



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**Departamento de Geologia e Recursos Naturais - DGRN**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Mapeamento Geológico do Bloco F da Mina *Underground* Zn-Pb de  
Morro Agudo, Grupo Vazante-MG**

**Autora:**

Tatiana Moreira César

**Orientadora:**

Profa. Dra. Maria José Maluf de Mesquita

Campinas/SP

Julho de 2022



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**Departamento de Geologia e Recursos Naturais - DGRN**

**Mapeamento Geológico do Bloco F da Mina *Underground* Zn-Pb de  
Morro Agudo, Grupo Vazante-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito para obtenção  
do título de Bacharel em Geologia  
pelo Instituto de Geociências, da  
Universidade Estadual de Campinas.

**Comissão Examinadora:**

Profa. Dra. Maria José Maluf de Mesquita  
Profa. Dra. Carolina Penteadó Natividade Moreto  
Ms. Jessica Alcantara Azevedo Cavalcanti de Arruda

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Geociências  
Marta dos Santos - CRB 8/5892

C339m C339m Cézar, Tatiana Moreira, 1995-  
Mapeamento geológico do bloco F da Mina *Underground* Zn-Pb de Morro Agudo, Grupo Vazante - MG / Tatiana Moreira Cézar. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Maria José Maluf de Mesquita.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Mapeamento geológico. 2. Minas e recursos minerais - Exploração. 3. Sedimentação e depósitos. 4. Minérios de zinco. I. Mesquita, Maria José Maluf de, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações adicionais, complementares

**Título em outro idioma:** Geological mapping of block F of the Morro Agudo Zn-Pb *Underground* Mine, Vazante Group - MG

**Palavras-chave em inglês:**

Geological mapping

Mines and mineral resources - Exploration

Sedimentation and deposition

Zinc ores

**Titulação:** Bacharel em Geologia

**Banca examinadora:**

Maria José Maluf de Mesquita [Orientador]

Carolina Penteado Natividade Moreto

Jessica Alcantara Azevedo Cavalcanti de Arruda

**Data de entrega do trabalho definitivo:** 11-07-2022

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus e todas as suas formas de se manifestar.

Agradeço aos meus pais, Carla e Amarildo, por me darem a vida, amor, suporte, me manterem em pé nas dificuldades, e estarem do meu lado em todas as minhas conquistas. Agradeço aqui também meus irmãos, Juliana e Lucas. Minha família, meus maiores incentivadores e minha motivação para continuar. Amo vocês. Sempre por vocês.

À Unicamp, minha segunda casa, agradeço pela oportunidade de me tornar quem sou. Graças ao ProFIS, eu, uma aluna de escola pública e periférica, não estaria ocupando o espaço que é meu por direito. Do ProFIS fiz amizades que levo para a vida, e daqui agradeço Ingrid e Íris por serem minhas melhores amigas. Desde 2013, sempre nós três.

Ao Instituto de Geociências, meus agradecimentos por terem feito destes anos os mais incríveis. Agradeço à minha orientadora, professora Maria José Mesquita por confiar no meu trabalho nesta reta final, e não tenha dúvidas que tenho a ti como uma inspiração e exemplo de mulher e profissional que quero me tornar. Agradeço também aos demais professores e funcionários do instituto, pois sem eles nada disso seria possível. Menção honrosa ao professor Ticiano Saraiva, com quem tenho uma bela amizade e grande admiração, e tive o prazer de trabalhar durante a graduação.

Aos meus amigos de caminhada, dedico à Geologia 015, a turma mais unida que o IG já teve, cheia de boas vivências e experiências, e que sinto muitas saudades. Também agradeço meus veteranos 014, vocês sabem que são vocês. À minha maior companhia na aventura da graduação, que desde 2015 nunca saiu do meu lado, me aturou e eu aturei em troca, sempre com as melhores conversas, piadas internas, campos, ajudas e motivações, essa vai pro famoso Perigoso, também conhecido como César, e assim também agradeço ao LabPed por me adotar e proporcionar boas amizades. Fora do IG também construí amizades valiosas, e aqui dedico a Samantha, minha amiga que admiro muito e que é muito mais forte do que parece.

Meus agradecimentos à Nexa por ceder os dados necessários para a realização deste trabalho e por todo o aprendizado, e afirmo que em Morro Agudo aprendi a ser Geóloga. Agradeço Aender, Camilo, Gustavo, Sérgio, Odair, Mauro e todos os técnicos e auxiliares do time de Geologia pelo aprendizado e atenção comigo ao longo deste último ano. Agradeço especialmente à Bárbara pela companhia e amizade, pelas conversas e por ter me abrigado nesta temporada longe de casa; tenha certeza que morar contigo fez meu estágio e permanência em Paracatu muito mais leve.

Por último (de propósito), agradeço ao meu companheiro, meu namorado Thiago. Chegou na minha vida a pouco tempo e fez tudo mudar. Agradeço a você pelo carinho, afeto, ombro, por aguentar minhas paranóias e indecisões, e por ser um dos meus maiores incentivadores. Agradeço por estar comigo aqui, e que estejamos sempre juntos em todos os momentos.

Muito obrigada! Agora, sou Geóloga.

*“Oh, this time  
It's yours and mine  
Hey, it's time to hand it over  
Just give me what's mine”*

***MGMT - Hand It Over***

## Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviaturas</b>	<b>xi</b>
<b>Resumo</b>	<b>xii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Capítulo 1: Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Histórico da mina Zn-Pb de Morro Agudo	1
1.2 Localização e vias de acesso	2
<b>Capítulo 2: Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 3: Contexto Geológico Regional</b>	<b>3</b>
3.1 Província Tocantins	3
3.2 Faixa Brasília	4
3.3 Grupo Vazante	5
3.3.1 Contexto Geotectônico	5
3.3.2 Estratigrafia	6
3.3.3 Geocronologia	8
3.3.4 Contexto Estrutural	8
3.3.5 Recursos Minerais	9
<b>Capítulo 4: Contexto Geológico Local</b>	<b>9</b>
4.1 Estratigrafia	9
4.1.1 Membro Mocambo (MOC)	9
4.1.2 Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL)	9
4.1.3 Unidade de Brecha Dolarenítica (BDAR)	9
4.1.4 Unidade Dolarenítica (DAR)	10
4.1.5 Sequência Argilo-Dolomítica (SAD)	10
4.2 Geologia Estrutural	11
4.3 Corpos Mineralizados	12
4.3.1 Minério hospedado em brecha (GHI)	13
4.3.2 Minério hospedado em dolarenito rico em esfalerita (JK)	13
4.3.3 Minério hospedado em dolarenito rico em galena (L)	13
4.3.4 Minério silicificado recristalizado (M)	14
4.3.5 Minério estratiforme superior substituído (N)	14
4.4 Gênese do depósito	16
4.5 Métodos de Lavra	18
<b>Capítulo 5: Metodologia</b>	<b>18</b>
5.1 Revisão bibliográfica	19
5.2 Mapeamento das galerias subterrâneas	19
5.3 Caracterização dos corpos de minério	21
5.4 Caracterização estrutural dos subníveis	21
5.5 Atualização do modelo exploratório das lentes JKL	21
<b>Capítulo 6: Resultados</b>	<b>25</b>
6.1 Nota explicativa dos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE	26
6.1.1 Litotipos	29

6.1.2 <i>Caracterização do minério</i>	31
6.1.2.1 Minério tipo cimento de granulação fina	31
6.1.3.2 Minério em vênulas e agregados de granulação média	32
6.1.2.3 Minério em fraturas e falhas de granulação grossa	33
6.1.3 <i>Caracterização estrutural</i>	34
6.1.3.1 716 RJKF	35
6.1.3.2 750 RJKE	38
6.2 Atualização do modelo exploratório das lentes JKL	40
<b>Capítulo 7: Discussão</b>	<b>41</b>
<b>Capítulo 8: Conclusões</b>	<b>44</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>44</b>
<b>Anexos</b>	<b>49</b>
Anexo 1: Perfis de caminhamento subnível 716 RJKF	49
Anexo 2: Perfis de caminhamento subnível 750 RJKE	53
Anexo 3: Tabelas com dados estruturais	55
Anexo 4: Mapa geológico confeccionado em escala 1:500 do <i>sublevel</i> 716 RJKF	56
Anexo 5: Mapa geológico confeccionado em escala 1:500 do <i>sublevel</i> 750 RJKE	57

