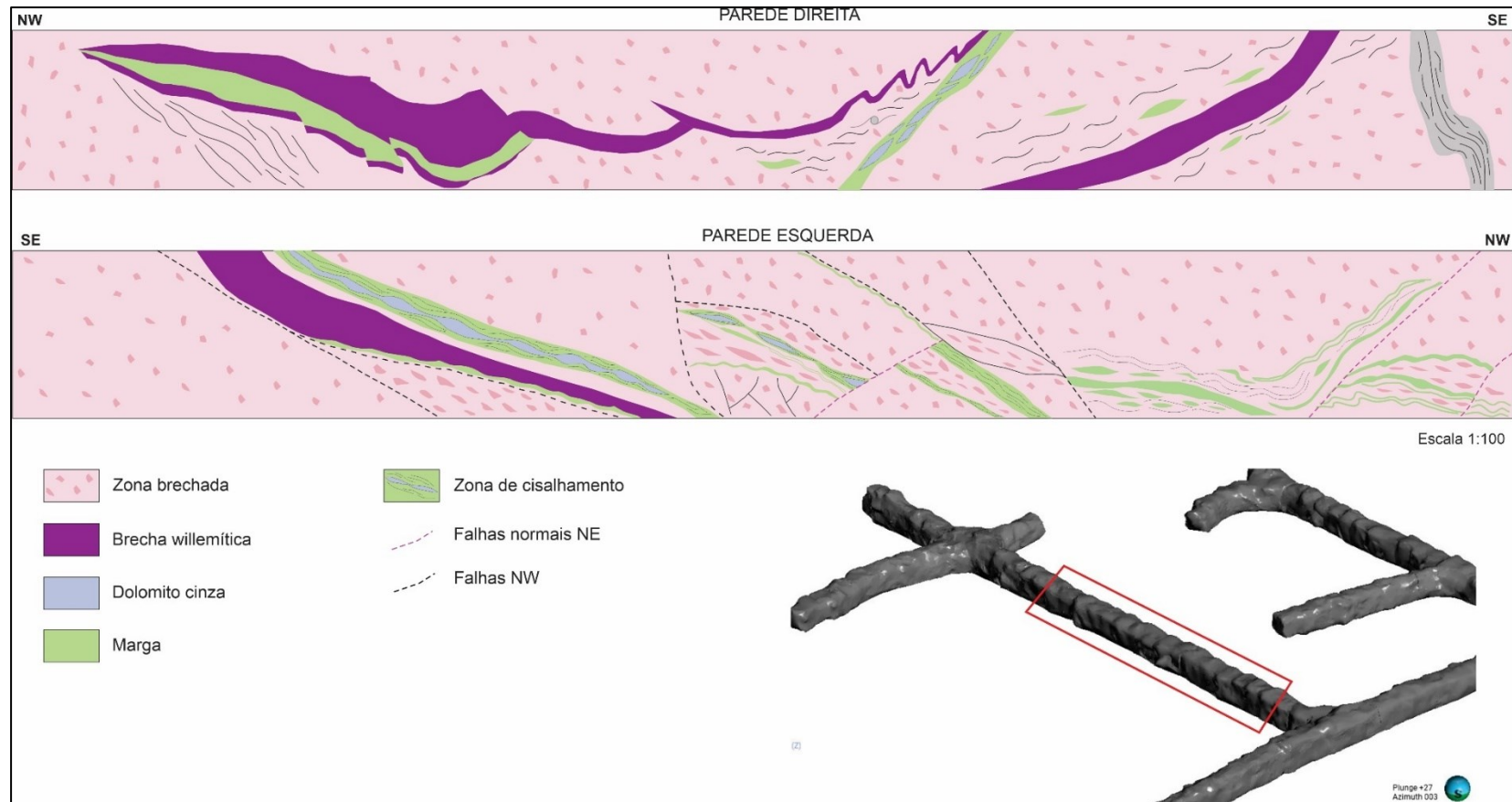
A lente willemítica observada nas travessas mapeadas da rampa 29 nos níveis 305 e 315 (Figuras 21 e 22) possuem baixo ângulo de mergulho, apresentando morfologia subhorizontalizada. Com base nos dados coletados em campo, a orientação principal é aproximadamente N-S, com variações para NNE-SSW ou NNW-SSE.

Figura 21 - Perfil geológico da parede direita de uma travessa do nível 305. Mostra a relação entre a rocha hospedeira e a mineralização, com foco em lente mineralizada de baixo ângulo de mergulho presente na região da rampa 29 da Mina Vazante.