## Lista de Figuras

- Figura 1.1: Mapa de localização do depósito de Morro Agudo, região noroeste do Estado de Minas Gerais. A mina está ao sul da cidade de Paracatu e a figura representa a distância com relação a Brasília. De [Neves \(2011\)](#).....2
- Figura 1.2: Vista em planta do interior da mina Zn-Pb de Morro Agudo, com a área do Bloco F indicada pelo polígono em vermelho.....3
- Figura 3.1: Compartimentação geológico-estrutural do Brasil. Província Tocantins identificada na cor laranja. [Hasui et al., \(2012\)](#).....4
- Figura 3.2: Mapa tectônico e localização da área de estudo em vermelho. A- Localização da Faixa Brasília no contexto do Cráton São Francisco (limite cratônico compilado de [Alkmim e Teixeira \(2017\)](#)); B- Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília ([Dardenne, 2000](#)) e compartimentação tectônica proposta por [Fuck et al. \(2005\)](#). Extraído de [Sotero et al. \(2019\)](#).....5
- Figura 3.3: Mapa geológico simplificado do Grupo Vazante, região de Morro Agudo. O mapa evidencia as falhas de empurrão que limitam a faixa em E e W, além de pontuar as regiões com ocorrências de depósito mineral. O local de estudo se encontra dentro do polígono vermelho. Modificado de [Dias et al. \(2018\) apud Sotero \(2019\)](#).....6
- Figura 3.4 Coluna estratigráfica do Grupo Vazante, modificado de [Dardenne \(2000\), apud. Sotero et al., \(2019\)](#). As formações encontradas na área de estudo estão circundadas pelo polígono vermelho.....7
- Figura 4.1: Litotipos de testemunhos de sondagem, mostrando a sequência litoestratigráfica da mina de Morro Agudo. SAD - Intercalações de dolomita com material siliciclástico, formando laminações milimétricas; DAR- Textura granular maciça, com presença evidente de clastos finos; BDAR- Brecha intensamente fraturada, com preenchimento de vênulas por dolomita e quartzo; BDOL- Brecha intraformacional, com clastos de dolomita em tamanhos variados, envoltos de cimento dolomítico; MOC- Laminações milimétricas causadas por deposições de material dolomítico muito fino, argila e matéria orgânica.....10
- Figura 4.2: Bloco diagrama do depósito de Morro Agudo, mostrando a geometria dos corpos de minério e como são afetadas pela Falha Principal (*Main Fault*) e falhas subsidiárias paralelas. Ilustra a maior concentração das lentes de minério dentro da Unidade Dolarenítica (DAR) e o afinamento progressivo das lentes de minério acompanhando o *down-dip* das falhas. As galerias de estudo se concentram nos níveis dos minérios JK e L. Extraído de [Cordeiro et al. \(2018\)](#).....12
- Figura 4.3: Sequência das lentes de minério *stratabound*, do topo à base, apresentando as principais características das mineralizações. N- esfalerita estratiforme, com intercalações de *chert* (vermelho) e pirita maciça; M- esfalerita disseminada entre a porosidade; L- galena e esfalerita disseminada na porosidade e substituindo o cimento dolomítico. O alto teor de galena destrói a estrutura primária do dolarenito; JK- esfalerita e galena subordinada, substituindo o cimento dolomítico e ocupando a porosidade do dolarenito, preservando clastos e por vezes substituindo totalmente os aloquímicos; GHI- esfalerita, galena e pirita remobilizados, ocupando fraturas e espaços vazios entre os clastos da brecha dolomítica. cht- chert, dol-dolomita, gn- galena, - py- pirita, sph- esfalerita.....15
- Figura 4.4: Modelo metalogenético do depósito Zn-Pb de Morro Agudo por [Cordeiro et al., \(2018\)](#). AB- Deposição dos sulfetos estratiformes sin-sedimentares dentro de um plataforma carbonática mesoproterozóica intracratônica, representada pela Fm. Morro do Calcário; C- Durante a Orogenia Brasileira neoproterozóica, um evento inicial de mistura de fluidos de fontes basais e marinhas precipitou sulfetos maciços (rosa) e brechas (laranja) dentro das rochas hospedeiras; D- Um evento posterior de mistura de fluidos parcial sobrepôs localmente a mineralização anterior com sulfetos laminados (azul); E- Esta parte da bacia sofreu falhas e inclinações oblíquas normais, com consequente remobilização dos sulfetos (cinza); F- O soerguimento posterior expôs a sequência a erosão e criou a topografia atual.....17

Figura 4.5: Exemplo de alocação de <i>stope</i> (polígono em roxo) acima do <i>sublevel</i> (vermelho) 716 RJKF. Representação em ambiente <i>Leapfrog Geo</i> .....	18
Figura 5.1: Apresentação dos <i>sublevel</i> em estudo. A- Os <i>sublevel</i> 716 RJKF (acima) e 750 RJKE (abaixo); B- Os componentes de um <i>sublevel</i> na mina de Morro Agudo: GM1, GM2 e TRMs.....	19
Figura 5.2: Croqui feito à mão representando perfil de caminhamento de trecho da 716 RJKF, lado esquerdo (acima) e direito (abaixo) com os intervalos de entrada das TRMs.....	20
Figura 5.3: Prancha de imagens extraídas do <i>software Leapfrog Geo</i> , representando o modelamento implícito das lentes JKL. A- Conjunto de testemunhos de sondagem que interceptam a região do Bloco F, onde estão os <i>sublevel</i> de estudo (em vermelho). As sondagens expostas mostram os litotipos interceptados: marga (azul), dolarenito (amarelo), brechas (laranja); B- Representação dos teores de Zn-Pb nos testemunhos de sondagem. Estes teores são indicados por um gradiente de cores expostos na legenda interna, sendo azul o teor mais baixo (0,01 %) e vermelho o mais alto (> 9%). Notar os <i>sublevels</i> estudados em rosa claro e a direção preferencial das amostras; C- O modelo implícito das lentes J (azul), K (amarelo) e L (verde), feitos a partir dos teores dos testemunhos de sondagem. A direção das lentes tem caimento para NW. Notar os <i>sublevels</i> estudados dentro do conjunto de lentes <i>stratabound</i> (em vermelho); D- Corte vertical nas galerias, mostrando a disposição das lentes segundo o modelo implícito, ditados pela disposição dos teores nos testemunhos de sondagem.....	23
Figura 5.4: Prancha de imagens da visão do corte vertical, utilizado para edição do modelo de lentes JKL, no <i>sublevel</i> 750 RJKE. A- Corte mostrando os testemunhos de sondagem, com dados de litotipos. Azul- marga, amarelo- dolarenito, laranja- brecha dolomítica; B-Corte mostrando os teores Zn-Pb, representado pelo gradiente de cores na legenda. Os valores mínimos (0,01%) são apresentados em azul, enquanto os teores elevados ( $\geq 9\%$ ) são apresentados em vermelho; C- Corte mostrando a setorização das lentes J (azul), K (amarelo) e L (verde).....	25
Figura 6.1: Mapa geológico do <i>sublevel</i> 716 RJKF, confeccionado em ambiente <i>ArcGIS</i> a partir do mapeamento 1:500 feito à mão, localizado no Anexo 4.....	27
Figura 6.2: Mapa geológico do <i>sublevel</i> 750 RJKE, confeccionado em ambiente <i>ArcGIS</i> a partir do mapeamento 1:500 feito à mão, localizado no Anexo 5.....	28
Figura 6.3: Prancha de fotos das unidades encontradas nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE, da base para o topo. A- Amostra de mão do Membro Mocambo (MOC) mostrando o acamamento centimétrico, observável em campo no subnível 750 RJKE; B- Amostra de mão do Membro Mocambo (MOC), mostrando laminações milimétricas, semelhantes a uma clivagem ardosiana, no subnível 750 RJKE; C- Fotografia de porção de parede da Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL), mostrando um clasto de dolomito, de aproximadamente 1 m de largura, envolto de cimento dolomítico cinza, do subnível 750 RJKE; D- Amostra de mão de brecha dolomítica, com clastos de tamanhos variados, subarredondados a angulosos, envoltos do minério de esfalerita; E- Fotografia de porção de parede com colônia de estromatólitos colunares (círculo em vermelho), clasto componente da brecha dolomítica, no subnível 750 RJKE; F- Foto de porção de parede da Unidade Dolarenítica (DAR), do subnível 716 RJKF; G- Fotografia de detalhe do dolarenito, mostrando os clastos de dolomito subarredondado, indicado pela seta vermelha, da 716 RJKF; H- Fotografia de porção de parede de dolarenito mineralizado, com os grãos de dolomito envoltos da massa de minério, indicado pela seta vermelha, da 750 RJKE. dol- dolomito, sph-esfalerita.....	30
Figura 6.4: Fotografias de amostras de mão do minério com textura de cimentação. A - Amostra de dolarenito 716 RJKF, onde o minério de esfalerita cinza ocorre como cimento sustentando os clastos de dolomito; B - Amostra de dolarenito 750 RJKE amarela pálida com alto teor de Zn, de cimento de esfalerita substituindo cimento dolomítico; C - Amostra de dolarenito 716 RJKF com transição minério-estéril, exibindo halo de alteração hidrotermal que modifica localmente a cor do dolarenito (delimitado pelas linhas tracejadas vermelhas); D - Amostra de brecha dolomítica clasto suportada 750 RJKE onde os clastos de	

dolomito arredondados a prismáticos de tamanhos variados são sustentados por cimento de esfalerita. dol - dolomita, sph - esfalerita.....32

Figura 6.5: Fotografias de amostras de mão do minério com textura de sobreposição. A- Cristais de esfalerita e galena de dimensão maior que a do cimento, obliterando a textura de cimentação e substituição (750 RJKE); B- Vênula preenchida por galena cortando a rocha com textura de cimentação em suas bordas (716 RJKF); C- Vênulas preenchidas por esfalerita e dolomita esparítica, cortando a textura de cimentação. Notar vênulas milimétricas secundárias a vênula de espessura mais grossa (716 RJKF); D- Cavidade preenchida por cristais idiomórficos de galena em minério de cimentação, 750 RJKE. gn - galena, sph - esfalerita.....33

Figura 6.6: Fotografias do minério com textura de remobilização tectônica. A - Bolsão de minério de granulação grossa composto por galena, esfalerita, pirita, e dolomita espática e nível de *chert* (parede do *sublevel* 750 RJKE); B - Amostra de mão de pirita maciça preenchendo fratura (com plano paralelo a fotografia) na rocha encaixante DAR (*sublevel* 716 RJKF); C - Amostra de mão de fratura preenchida por agregados de cristais idiomórficos de dolomita espática, esfalerita e galena (de dolarenito, 750 RJKE). cht - *chert*, dol - dolomita, gn - galena, py - pirita, sph - esfalerita.....34

Figura 6.7: Principais feições encontradas na região de estudo do Bloco F. A- Acamamento sedimentar, com direção indicada pela caneta-escala em preto, e localização indicada pelas linhas em vermelho, da 750 RJKE; B- Falha do *sublevel* 716 RJKF, deslocando a lente de minério amarelo abaixo, e colocando em contato com porção de dolarenito estéril cinza acima.....35

Figura 6.8: Estereograma com Rede de Schmidt, mostrando a orientação do acamamento sedimentar (S0) nos *sublevel* 716 RJKF e 750 RJKE. Contém 21 medidas de pólos de acamamento e o polo da Falha Principal (amarelo), e a densidade de pólos correspondente (isolinhas de contorno).....35

Figura 6.9: Croquis digitalizados das relações de movimento das falhas no subnível 716 RJKF. A- Falha normal com deslocamento das unidades, mas mantendo a brecha dolomítica na base da parede (croqui da parede direita da TRM3). B- Falha normal com deslocamento pouco significativo das unidades, mantendo na base o contato gradual das unidades de brecha dolomítica e Unidade Dolarenítica (croqui da parede direita da TRM3), C- Falha normal levemente curvada, deslocando a lente de dolarenito estéril (croqui da parede esquerda da TRM10); D- Falha normal deslocando a lentes de dolarenito estéril superior, expondo duas lentes de minério distintas em um contato de falha (croqui da parede direita da TRM10).....36

Figura 6.10: Croqui do perfil de caminhamento da 716 RJKF GM2, lado esquerdo, entre as TRMs 2 e 5. O perfil é composto por uma falha normal à direita, de atitude 259/73, e uma segunda falha à esquerda, de mergulho semelhante, mas direção oposta.....37

Figura 6.11: Estereograma elaborado no *software Stereonet* com Rede de Schmidt, *sublevel* 716 RJKF. Polos de planos de 17 falhas, incluindo a Falha Principal (vermelho). Os polos foram separados em falha de 1ª ordem (verde), falhas de 2ª ordem retilíneas (preto) e falhas de 2ª ordem curvas (amarelo).....38

Figura 6.12: Croquis digitalizados das características de diferentes falhas na 750 RJKE. A- Falha de cavalgamento, onde a unidade de Brecha Dolomítica (BDOL) se encontra acima do dolarenito mineralizado (GM1, entre as TRMs 10 e 11); B- Fotografia local do cavalgamento, mostrando a brecha dolomítica sobreposto ao dolarenito, a falha indicada em vermelho e a lente de dolomito cinza escuro acima da zona de falha; C- Falha normal, contato brecha dolomítica e dolarenito de porção estéril, sem rejeito identificado (TRM 11 lado esquerdo); D- Falhas normais, com diferentes orientações e mergulhos, individualizando uma estrutura em graben com minério mais rico alojado no centro (Travessa TRM 11 lado direito).....39

Figura 6.13: Estereograma elaborado no *software Stereonet* com Rede de Schmidt, *sublevel* 750 RJKE. Polos de planos de 13 falhas, incluindo a Falha Principal (vermelho). Os polos foram separados em falha de 1ª

ordem (verde), falhas de 2ª ordem retilíneas (preto), falhas de 2ª ordem curvas (amarelo) e falha de cavalgamento (laranja).....40

Figura 6.14: Visão em planta das lentes JKL, antes e depois da edição local das lentes de minério. J - azul, K - amarelo, L - verde. A- Planta do *sublevel* 716 RJKF, com a disposição das lentes JKL pelo modelo implícito; B- Planta do *sublevel* 716 RJKF após a edição manual; C- Planta do *sublevel* 750 RJKE, com a disposição das lentes JKL pelo modelo implícito; D- Planta do *sublevel* 750 RJKE após a edição manual.....41

## Lista de siglas e abreviaturas

Zn - Zinco

Pb - Chumbo

Py - Pirita

Dol - Dolomito

Sph - Esfalerita

Gn - Galena

Pel - Pelóides

Ool - Oólitos

GM - Galeria maior

TRM - Travessa menor

DLRN - Dolarenito

DLRD -Dolorudito

MARG - Margas

## Resumo

O depósito de Zn-Pb de Morro Agudo, localizado ao sul da cidade de Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais, é considerado um dos principais produtores de zinco e chumbo do Brasil. Junto com as minas de Vazante, Extremo Norte, Ambrósia, e os depósitos de Fagundes e Bonsucesso, compõem a principal província zincífera brasileira, hospedada nas rochas carbonáticas do Grupo Vazante, e em particular à Morro Agudo, classificado no modelo de depósito do tipo *Mississippi Valley (MVT)*. O depósito de Morro Agudo está localizado estratigraficamente na Fm. Morro do Calcário, e seu minério está associado a dolarenitos, brechas dolareníticas e brechas dolomíticas. Os corpos de minério, limitados pela Falha Principal a NNE-SSW, possuem o comportamento de lentes *stratabound* e são nomeados em 5 zonas de textura e associação mineralógica comuns, da base ao topo: minério hospedado em brecha (GHI), minério hospedado em dolarenito rico em esfalerita (JK), minério hospedado em dolarenito rico em galena (L), minério silicificado recristalizado (M) e minério estratiforme superior substituído (N). Atualmente, a mina de Morro Agudo possui uma região pouco conhecida até então, denominada Bloco F, que possui um modelo exploratório de corpos de minério em lentes hospedadas em dolarenito denominado de lentes JKL. Contudo, começou a ser observado que o desenvolvimento das galerias não representa totalmente o modelo das lentes. Para atualizar o modelo exploratório e aumentar sua confiabilidade, foi necessário realizar um estudo de detalhe no Bloco F. À luz deste problema, desenvolveu-se o mapeamento geológico, a fim de entender a geologia estrutural e geometria e textura do minério de dois níveis chamados de *sublevel* 716 RJKF e 750 RJKE. O mapeamento foi utilizado como ferramenta para a atualização do modelo exploratório das lentes JKL, ambientado no *software Leapfrog Geo®* e elaborado a partir de dados de testemunhos de sondagem. Foram identificados três litotipos distintos dispostos, da base para o topo, pelo filito carbonoso do membro Mocambo, Unidade de Brecha Dolomítica, e Unidade Dolarenítica. O minério hospedado no dolarenito foi dividido em três tipos com base nas texturas e estruturas em cimento de granulação fina, vênulas e agregados de granulação média e falhas e fraturas de granulação grossa. Estes foram interpretados como produtos de três episódios distintos de mineralização. Ocorrem falhas NNW-SSE normais de 1ª e 2ª ordens relacionadas à Falha Principal e falhas secundárias subparalelas que afetam o minério e dividem o depósito em blocos de A a E. Foram identificadas falhas reversas de 2ª ordem, que podem sugerir um sistema de falhas reversas de escala regional. Foram gerados dois mapas geológicos em planta baixa, utilizados para guiar o remodelamento local das lentes JKL. Como o modelo implícito não é capaz de prever estruturas e características da rocha, que influenciam a disposição das lentes de minério do tipo MVT, foi importante aliar a modelagem ao mapeamento geológico. A união do modelamento implícito com o mapeamento de detalhe das galerias mostrou-se uma ótima ferramenta para dar maior confiabilidade ao modelo e contribuir de forma mais assertiva para as decisões de exploração das lentes de minério JKL no Bloco F da Mina de Morro Agudo.

Palavras-chave: Modelo exploratório de lentes de minério; Mapeamento geológico de galeria, Depósito Zn-Pb de Morro Agudo, Modelo *Mississippi Valley Type*; Formação Morro do Calcário, Grupo Vazante.

## Abstract

The Morro Agudo Zn-Pb deposit, located southern of the city of Paracatu, northwest of the state of Minas Gerais, is considered one of the main producers of zinc and lead in Brazil. Together with the Vazante, Extremo Norte, Ambrósia mines, and the Fagundes and Bonsucesso deposits, they make up the main Brazilian zinc-bearing province, hosted in the carbonate rocks of the Vazante Group, and in particular Morro Agudo, classified in the deposit model Mississippi Valley Type (MVT). The Morro Agudo deposit is stratigraphically located on Morro do Calcário Formation, and its ore is associated with dolarenites, dolarenitic breccias and dolomitic breccias. The orebodies, bounded by the Main Fault to NNE-SSW, have the behavior of stratabound lenses and are named in 5 zones of common texture and mineralogical association, from bottom to top: breccia-hosted ore (GHI), sphalerite-rich dolarenite orebody (JK), galena-rich dolarenite orebody (L), recrystallized silicified ore (M) and upper replaced stratiform ore (N). Currently, the Morro Agudo mine has a region little known until then, called Bloco F, which has an exploratory model of orebodies in lenses hosted in dolarenite called JKL lenses. However, it began to be observed that the development of the galleries does not fully represent the lens model. In order to update the exploratory model and increase its reliability, it was necessary to carry out a detailed study in Bloco F. In light of this problem, geological mapping was developed in order to understand the structural geology and geometry and texture of the two-level galleries called sublevel 716 RJKF and 750 RJKE. The mapping was used as a tool to update the exploratory model of the JKL lenses, set in the Leapfrog Geo® software and prepared from drill core data. Three distinct lithotypes were identified, arranged from bottom to top, by the carbonaceous phyllite of the Mocambo member, the Dolomitic Breccia Unit, and the Dolarenitic Unit. The ore hosted in dolarenite was divided into three types based on textures and structures in fine-grained cement, medium-grained venules and aggregates, and coarse-grained faults and fractures. These were interpreted as products of three distinct episodes of mineralization. Normal 1st and 2nd order NNW-SSE faults related to the Main Fault and subparallel secondary faults occur that affect the ore and divide the deposit into blocks from A to E. 2nd order reverse faults have been identified, which may suggest a reverse fault system on a regional scale. Two ground plan geological maps were generated, used to guide the local remodeling of JKL lenses. As the implicit model is not able to predict rock structures and characteristics, which influence the arrangement of MVT ore lenses, it was important to combine modeling with geological mapping. The union of the implicit modeling with the detailed mapping of the galleries proved to be a great tool to give greater reliability to the model and contribute more assertively to the decisions of exploration of JKL ore lenses in Bloco F of the Morro Agudo Mine.

Keywords: Exploratory model of ore lenses; Gallery Geological Mapping, Morro Agudo Zn-Pb Deposit, Mississippi Valley Type Model; Morro do Calcário Formation, Vazante Group.