Fonte: a autora (2024).

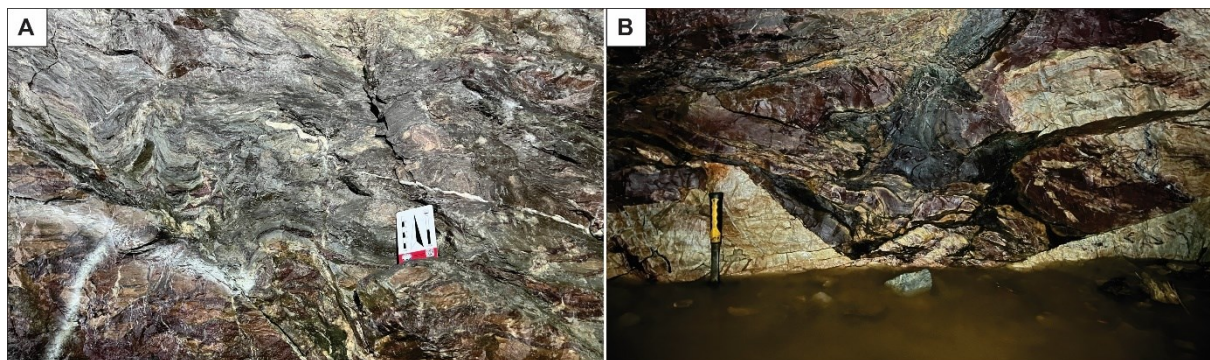
Figura 22 - Perfil geológico de um trecho de uma travessa no nível 315. Demonstra as relações de sobreposição das principais estruturas identificadas nas paredes da travessa, com foco na lente mineralizada de baixo ângulo presente nessa porção da Mina Vazante.



Fonte: a autora (2024).

Nesses locais a lente encontra-se dobrada, sendo cortada pela zona de cisalhamento anastomosada. No geral, as dobras são suaves e assimétricas, com vergência para SE e com dobras parasíticas associadas (Figura 23-A). Além disso, a charneira da dobra é marcada por intensa brechação (Figura 23-B).

Figura 23 – A) Dobras parasíticas. B) Charneira da dobra.

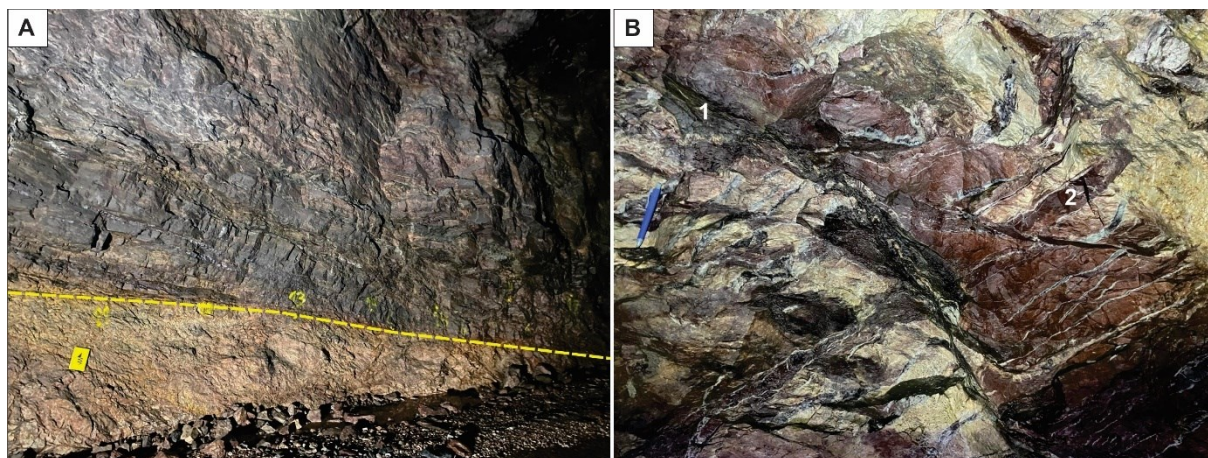


Fonte: a autora (2024).

Na zona de cisalhamento é possível identificar o desenvolvimento de foliação milonítica (*Sm*), pervasiva, contínua, de direção principal NNE-SSW e mergulhos entre 20° a 40° para NW. É bem desenvolvida e em alguns locais é possível identificar a presença de minerais como dolomita, quartzo e alguma micas, que se segregam em bandas claras e escuras.