## Capítulo 1: Introdução

O depósito de Zn-Pb de Morro Agudo, localizado a 50 km ao sul de Paracatu, noroeste de Minas Gerais, é considerado um dos principais produtores de zinco e chumbo do Brasil, e juntamente com as minas de Vazante, Extremo Norte, Ambrósia, e os depósitos de Fagundes e a recente descoberta de Bonsucesso, compõe a principal província zincífera brasileira (Dias *et al.*, 2015). O minério de Morro Agudo, composto por esfalerita ((Zn, Fe)S) e galena (PbS), se hospeda nos estratos dolomíticos do Grupo Vazante, de idade mesoproterozóica, formando corpos *stratabound* em dolarenitos, brechas dolareníticas e brechas dolomíticas da Fm. Morro do Calcário. A exploração do minério é feita pelo método de lavra subterrânea.

Diversas publicações abordam o caso do depósito de Morro Agudo em sua totalidade, desde seu contexto geotectônico, estratigráfico e modelo metalogenético, mas são poucos os trabalhos que abordam as novas áreas de exploração da mina. O Bloco F da mina de Morro Agudo vem sendo a grande promessa para a continuidade da mina, e para guiar as atividades de exploração, foi criado um modelo exploratório para as lentes presentes no Bloco F, as Lentes JKL. Entretanto, o modelo não possui a precisão que necessita, pois o modelo exploratório de lentes não confere totalmente com o visto nas galerias. Para contornar esta situação, é preciso realizar estudos locais sobre litotipos, contexto estrutural e de minério, para que o modelo exploratório seja atualizado localmente. A partir desta problemática, o escopo deste trabalho é realizar o mapeamento geológico de uma porção do Bloco F, ocupado pelas galerias de subnível em desenvolvimento 716 RJKF e 750 RJKE, visando a atualização do modelo exploratório das lentes de minério, chamadas JKL.

### 1.1 Histórico da mina Zn-Pb de Morro Agudo

O depósito foi descoberto na região de Paracatu por um fazendeiro local, na Fazenda Traíras, na qual observou galena e esfalerita em rochas calcárias aflorantes. Logo depois, iniciou-se uma operação de “mineração artesanal” na zona mineralizada (Votorantim Metais, 2017). O interesse em detalhar o depósito veio em 1973 pela METAMIG, empresa estatal do Governo do Estado de Minas Gerais, que realizou trabalhos de campo e sondagem exploratória, assim adquirindo os direitos minerários e implementando um programa de exploração completo (Neves, 2011, Votorantim Metais, 2017). Em 1974, foi criada a estatal Mineração Morro Agudo S.A., que possuiu os direitos minerários e foi privatizada posteriormente. No início da lavra, em 1988, estimava-se uma reserva de 17,5 Mt a 5,02% Zn e 1,67% Pb, mas os baixos teores resultantes e a variação no preço dos metais fizeram com que a operação fosse paralisada entre 1990 e 1995. Em 1998, a CMM (Companhia Mineira de Metais e parte do Grupo Votorantim), acionista da Mineração Morro Agudo, comprou as ações das demais companhias da sociedade, e em 2005 a unidade passou a se chamar Votorantim Metais Zinco S.A. (Votorantim Metais, 2017). Em 2017, por fim, a fusão entre Votorantim Metais e a Milpo, empresa de mineração e metalurgia peruana, marcou o início da atual Nexa Resources.

Misi *et al.*, (2005) estimaram a reserva de Morro Agudo em 11,7 Mt a 6,4% Zn e 2,2% Pb, mas posteriormente, o trabalho de Neves (2011) comunica que a Votorantim Metais, em meados de 2011, estimava uma reserva mineral de 18,3 Mt a 5,08% Zn e 1,75% Pb. Porém, em 2017, uma campanha exploratória adicionou as reservas mais 3,92 Mt@ 4% Zn e 1,45% Pb (Cordeiro *et al.*, 2018).

## 1.2 Localização e vias de acesso

A área de estudo está situada na região de Morro Agudo, zona rural da cidade de Paracatu, mesorregião Noroeste do estado de Minas Gerais. A região está a 50 km ao sul de Paracatu, a 283 km de Brasília, e a 450 km de Belo Horizonte.

O acesso para a mina de Morro Agudo se dá pela rodovia BR-040, das três origens citadas. Utilizando a cidade de Paracatu como referência, percorre-se 28 km da BR-040, sentido Belo Horizonte, e à esquerda, entrar na MG-702, estrada de terra mantida pela *Nexa Resources*, que liga a zona rural de Morro Agudo com a BR-040 (Fig. 1.1).

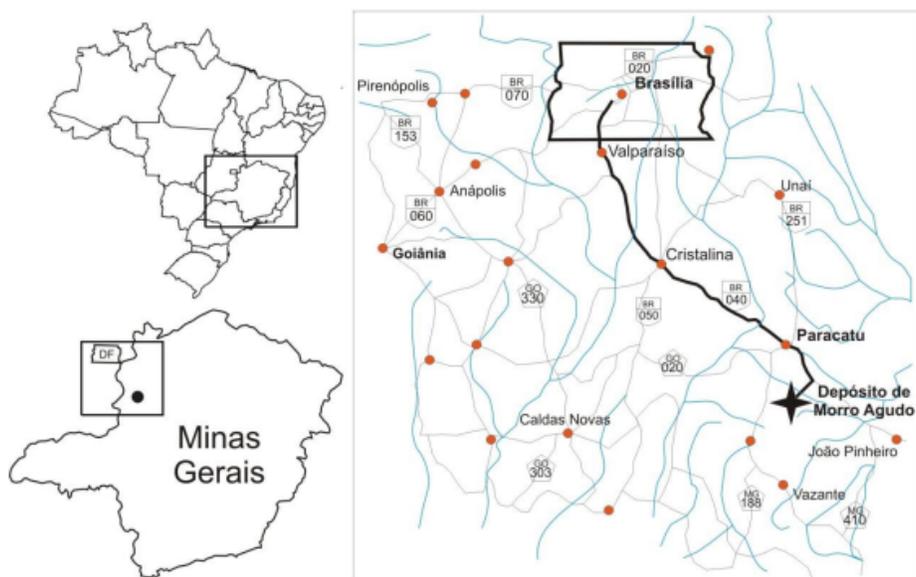


Figura 1.1: Mapa de localização do depósito de Morro Agudo, região noroeste do Estado de Minas Gerais. A mina está ao sul da cidade de Paracatu e a figura representa a distância com relação a Brasília. De [Neves \(2011\)](#).

As galerias abordadas neste estudo estão situadas na região denominada Bloco F, uma das novas regiões em exploração de Morro Agudo, e um grande expoente em teor e tonelagem de minério. O Bloco F, localizado à NW do complexo de galerias, é atualmente a região de maior profundidade da mina e seu desenvolvimento está programado para se estender, tanto em extensão, quanto em profundidade. Para acessar esta região, é necessário utilizar as rampas principais, onde há fluxo de pessoas, equipamentos e materiais. A área de estudo está indicada na [Figura 1.2](#).

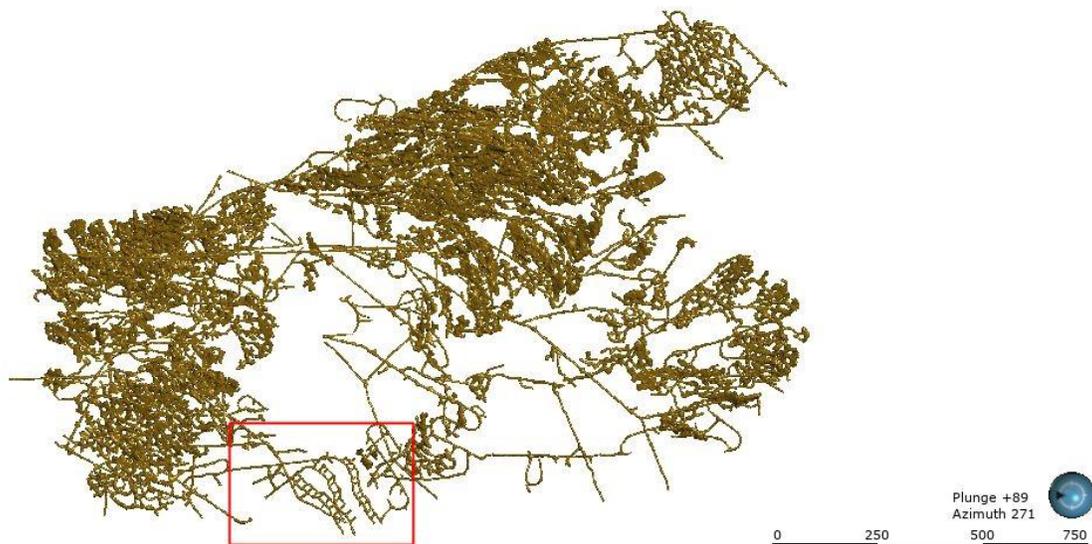


Figura 1.2: Vista em planta do interior da mina Zn-Pb de Morro Agudo, com a área do Bloco F indicada pelo polígono em vermelho.

## Capítulo 2: Objetivos

O presente projeto tem o objetivo de atualizar o modelo exploratório das três lentes mineralizadas J, K e L do minério Zn-Pb da mina de Morro Agudo na região do Bloco F. Para atingir o objetivo geral, desenvolveu-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o mapeamento geológico de detalhe (1:500) das galerias 716 RJKF e 750 RJKE do Bloco F;
- Caracterizar as texturas das lentes de minério, chamadas doravante de JKL;
- Caracterizar estruturas posteriores, que afetam e deslocam o minério;
- Atualizar o modelo exploratório de lentes, ajustando a disposição e geometria das lentes JKL;
- Contribuir para a confiabilidade do modelo exploratório.

## Capítulo 3: Contexto Geológico Regional

### 3.1 Província Tocantins

A Província Tocantins, classificada como uma mega entidade litotectônica neoproterozóica por Almeida *et al.*, (1977, 1981), foi constituída no ciclo orogênico Brasileiro/Pan-Africano, no período de 1,0-0,54 Ga (Dardenne, 2000; Valeriano *et al.*, 2004), a partir da colisão dos Crátoms Amazônico, São Francisco/Congo e pelo Bloco Paranapanema, que veio a constituir o Supercontinente Gondwana (520Ma) (Urung, 1992). Apresenta direção N-S, aproximadamente 2000 km de extensão e 800 km de largura, e se divide em três domínios: as Faixas Paraguai e Araguaia a oeste, e a Faixa Brasília, a leste (Fig. 4.1; Pimentel e Fuck, 1992; Fuck *et al.*, 1993; Valeriano *et al.* 2008; Hasui *et al.*, 2012).

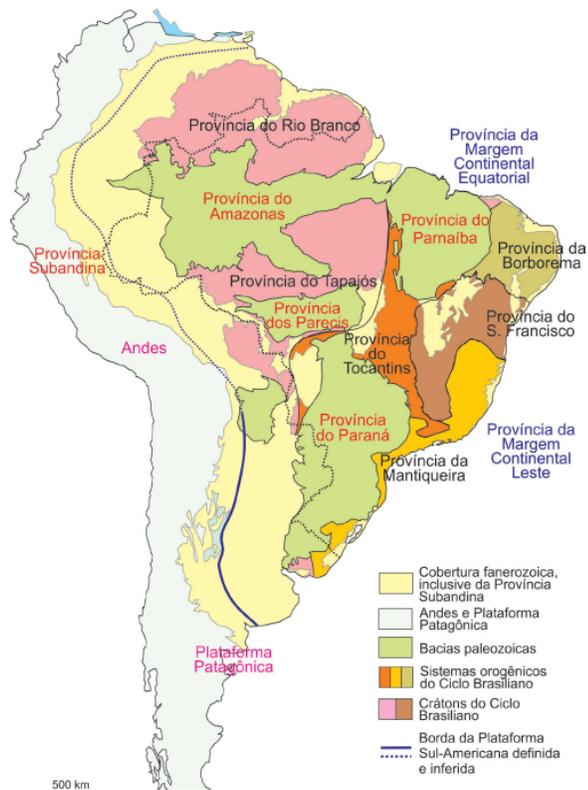


Figura 3.1: Compartimentação geológico-estrutural do Brasil. Província Tocantins identificada na cor laranja. [Hasui et al., \(2012\)](#).

### 3.2 Faixa Brasília

A Faixa de Dobramentos Brasília é classificada como um orógeno colisional neoproterozóico, localizado às margens oeste e sudoeste do Cráton São Francisco e compreende terrenos arqueanos a neoproterozóicos ([Almeida, 1967, 1977; Dardenne, 2000](#)).

[Fuck et al., \(1993, 1994\)](#) subdivide a Faixa Brasília, na região oeste do Cráton São Francisco, segundo um decrescimento no grau metamórfico de leste para oeste em: Zona Cratônica, englobando os Grupos Bambuí e Paranoá; Zona Externa, com os Grupos Canastra, Vazante, Ibiá e Serra da Mesa; e Zona Interna, com o Grupo Araxá e porções do embasamento. Posteriormente, [Fuck et al., \(2005\)](#) propõe uma nova compartimentação à Faixa Brasília, com base nas diferentes características tectônicas, delimitadas na: I - Cinturão de Dobras e Empurrões; II - Núcleo Metamórfico; III - Maciço de Goiás; IV - Arco Magmático de Goiás ([Fig. 3.2B](#)). Outra divisão considerável é a proposta por [Valeriano et al., \(2004\)](#), na qual utiliza da Megaflexura dos Pirineus, grande estrutura E-W que limita dois domínios tectônicos com estilos metamórfico-deformacionais distintos: Faixa Brasília Setentrional (FBS), com orientação NE, constituída pelos Grupos Paranoá e Araí, além do Arco magmático de Goiás e o Maciço de Goiás, e a Faixa Brasília Meridional (FBM), com orientação NW, formada pelos Grupos Canastra, Vazante, Ibiá, Araxá e Andrelândia ([Dardenne, 2000; Valeriano et al., 2004; Baia, 2013](#)).

A área de estudo está inserida na Zona Externa da Faixa Brasília, no domínio do Cinturão de Dobras e Empurrões, ou Faixa Brasília Meridional, caracterizado por um cinturão de dobras e cavalgamentos com

vergência para leste (Fuck *et al.*, 2005; Figura 3B), próximo aos limites do Cráton São Francisco. Dardenne (2000) caracteriza a região por unidades metassedimentares dobradas e metamorizadas em baixo grau.

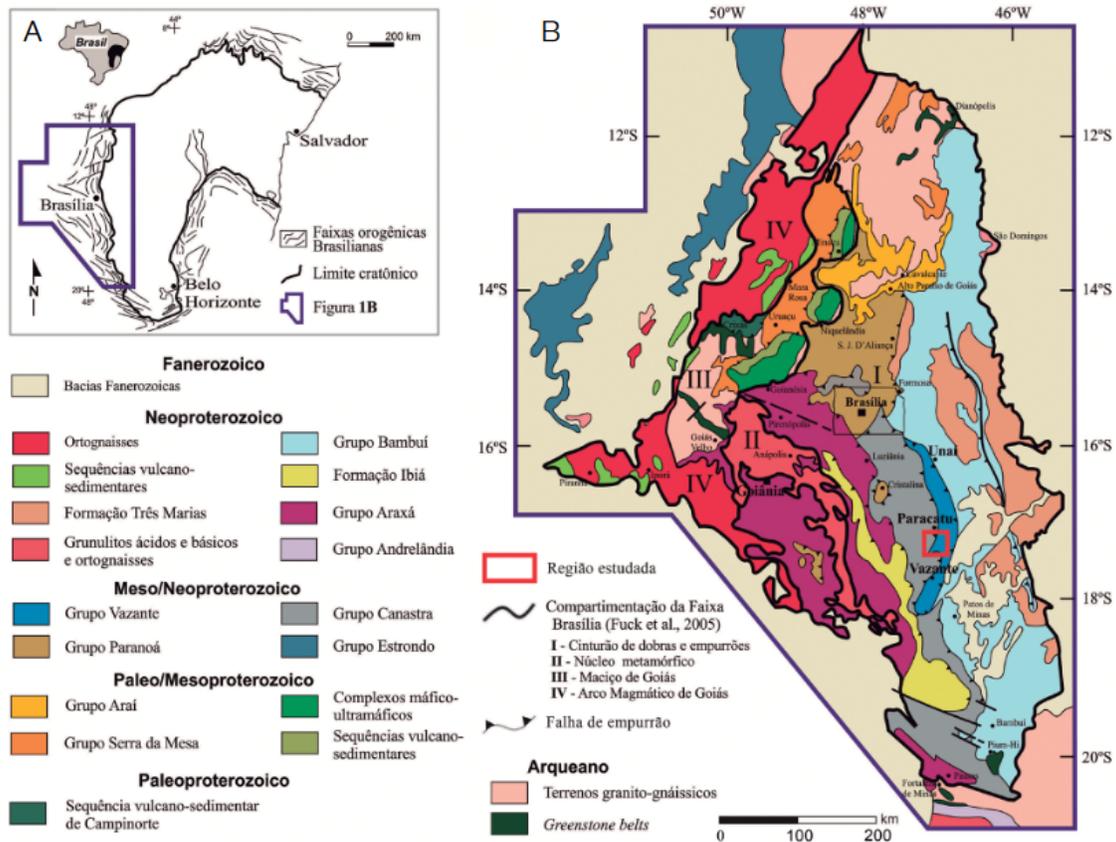


Figura 3.2: Mapa tectônico e localização da área de estudo em vermelho. A- Localização da Faixa Brasília no contexto do Cráton São Francisco (limite cratônico compilado de Alkmim e Teixeira (2017)); B- Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília (Dardenne, 2000) e compartimentação tectônica proposta por Fuck *et al.* (2005). Extraído de Sotero *et al.* (2019).

### 3.3 Grupo Vazante

#### 3.3.1 Contexto Geotectônico

O Grupo Vazante ocorre na direção N-S, com aproximadamente 250 km de comprimento e 40 km de largura, tendo como limite norte a cidade de Unaí, e Coromandel como limite sul. Possui contato tectônico por meio de falhas de empurrão com o Grupo Canastra a oeste, e com o Grupo Bambuí a leste, podendo também ser dividido entre domínios norte e sul, separados pela inflexão do Rio Escuro (Dardenne *et al.*, 1997; Dardenne, 2000, Figura 3.3). Compreende em sua totalidade rochas carbonáticas plataformais e pelitos metamorizados em fácies xisto-verde, na qual Almeida (1993), Fuck *et al.*, (1993, 1994) e Dardenne (2000) colocam como produtos de uma sedimentação anômala em uma zona de rápida subsidência, localizado em ambiente de margem passiva continental. Em contrapartida, autores como Martins Neto & Alkmim (2001) e Alkmim & Martins Neto (2012) consideram que a sedimentação do Grupo Vazante é correlata à sedimentação do Grupo Bambuí, sendo então associada a uma bacia de *foreland*.