Ocorrem também falhas inversas de direção principal SE-NW (Figura 24-A) que delimitam claramente o *hangingwall* e *footwall* da mineralização. Além disso, ainda associada a Sz foram identificadas algumas fraturas de extensão (Figura 24-B).

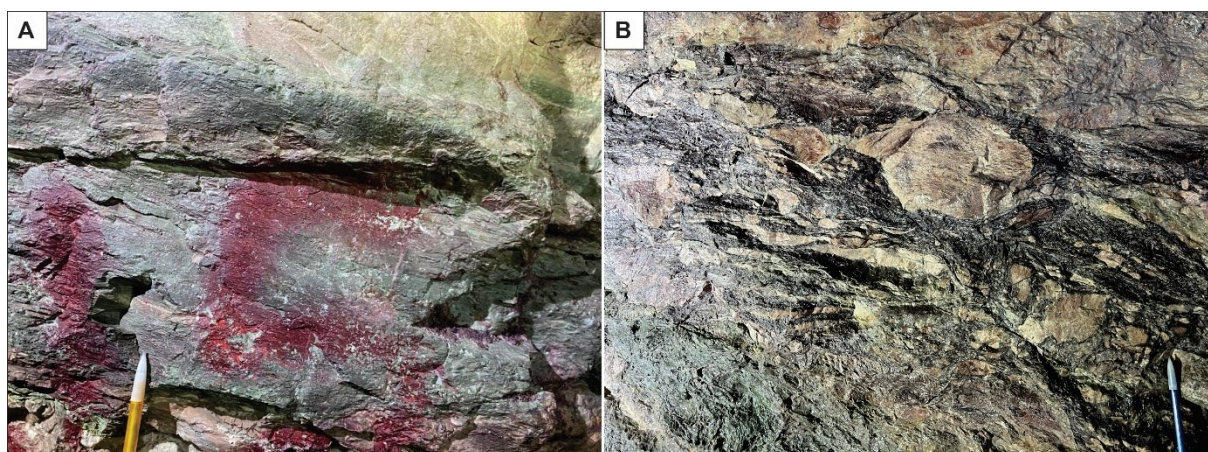
Figura 24 – A) Falha inversa de direção principal SE-NW que acompanha a zona de cisalhamento, marcada pela linha amarela tracejada. B) Fraturas de extensão associadas a zona de cisalhamento.



Fonte: a autora (2024).

Associada a *Sm* há geração de lineação do tipo crista/vale (*Lc*), comum em regimes dúctil-rúptil, com direção principal NW-SE e mergulhos baixos entre 10° e 40° para SW. Além disso, pares S-C também ocorrem indicando vergência do movimento para SE (Figura 25-A). Ainda associado a zona de cisalhamento, há a presença de um indicador cinemático do tipo delta (Figura 25-B), caracterizado por um porfiroclasto de dolomito, que indica movimentação sinistral.

Figura 25 - A) Pares S-C indicando vergência para SE. B) Indicador cinemático do tipo delta.



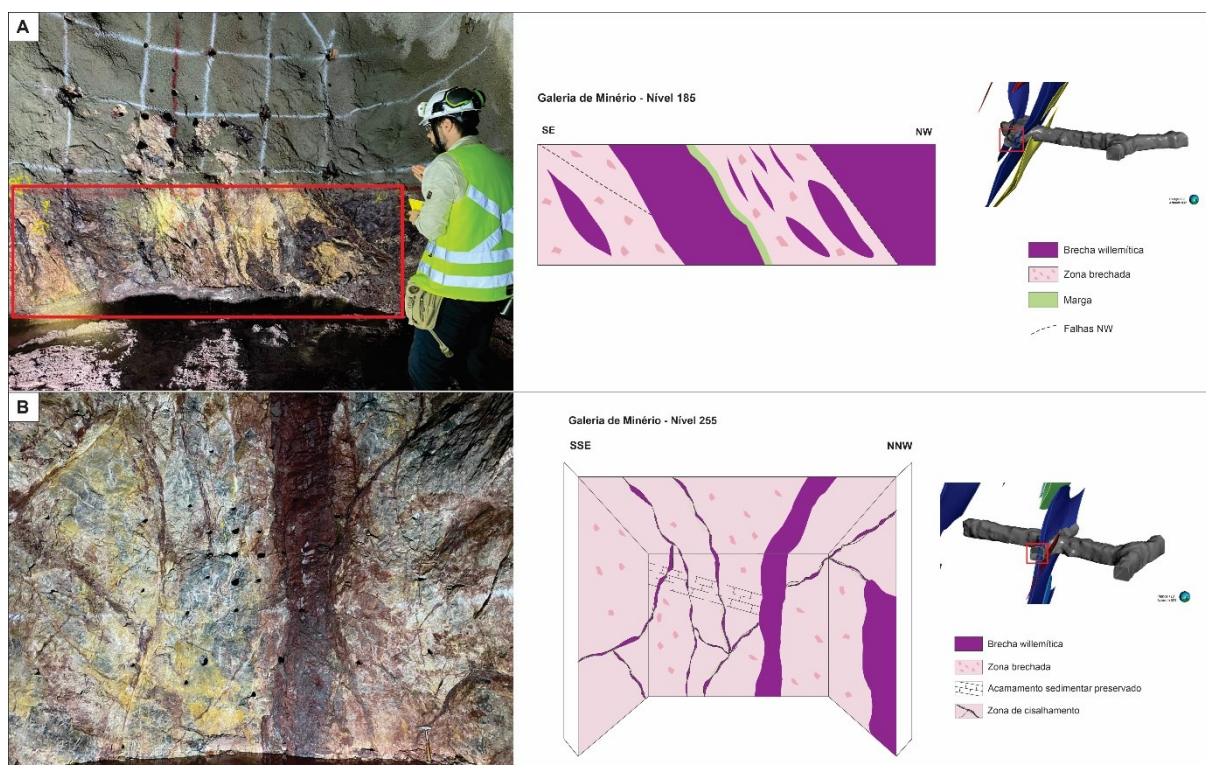
Fonte: a autora (2024).

5.3.2 Lentes de Minério Subverticais

As lentes de minério subverticais são comuns na Mina Vazante, sendo que, essa morfologia é considerada como “padrão” na mina. Nas galerias de minério mapeadas, a lente mineralizada é subvertical, com direção preferencial NNW-SSE, apresentando ângulos de mergulho altos, entre 50° a 70°.

Na galeria de minério do nível 185 (Figura 26-A), *hanginwall* e *footwall* da mineralização são bem-marcados por duas falhas principais NW de atitudes N65E/50NW e N40E/52NW, respectivamente, que acompanham o *trend* da mineralização. Na galeria de minério do nível 255 (Figura 26-B) a lente willemítica apresenta morfologia vertical, com ângulo de mergulho de 90°.

Figura 26 - A) Galeria de minério do nível 185. O croqui ao lado demonstra as falhas NW que delimitam a lente willemítica. B) Galeria de minério do nível 255. O croqui ao lado demonstra a lente mineralizada sub-vertical claramente associada a zona de cisalhamento anastomosada.



Fonte: a autora (2024).

Em ambas as galerias de minério, nota-se que a lente willemítica ocorre associada a zona de cisalhamento. No geral, a zona de cisalhamento subvertical, de orientação predominante NNW-SSE, apresenta um sistema com padrão

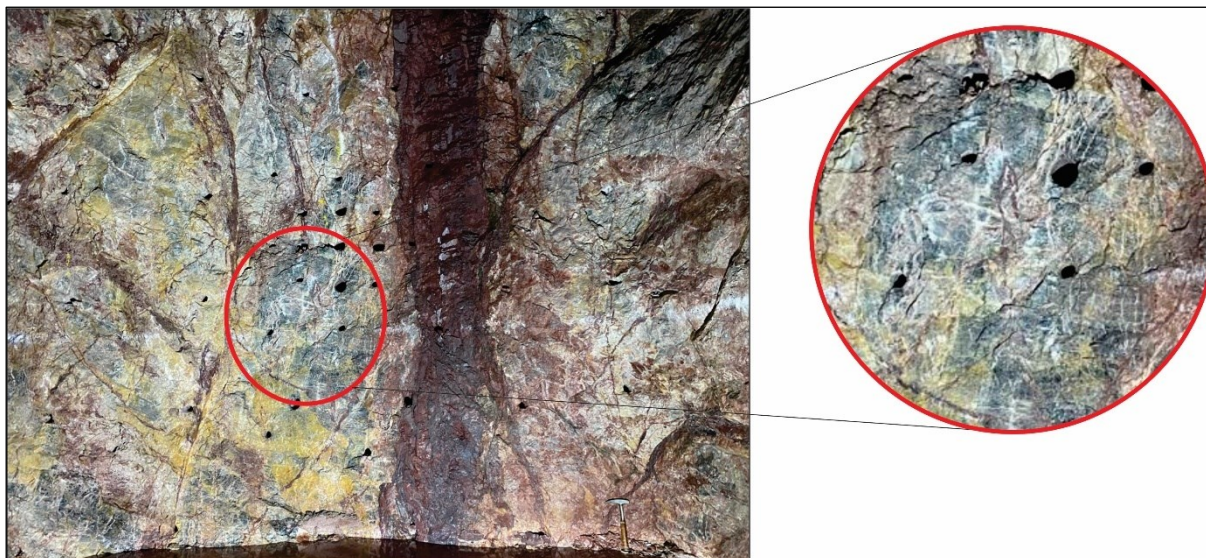
anastomosado, marcada por uma foliação milonítica bem desenvolvida (*Sm*), que assim como nas lentes sub-horizontais, é pervasiva e contínua com ângulos de mergulho altos. Associada a *Sm* há também foi identificada lineação do tipo crista/vale (*Lc*) (Figura 27), bem-marcada nas porções com grande quantidade de hematita. Essa lineação apresenta direção principal NE-SW e ângulos de mergulho que variam de 05° a 20°. Nota-se ainda, na GM do nível 255, que a zona de cisalhamento anastomosada corta as camadas de dolomito (*S0*) (Figura 28).