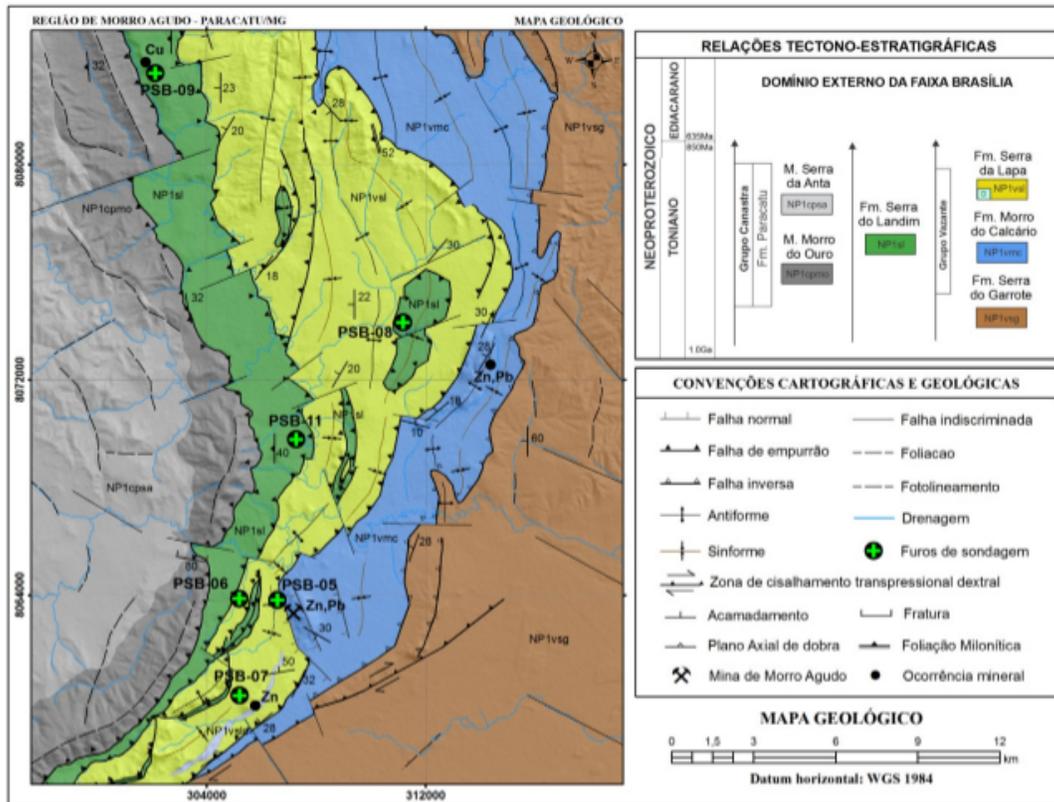


Figura 3.3: Mapa geológico simplificado do Grupo Vazante, região de Morro Agudo. O mapa evidencia as falhas de empurrão que limitam a faixa em E e W, além de pontuar as regiões com ocorrências de depósito mineral. O local de estudo está indicado pelo símbolo referenciado na legenda. Modificado de [Dias et al. \(2018\)](#).

### 3.3.2 Estratigrafia

Inicialmente, as rochas da Formação Vazante foram incluídas no Grupo Bambuí por [Barbosa \(1965\)](#), [Braun \(1968\)](#), [Dardenne \(1972\)](#) e [Madalosso e Valle \(1978\)](#), mas por não reconhecer características que assegurem esta relação, [Dardenne \(1979, 1981\)](#) separou as duas formações, entre a sequência marinha pelito-carbonática de margem passiva da Formação Vazante, e a sedimentação de *foreland* do Grupo Bambuí. Os trabalhos que seguiram levaram a divisão da Formação Vazante em Membro Morro do Pinheiro e Membro Pamplona, além da definição da Formação Lapa ([Rigobello et al., 1988](#)), sobreposta aos membros citados. Contudo, [Dardenne \(2000\)](#) redefiniu a Formação Vazante, elevou a nível de Grupo e a dividiu em sete formações, da base para o topo: Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Lapa.

Trabalhos recentes no Grupo Vazante, como de [Rodrigues et al., \(2012\)](#), [Misi et al., \(2014\)](#) e [Pinho et al., \(2017\)](#), buscaram atualizar o modelo estratigráfico de [Dardenne \(2000\)](#) ao indicar a ocorrência de uma inversão tectônica, atestando idades mais jovens das formações de base do Grupo. Com isso, as Formações Santo Antônio do Bonito e Rocinha passaram a integrar o Grupo Bambuí, e a coluna estratigráfica reformulada de [Dardenne \(2000\)](#) passou a ser utilizada como exposta na [Figura 3.4](#).

Grupo	Formação	Membro	Descrição litológica		
Vazante	Serra da Lapa	Serra da Lapa	Ardósias carbonatadas cinzas e lentes de dolomitos		
		Serra do Velosinho	Ardósias carbonatadas pretas, ritmitos e diamictito		
	Morro do Calcário		Bioherma estromatolítica, fácies de brechas e dolarenitos, pelitos carbonáticos carbonosos com fácies de diamictito (mocambo)		
	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		
		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		

Figura 3.4 Coluna estratigráfica do Grupo Vazante, modificado de Dardenne (2000), por Sotero *et al.*, (2019). As unidades mineralizadas de Morro Agudo estão inseridas na Fm. Morro do Calcário, circundada pelo polígono vermelho.

Da base para o topo da sequência estratigráfica do Grupo Vazante, temos as formações:

- Formação Lagamar

Base composta por conglomerados, quartzitos, ardósias e metassiltitos do Membro Arrependido. Acima, o Membro Sumidouro, com brechas intraformacionais de composição dolomítica, calcários acinzentados, estratificados e com intercalações de brechas lamelares; e ao topo dolomitos de bioherma estromatolítica gênero *Conophyton metula* (Cloud e Dardenne, 1973), na qual Dardenne *et al.*, (1998) indica idade de deposição entre 1,35 a 0,95 Ga.

- Formação Serra do Garrote

Sequência metapelítica escura, carbonoso, finamente laminado, com intercalações de ritmito e lentes de metarenito de granulação fina a média. A formação encontra-se intensamente deformada (Baia, 2013; Sotero *et al.*, 2019).

- Formação Serra do Poço Verde

Rigobello *et al.*, (1988) subdivide a Formação Serra do Poço Verde em quatro membros, da base para o topo: Membro Morro do Pinheiro Inferior, composto por dolomitos com ocorrência de lâminas microbiais, dolarenitos, brechas e lentes de estromatólitos; Membro Morro do Pinheiro Superior, de

dolomitos cinza com *bird-eyes*, dolarenitos, margas, filitos carbonosos e esteiras estromatolíticas (Dardenne, 2000); Membro Pamplona Inferior, que aloja o minério de zinco silicatado (willemita) da mina de Vazante, com folhelhos carbonáticos, ardósia carbonosa e dolomitos com laminações microbiais (Dardenne, 2000); Membro Pamplona Intermediário, com dolomitos cinza a róseo, com laminações algais intercalados com dolarenito, brechas lamelares, estromatólitos colunares e lentes de folhelho.

- Formação Morro do Calcário

Caracterizada, segundo Dardenne (2000), por dolomitos de construção estromatolítica de ambiente recifal, dolarenitos oolíticos, oncolíticos e doloruditos, além de brechas dolomíticas intraformacionais. A Formação Morro do Calcário aloja o minérios sulfetado de zinco e chumbo (esfalerita e galena) explorados pelas minas de Morro Agudo, Ambrósia e Fagundes, e futuramente pela mina de Bonsucesso.

- Formação Serra da Lapa

Formação constituída por pelitos carbonáticos e carbonosos, com lentes de dolomitos laminados, diamictitos, dolarenito e metarenito (Dardenne, 2000; Sotero *et al.*, 2019). Sotero *et al.*, (2019) complementa que o contato com a Formação Morro do Calcário é erosivo, mas costuma ser apenas interpretado como um contato tectônico por falha de empurrão, com falha normal posterior. Este contato é visto na porção oeste da mina de Morro Agudo.

### 3.3.3 Geocronologia

Os primeiros registros das idades de deposição vem por Cloud e Dardenne (1973) e Dardenne (1976), onde indicam uma idade de intervalo 1,35 - 0,95 Ga, Meso a Neoproterozoica, dada a ocorrência de estromatólitos *Conophyton metula* nas brechas dolomíticas. Posteriormente, Misi *et al.*, (1997) e Azmy *et al.*, (2001) indicam uma sedimentação muito mais jovem, entre 670 - 600 Ma. Outros estudos geocronológicos, como datação nos folhelhos basais da Fm. Lapa, realizados por Azmy *et al.*, (2008), encontraram idades no intervalo 0,993±46 - 1,1±77 Ga, por datação Re-Os em rocha total; já no método U-Pb em zircão detrítico, a idade resultante foi 0,988±15 Ga, sugerido pelos autores como a idade máxima deposicional do Grupo Vazante. Estudos recentes no Grupo Vazante sugerem idade essencialmente Mesoproterozóica, 1,3 - 1,1 Ga, como no trabalho de Fernandes *et al.*, (2019).

### 3.3.4 Contexto Estrutural

O Grupo Vazante é compartimentado em dois domínios, norte e sul, distintos em características estruturais, estratigráficas e metalogenéticas, separados pela inflexão do Rio Escuro e limitados em suas margens por falhas regionais de tendência N-S, originadas durante o rifteamento do Cráton São Francisco (Dardenne *et al.*, 1997; Dardenne, 2000). O domínio sul possui direção NE-SW, e a norte direção NNE-SSW, e todo domínio é composto por falhas de empurrão N-NE, reativadas durante o evento Brasileiro, compondo também falhas inversas oblíquas e zonas de cisalhamento sinistrais, além de dobras assimétricas com vergência para E, ao Cráton São Francisco (Dardenne, 2000; Sotero *et al.*, 2019). As unidades são estruturadas em faixas alongadas de direção preferencial NNE-SSW, com mergulho para NW (Sotero, 2019).

### 3.3.5 Recursos Minerais

Os depósitos conhecidos no Grupo Vazante possuem fortes controles estratigráficos e estruturais, influenciando na gênese e comportamento das mineralizações (Monteiro, 2002; Dardenne, 2000; Baia, 2013). As commodities principais exploradas na região são o zinco (Zn) e o chumbo (Pb), sendo eles sulfetados ou não. Os depósitos zincíferos sulfetados correspondem às minas de Morro Agudo, Ambrósia, Fagundes e Bonsucesso, tendo como minerais de minério a esfalerita ((Zn, Fe)S) e galena (PbS), e já o depósito silicificado da mina de Vazante possui como principal mineral de minério a willemita (Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), além da presença de esfalerita, galena e prata (Ag).

## Capítulo 4: Contexto Geológico Local

### 4.1 Estratigrafia

O depósito de Morro Agudo está hospedado nas rochas da Fm. Morro do Calcário, de composição dolomítica e granodecrescência ascendente (Dardenne *et al.*, 1998). Situa-se no flanco oeste do bioherma estromatolítico do Morro do Calcário, onde a mineralização é essencialmente disseminada, e controlada por uma falha normal sinsedimentar de orientação N10-20W (Dardenne e Schobbenhaus, 2001).

A formação local é representada por unidades de doloruditos, dolarenitos e dolomitos laminados, oolíticos a oncolíticos, com presença de *bioherma* estromatolítico (Cordeiro *et al.*, 2018). Madalosso e Vale (1978) classificaram a Fm. Morro do Calcário como produto de uma sedimentação parcial de pós-recife, configurando um ambiente de transição entre plataforma carbonática e mar aberto. Romagna e Costa (1988) separaram as unidades locais, da base ao topo, como na Figura 4.1.

#### 4.1.1 Membro Mocambo (MOC)

Representado por um filito cinza escuro, composto por dolomita e argila muito finos, rico em material carbonoso. Aldis *et al.*, (2021) definem como um filito preto e portador de pirita e barita. Já Sotero (2019) descreve como um pelito preto, laminado e carbonoso. Ocorre com 5-15 m de espessura na base das zonas mineralizadas internas à Fm. Morro do Calcário.

#### 4.1.2 Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL)

Brechas intraformacionais com clastos angulosos de dolomito maciço que alcançam 2m de largura, também por dolomito laminado e dolomito estromatolítico, envoltos do cimento dolomítico de granulação muito fina. Estas brechas, apesar de se apresentarem estéreis em maior parte de sua extensão, o contato superior da unidade abriga a unidade basal das mineralizações de Morro Agudo.

#### 4.1.3 Unidade de Brecha Dolarenítica (BDAR)

Brecha sedimentar cinza claro a médio, com clastos de dolarenito angulosos a subarredondados (< 10 cm), dolomito laminado e maciço, envoltos por um cimento de dolarenito de granulação fina a média. Esta unidade possui pouca continuidade lateral e marca a transição das brechas para Unidade Dolarenítica e hospeda os maiores teores de Zn do depósito.

#### 4.1.4 Unidade Dolarenítica (DAR)

Dolarenito cinza, com grãos de < 2 cm de largura, oólitos e oncólitos bem selecionados e subarredondados, cimentados por dolomita, e às vezes quartzo. Há também nesta unidade ocorrência de camadas paralelas e nódulos de *chert*. Por conta de sua granulação grosseira, é a unidade que abriga cerca de 80% das mineralizações, e é a unidade mais volumosa do depósito.

#### 4.1.5 Sequência Argilo-Dolomítica (SAD)

Marga dolomítica, intercalado com argilito, de cor predominante cinza escuro. As laminações possuem espessura milimétrica a centimétrica, além de ocorrências de sulfetos laminados, *chert* e barita. Esta unidade é predominantemente estéril, e quando mineralizada, é inexpressiva. Esta unidade pertence à formação de topo do Grupo Vazante, a Fm. Serra da Lapa.

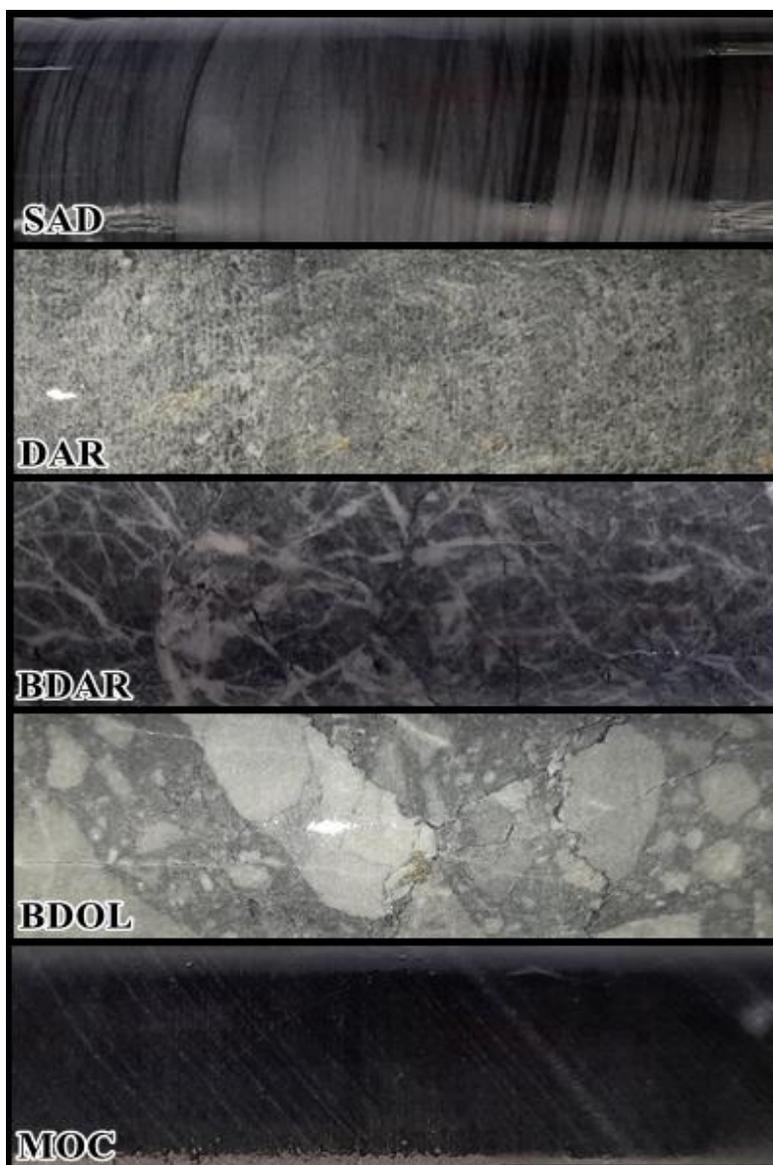


Figura 4.1: Litotipos de testemunhos de sondagem, mostrando a sequência litoestratigráfica da mina de Morro Agudo. Sequência argilo-dolomítica (SAD)- Intercalações de dolomita com material siliciclástico, formando laminações

milimétricas; Unidade Dolarenítica (DAR)- Textura granular maciça, com presença evidente de clastos finos; Unidade de Brecha Dolarenítica (BDAR)- Brecha intensamente fraturada, com preenchimento de vênulas por dolomita e quartzo; Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL)- Brecha intraformacional, com clastos de dolomita em tamanhos variados, envoltos de cimento dolomítico; Membro Mocambo (MOC)- Laminações milimétricas causadas por deposições de material dolomítico muito fino, argila e matéria orgânica.

## 4.2 Geologia Estrutural

Nas proximidades da mina de Morro Agudo, há uma zona de cisalhamento transpressional dextral, de direção NE-SW, caracterizada por uma série de lineamentos de mergulho aproximado 40 W (Matos, 2016 *apud*. Sotero, 2019). Segundo Sotero (2019), a Formação Morro do Calcário é alongada na direção NNE-SSW, estruturada por sinformes suaves a abertas e falhas normais.

As unidades de Morro Agudo são limitadas por uma falha normal de deslizamento oblíquo denominada Falha Principal, com mergulho entre 340-300/75° nas proximidades da superfície, e 280-300/60° em profundidade (Cordeiro *et al.*, 2018). Esta falha expressiva, segundo Cordeiro *et al.*, (2018), marca o contato brusco entre a brecha dolomítica estéril em N-NE, dos dolarenitos e brechas mineralizadas em S-SW, por conta do evento neoproterozóico Brasileiro, durante a colisão dos crátons São Francisco e Amazônico (Fig. 4.2). A continuidade lateral das unidades mineralizadas foi comprometida, influenciada por quatro falhas normais paralelas, pouco espaçadas e com deslizamento oblíquo, dividindo o depósito em cinco blocos denominados de A a E, apresentados na Figura 4.2 (Rube e Monteiro, 2010).

Acerca de evidências de deformação, segundo Dardenne (2000), apesar da sobreposição de eventos de deformação, hidrotermalismo e metamorfismo, as relações estratigráficas permaneceram bem preservadas. Dardenne e Schobbenhaus (2001) para as unidades de Morro Agudo, afirmam que não apresentam características de dobras, com exceção de um dos corpos de minério, na qual interpreta-se como dobra sinsedimentar.