Figura 27 - Lineação do tipo crista/vale (*Lc*).



Fonte: a autora (2024).

Figura 28 - Zona de cisalhamento anastomosada subvertical cortando o acamamento sedimentar preservado.



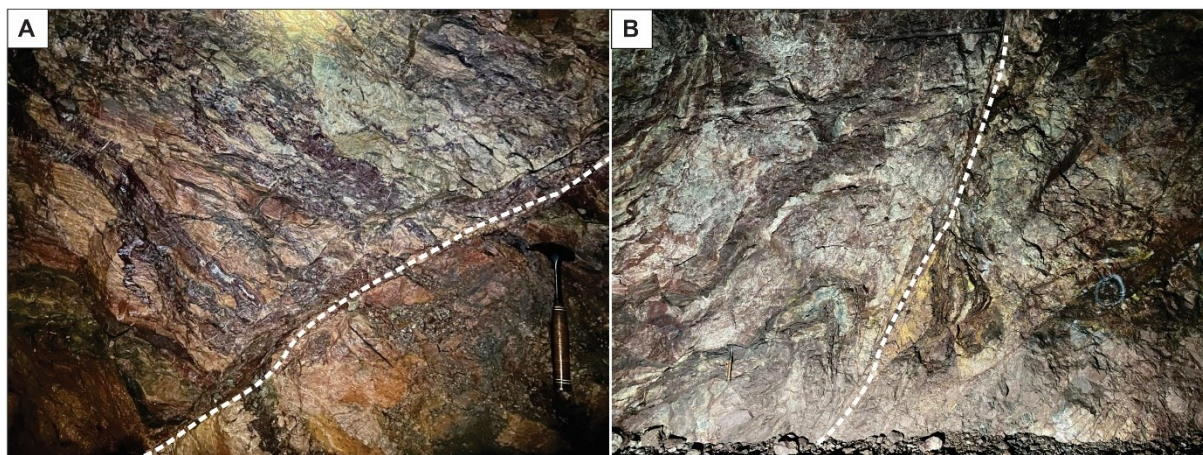
Fonte: a autora (2024).

5.3.3 Estruturas Tardias Pós-Mineralização

Nos locais mapeados nota-se a presença de falhas normais NE (Figura 29-A), de baixo ângulo, que são responsáveis por deslocar as lentes mineralizadas, bem como a zona de cisalhamento. Os ângulos de mergulho variam de 30° a 50°. Essas falhas estão presentes tanto nos locais onde a lente é subhorizontal, quanto nas porções subverticais, seccionando essas estruturas.

Em um local específico da travessa do nível 305 há uma falha normal N43E/62NW (Figura 29-B) que transpõe a estrutura de baixo ângulo, mas que apresenta direção e ângulo de mergulho diferentes das falhas normais NE.

Figura 29 - A) Falha normal NE de baixo ângulo. B) Falha normal N43E/62NW.



Fonte: a autora (2024).

6 DISCUSSÃO

A análise estrutural realizada na Mina Vazante, com foco na rampa 29, reforçou ainda mais a complexidade do controle estrutural, especialmente no que tange ao controle da mineralização. A variação na orientação das lentes mineralizadas, que apresentam baixo ângulo de mergulho na rampa 29 diante do “padrão” sub-vertical observado em grande parte da mina, indica uma alteração significativa na geometria da lente mineralizada.

Essa alteração acarreta inúmeros problemas para o desenvolvimento e lavra da mina, sendo que o principal deles, diz respeito ao método de lavra utilizado. Devido as lentes mineralizadas apresentarem-se sub-verticais em grande parte da mina, os métodos utilizados na mina são método por subníveis (*sublevel stoping*) e VRM (*Vertical Retreat Mining*). Entretanto, o baixo ângulo da mineralização encontrado na rampa 29, inviabiliza a utilização desses métodos.

Os indicadores cinemáticos, observados nas áreas mapeadas da rampa 29, especificamente os pares S-C, indicam vergência para SE na zona de cisalhamento. As camadas dobradas sub-horizontais mapeadas são afetadas pela zona de cisalhamento e por falhas NE.

A evolução cinemática da Faixa Brasília é resultante da colisão entre os crátons Amazônico e São Francisco durante o Brasiliano, sendo que, durante a compressão foram gerados uma série de empurrões, sistemas de *nappes* e uma complexa zona de cisalhamento (DARDENNE, 2000; UHLEIN et al., 2012). Além disso, de acordo

com Uhlein et al. (2012) durante a segunda fase deformacional do Setor Meridional da Faixa Brasília são formados empurrões sub-horizontais.

Assim, acredita-se que essas lentes de baixo ângulo ocorrem em dobras suaves provenientes dos empurrões da Faixa Brasília e são transpostas pela zona de cisalhamento associada a Falha Vazante. Dessa forma, em locais mais distais da zona de alta deformação associada a zona de cisalhamento da Falha de Vazante, essas estruturas de baixo ângulo são mais evidentes.

7 CONCLUSÃO

A análise estrutural realizada na Mina Vazante, especialmente na rampa 29, revelou o quanto a compreensão da geologia estrutural é primordial em locais nos quais a mineralização é controlada estruturalmente. A região da rampa 29, apresenta lentes mineralizadas de baixo ângulo, que representam uma mudança significativa em relação ao padrão típico observado em outras áreas da mina.

Essa morfologia sub-horizontal distinta do “padrão” conhecido das lentes mineralizadas interfere significativamente na aplicação e efetividade dos métodos de desenvolvimento e lavra. Assim, com esse trabalho foi possível ter uma ideia sobre a geologia estrutural e cinemática da rampa 29, podendo associar a morfologia sub-horizontal a dobras suaves decorrente da fase compressional do Ciclo Brasileiro.

Dessa forma, ressalta-se a importância da realização de estudos mais detalhados a fim de compreender mais a fundo a cinemática dessa porção da mina, conferindo mais confiabilidade e assertividade durante o desenvolvimento e lavra.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. et al. Províncias estruturais brasileiras. **VII Simpósio de Geologia do Nordeste**, p. 366–391, 1977.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. ½, p. 1-29, 1981.
- ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, F. F. M. Limites do Cráton do São Francisco em Minas Gerais – Síntese dos conhecimentos. Salvador: In: SBG, Simpósio do Cráton do São Francisco 2, 1993. **Anais**. Salvador, 1993.
- ALVARENGA, C. J. S.; OLIVEIRA, G. D.; VIEIRA, L. C.; SANTOS, R. V.; BAPTISTA, M. C.; DANTAS, E. L. Carbonate chemostratigraphy of the Vazante Group, Brazil: A probable Tonian age. **Precambrian Research**. 2019.
- BAIA, F. H. Brechas hidrotermais da Mina do Cercado e das ocorrências Olho D'água, Mata II e Pamplona: Implicações metalogenéticas e prospectivas para zinco na região de Vazante, MG. 2013. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- BATISTA, G. A. P. Calibração do modelo numérico por meio da abordagem probabilística e da diluição estruturalmente controlada no método de lavra sublevel stoping. 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos e Geotecnia aplicada a Mineração) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- BHERING, A. P., Classificação do maciço rochoso e caracterização das brechas da mina subterrânea de Vazante-MG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- BONI, M. Non-Sulfide Zinc Deposits: A new-(old) type of economic mineralization. **SGA News**, n. 15, 2003.
- CAMPOS NETO, M.C. Litoestratigrafia, relações estratigráficas e evolução paleogeográfica dos grupos Canastra e Paranoá (Região de Vazante-Lagamar, MG). **Rev. Bras. Geociências**, 14 (2):81-91, 1984.
- CARVALHO, I. A. K.; OLIVO, R. G.; MOURA, M. A.; OLIVEIRA, G. D. Fluid evolution in the southern part of Proterozoic Vazante Group, Brazil: implications for exploration of sedimentary-hosted base metal deposits. **Ore Geology Reviews**, v. 91, p. 588-611, 2017.
- CORDEIRO, P. F. O; OLIVEIRA, C. G. The Goiás Massif: Implications for a pre-Columbia 2.2–2.0 Ga continent wide amalgamation cycle in central Brazil. **Precambrian Research**, v. 298, p. 403–420, 2017.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Informe de Recursos Minerais – Programa de Geologia do Brasil. **Metalogenia das províncias minerais do Brasil: Distrito zincífero de Vazante, MG – estado de Minas Gerais**. Brasília: CPRM, 2015. (Série Províncias Minerais do Brasil, n. 05).

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa metalogenético distrito zincífero de Vazante**. Brasília: CPRM, 2015. Escala 1:75.000.

CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 62 p.

DARDENNE, M. A. Geologia da região de Vazante, Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974. p. 182-185.

DARDENNE, M. A. The Brasília fold belt. In: CORDANI, U. G. et al. (Eds.). **Tectonic Evolution of South America**. Porto Alegre, SBG, 2000. p. 231-264.

DARDENNE, M. A.; FREITAS-SILVA, F. H. Modelos genéticos dos depósitos de Pb-Zn nos Grupos Bambuí e Vazante. In: WORKSHOP DEPÓSITOS MINERAIS BRASILEIROS DE METAIS BASE, 1998, Salvador. **Anais...** Salvador: CPGG/UFBA/ADIMB, 1998. p. 86-93.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. SBG, XXX Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais**. Recife: 1978.

FERNANDES, L. A. D.; TOMMASI, A.; PORCHER, C. C.; MENEGAT, R. Correlação estrutural cinemática em faixas móveis: uma discussão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3., 1991, Rio Claro. **Anais**. Rio Claro: SBG, 1991. p. 166-168.

FIGUEIREDO, L. T. Avaliação de estabilidade de escavações em meios descontínuos, a partir de testemunhos de sondagem da mina subterrânea de Vazante/MG. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

FILHO, H. R. A. aumento da recuperação de lavra na mineração aaraiba S/A Jaguarari – Bahia. 2012.

FOSSEN, H. **Geologia estrutural**. Tradução Fábio R. D. de Andrade. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

FREITAS-SILVA, F. H.; DARDENNE, M. A. Evolução estrutural das formações Paracatu e Vazante na região de Paracatu – MG. **Revista Escola de Minas – REM**, v. 45, p. 57-59, 1992b.

FREITAS-SILVA, F. H.; DARDENNE, M. A. Quadro estratigráfico das formações Vazante e Paracatu na região de Paracatu – MG. **Revista Escola de Minas – REM**, v. 45, p. 91-93, 1992a.

FUCK R.A., JARDIM DE SÁ E.F., PIMENTEL M.M., DARDENNE, M.A., PEDROSA SOARES A.C. 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. In: Dominguez J.M.L. e Misi A. (Eds.). O Cráton do São Francisco. Salvador, SBG/SGM/CNPq, p. 165-181.

FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M.; DEL'REY-SILVA, L. J. H. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38., 1994, Salvador. **Anais...** Salvador: SBG, 1994. p. 215-216.

GERMANY, D. J. **A mineração no Brasil**. Rio de Janeiro: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2002.

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

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering**. Londres: John Wiley & Sons, 2002. 570 p.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório Setor Mineral: primeiro trimestre de 2023**. Brasília: IBRAM, 2023.

LADEIRA, E. A.; TARCIA, R. F.; CABRAL, J. A. L. Contribuição à geologia de Vazante. **Revista Escola de Minas – REM**, v. 23, p. 29-33, 1963.

LEMO, M. G. Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do extremo norte da Mina Vazante, Minas Gerais. 2011. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

LIN, S.; JIANG, D.; WILLIAMS, P. F. Importance of differentiating ductile slickenside striations from stretching lineations and variation of shear direction across a high-strain zone. **Journal of Structural Geology**, v. 29, n. 3, p. 459-474, 2007.

MARJORIBANKS, R. **Geological Methods in Mineral Exploration and Mining**. 2. ed. Berlim: Springer, 2010.

MISI, A. et al. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: implications to metallogenetic and phosphogenic models. **Ore Geology Reviews**, v. 63, p. 79-90, 2014.

MISI, A.; IYER, S. S. S.; COELHO, C. E. S.; TASSINARI, C. C. G.; FRANCA-ROCHA, W. J. S.; CUNHA, I. A.; GOMES, A. S. R.; OLIVEIRA, T. F.; TEIXEIRA, J. B. G.; FILHO, V. M. C. Sediment hosted lead–zinc deposits of the Neoproterozoic Bambuí Group and correlative sequences, São Francisco Craton, Brazil: A review and a possible metallogenetic evolution model. **Ore Geology Reviews**, 26, 263–304, 2005.

MOERI, E. On a columnar stromatolite in the Precambrian Bambuí Group of central Brazil. **Eclogae Geologicae Helvetica**, 65, 185–195, 1972.

MONTEIRO, L. V. S. Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco e Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais. 2002. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; JULIANI, C.; OLIVEIRA, T. F. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: Mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. **Gondwana Research**, v. 11, p. 362-381, 2007.

MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; SPIRO, B.; GRAÇA, R.; OLIVEIRA, T. F. The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil: Constraints on willemitic mineralization and fluid evolution. **Exploration Mining and Geology**, v. 8, p. 21–42, 1999.

NEVES, L. P. Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb Morro Agudo, Grupo Vazante. 2011. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Prospecção) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

NEXA RESOURCES. **Site institucional da Nexa Resources**. Disponível em: <<https://www.nexaresources.com/>>. Acesso em: 11 nov. 2024.

OLIVO, G. R. et al. The Proterozoic Vazante Hipogene Zinc Silicate District, Minas Gerais, Brazil: a review of the ore system applied to mineral exploration. **Minerals**, 2018.

OLIVEIRA, L. C. Descrição e significado ambiental dos morfotipos estromatolíticos do Grupo Vazante na Fazenda da Barra, Coromandel, MG. 2023. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2024.

PASSCHIER, C. W.; TROUW, R. A. J. **Microtectonics**. 2. ed. Berlin: Springer, 2005. PIMENTEL, M. M.; DARDENNE, M. A.; FUCK, R. A.; VIANA, M. G.; JUNGES, S. L.; FISCHER, D. P.; SEER, D. P.; DANTAS, E. L. Nd isotopes and the provenance of detrital 72 sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, Issue 6, p.571-585. 2001.

PIMENTEL, M.M. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. **Brazilian Journal of Geology**. v. 46, n. 2, p. 67 82, 2016.

PINHO, J. M. M. Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante. 1990. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 1990.

PINHO, J. M. M.; DARDENNE, M. A.; RIGOBELLO, A. E. Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NÚCLEO MINAS GERAIS, 5., 1989, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, 1989. p. 275-276.

RODRIGUES, J. B. et al. Provenance of the Vazante Group: new U-Pb, Sm-Nd, Lu-Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt. **Gondwana Research**, v. 21, p. 439-450, 2012.

RODRIGUES, J. B. Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí – Um estudo de zircões detríticos e Idades Modelo Sm-Nd. 2008. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

ROSTIROLLA, S. P. et al. Análise estrutural da Mina de Vazante e adjacências: Geometria, cinemática e implicações para a hidrogeologia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, p. 59-68, 2002.

SALGADO, P. V. Caracterização geológica das Mineralizações de Zinco na região doo Nível 420 - Sucuri Norte, Mina Vazante – MG. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Instituto de Geociências – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2022.

SEER, H. J.; MORAES, L. C. Within plate, arc, and collisional Neoproterozoic granitic magmatism in the Araxá Group, Southern Brasília belt, Minas Gerais, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 2, p. 333-354, 2013.

SOTERO, M. P. et al. Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região de mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 19, n. 2, p. 19-214, 2019.

TURNER, F. J.; WEISS, L. E. **Structural Analysis of Metamorphic Tectonites**. New York: McGraw Hill, 1963.

VALERIANO C.M.; DARDENNE M.A.; FONSECA M.A.; SIMÕES L.S.A.; SEER H.J; A evolução tectônica da Faixa Brasília. In: Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, cap. XXII, p. 575-592, 2004.

VALERIANO, C.M.; PIMENTEL, M.M.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J.C.H.; TROUW, R.A.J. Tectonic evolution of the Brasília Belt, central Brazil, and early assembly of Gondwana. **Geological Society London Special Publications**, v. 294, p. 197-210, 2008.