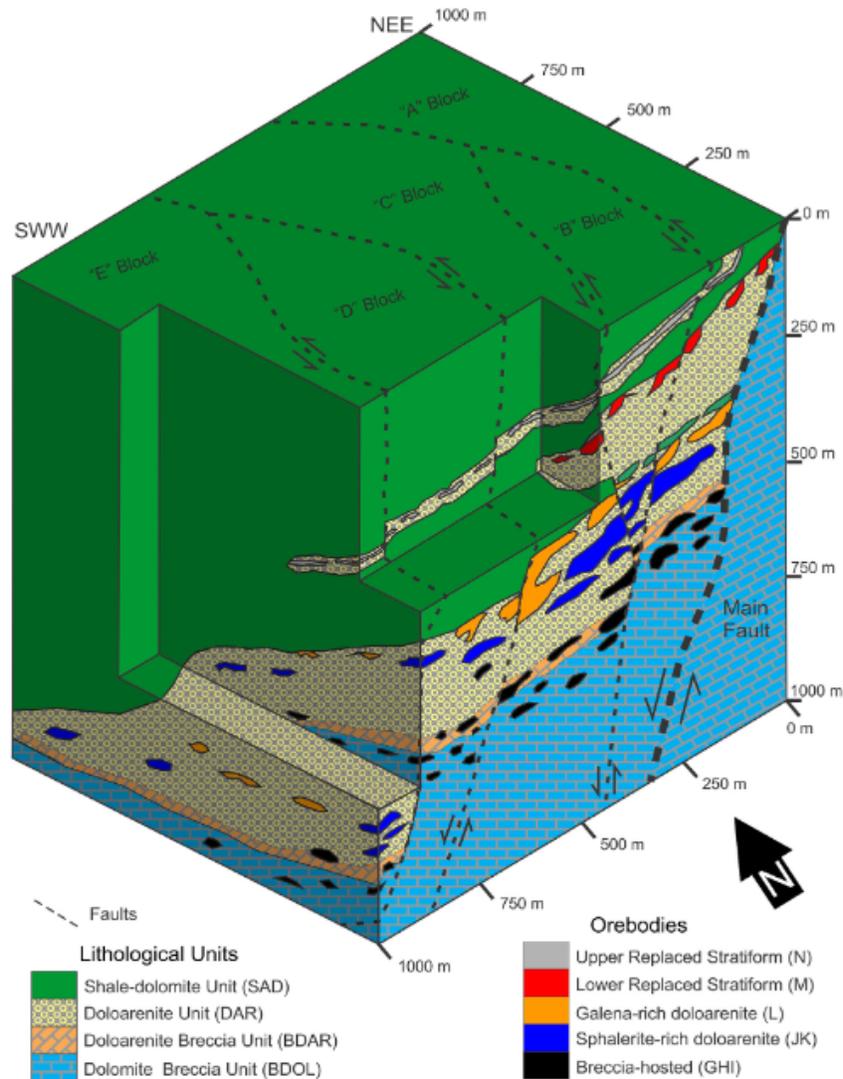


Figura 4.2: Bloco diagrama do depósito de Morro Agudo, mostrando a geometria dos corpos de minério e como são afetadas pela Falha Principal (*Main Fault*) e falhas subsidiárias paralelas. Ilustra a maior concentração das lentes de minério dentro da Unidade Dolarenítica (DAR) e o afinamento progressivo das lentes de minério acompanhando o mergulho das falhas. As galerias de estudo se concentram nos níveis dos minérios JK e L. Extraído de [Cordeiro et al. \(2018\)](#).

### 4.3 Corpos Mineralizados

Os corpos mineralizados tem forma de lentes *stratabound*, controlados estratigraficamente pelo dolarenito (Fig. 4.2) A dimensão total das lentes possuem 1,7 km de extensão, 1,2 km de espessura, de lentes de minério empilhadas, com espessura de até 10 m, intercalados por pacotes de estratos estéreis de dolarenito e brechas (Cordeiro et al., 2018).

Os principais minerais de minério do depósito de Morro Agudo são esfalerita ((Zn, Fe)S) e galena (PbS), ocorrendo pirita (FeS<sub>2</sub>) subordinada e minerais de ganga, compostos por barita (BaSO<sub>4</sub>), dolomita (Ca, Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), calcita (CaCO<sub>3</sub>) e quartzo (SiO<sub>2</sub>) (Cunha et al., 2000).

O sistema de falhas presente na mina de Morro Agudo afetou diretamente a disposição das lentes de minério *stratabound*. Cordeiro et al., (2018) e Aldis et al., (2021) pontuam que as lentes de sulfeto tornam-se

menos espessas e com teores de esfalerita e galena gradualmente mais baixas, ao qual se distancia da Falha Principal. Estes corpos são originalmente empilhados em oito lentes *stratabound* paralelas, mas na configuração atual, as lentes foram deslocadas pelas falhas normais, interrompendo a continuidade lateral que possuíam.

Os corpos de minério foram nomeados por [Romagna e Costa \(1988\)](#), e revisitado por [Cordeiro et al., \(2018\)](#), da base para o topo, de G a N, e são definidos em cinco zonas com texturas e mineralogia comuns, apresentadas na [Figura 4.3](#):

#### *4.3.1 Minério hospedado em brecha (GHI)*

Definido por lentes de sulfetos múltiplas e descontínuas, localizadas na base do depósito, constituem galena, esfalerita e pirita média a grossa, que substituem o cimento carbonático da brecha, além de preencher veios e fraturas tardias. Estas lentes possuem pouca continuidade lateral, e compõem 13% dos recursos minerais do depósito, e estão hospedadas dentro da Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL). Dentro da brecha dolomítica, as lentes GHI, conhecidas também como Basal, comumente separam dois domínios, o primeiro constituído de dolomito micrítico cinza escuro, do cimento de dolomita esparítica branca, podendo ocorrer dentro dos domínios mistos ou separadamente. Os teores estimados para minerais de minério por [Neves \(2011\)](#) indicam 1,5% Sph, 1,5% Ga e 2% Py.

#### *4.3.2 Minério hospedado em dolarenito rico em esfalerita (JK)*

Um corpo sulfetado com dimensões de 9 m de espessura e 1,3 km de comprimento, rico em esfalerita, representa 54% dos recursos de Morro Agudo, com 4,5% Zn e 2,5% Pb de teores estimados. É um corpo de minério com altas quantidades de esfalerita fina, com presença de galena fina e dolomita esparítica branca. Pode apresentar bandas centimétricas de dolarenito cimentado com esfalerita, intercaladas com bandas cimentadas com galena, mas comumente aparece como grandes lentes de dolarenito cimentado com esfalerita fina, podendo substituir os clastos, oóides e oncóides, e o cimento dolomítico. Neste domínio, também se observa o preenchimento de veios e fraturas tardias com esfalerita, galena e pirita mais grosseiros, acompanhados da dolomita esparítica.

#### *4.3.3 Minério hospedado em dolarenito rico em galena (L)*

O corpo de minério rico em galena representa 21% dos recursos minerais de Morro Agudo, com espessura e continuidade lateral semelhante ao corpo JK, 4 m de espessura e 1,3 km de extensão. Hospedado em dolarenito de granulometria fina a média, possui contato de topo com a sequência argilo-dolomítica (SAD) e é caracterizado por cimentação de galena muito fina e esfalerita subordinada, ocorrendo de forma disseminada ou como agregados intercalados com dolomita micrítica. Diferente do corpo JK, onde a esfalerita pode substituir o cimento e os clastos, neste caso a galena substitui o cimento de forma destrutiva, podendo romper completamente as estruturas, e a esfalerita frequentemente substitui os clastos. Neste nível também se observa o preenchimento de veios e fraturas tardias com esfalerita, galena e pirita grosseiros. Os teores estimados para minerais de minério por [Neves \(2011\)](#) indicam 2,5% Sph, 5% Ga e 1,5% Py.

#### *4.3.4 Minério silicificado recristalizado (M)*

Este corpo tem em média 3m de espessura, representando 2% dos recursos e um teor de Zn médio de 3%. A ocorrência mineral se dá por uma esfalerita disseminada na porosidade, podendo ocorrer bolsões e veios discordantes de galena e esfalerita. As principais características deste corpo são a presença de silicificação como pontas escuras e a orientação vertical do corpo, identificada como “dente de tubarão”. Os teores estimados para minerais de minério por [Neves \(2011\)](#) indicam 3,5% Sph, 1,5% Ga e 3% Py.

#### *4.3.5 Minério estratiforme superior substituído (N)*

Este último domínio mineral está hospedado dentro de uma lente de dolarenito, com cerca de 5 m de espessura, dentro da sequência argilo-dolomítica (SAD) e representa 10% dos recursos minerais explorados. É um corpo composto por esfalerita concentrada em estratos, intercalados por um chert de cores preto, verde e vermelho, além de uma grande concentração de pirita maciça. Foram identificadas dobras centimétricas neste corpo, interpretados como uma queda singenética, feição típica de sistemas SEDEX ([Dardenne e Schobbenhaus, 2001](#)). Os teores estimados para minerais de minério por [Neves \(2011\)](#) indicam > 5% Sph, 4,5% Ga e 4% Py.

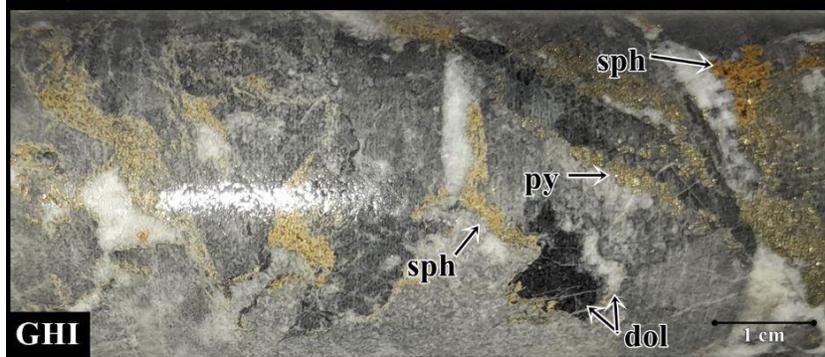


Figura 4.3: Sequência das lentes de minério *stratabound*, do topo à base, apresentando as principais características das mineralizações. N- esfalerita estratiforme, com intercalações de *chert* (vermelho) e pirita maciça; M- esfalerita disseminada entre a porosidade; L- galena e esfalerita disseminada na porosidade e substituindo o cimento dolomítico. O alto teor de galena destrói a estrutura primária do dolarenito; JK- esfalerita e galena subordinada, substituindo o cimento dolomítico e ocupando a porosidade do dolarenito, preservando clastos e por vezes substituindo totalmente os aloquímicos; GHI- esfalerita, galena e pirita remobilizados, ocupando fraturas e espaços vazios entre os clastos da brecha dolomítica. cht- chert, dol- dolomita, gn- galena, - py- pirita, sph- esfalerita

#### 4.4 Gênese do depósito

A origem das mineralizações de Morro Agudo não possui definição concreta. [Neves \(2011\)](#) indica como um dos principais problemas abordados pelos autores ao longo dos anos a discrepância entre os corpos mineralizados e suas texturas, além de colocarem em cheque o caráter epigenético das mineralizações ([Dardenne, 2000](#); [Misi, 1999](#); [Monteiro, 2000](#); [Cunha et al., 2000](#)).

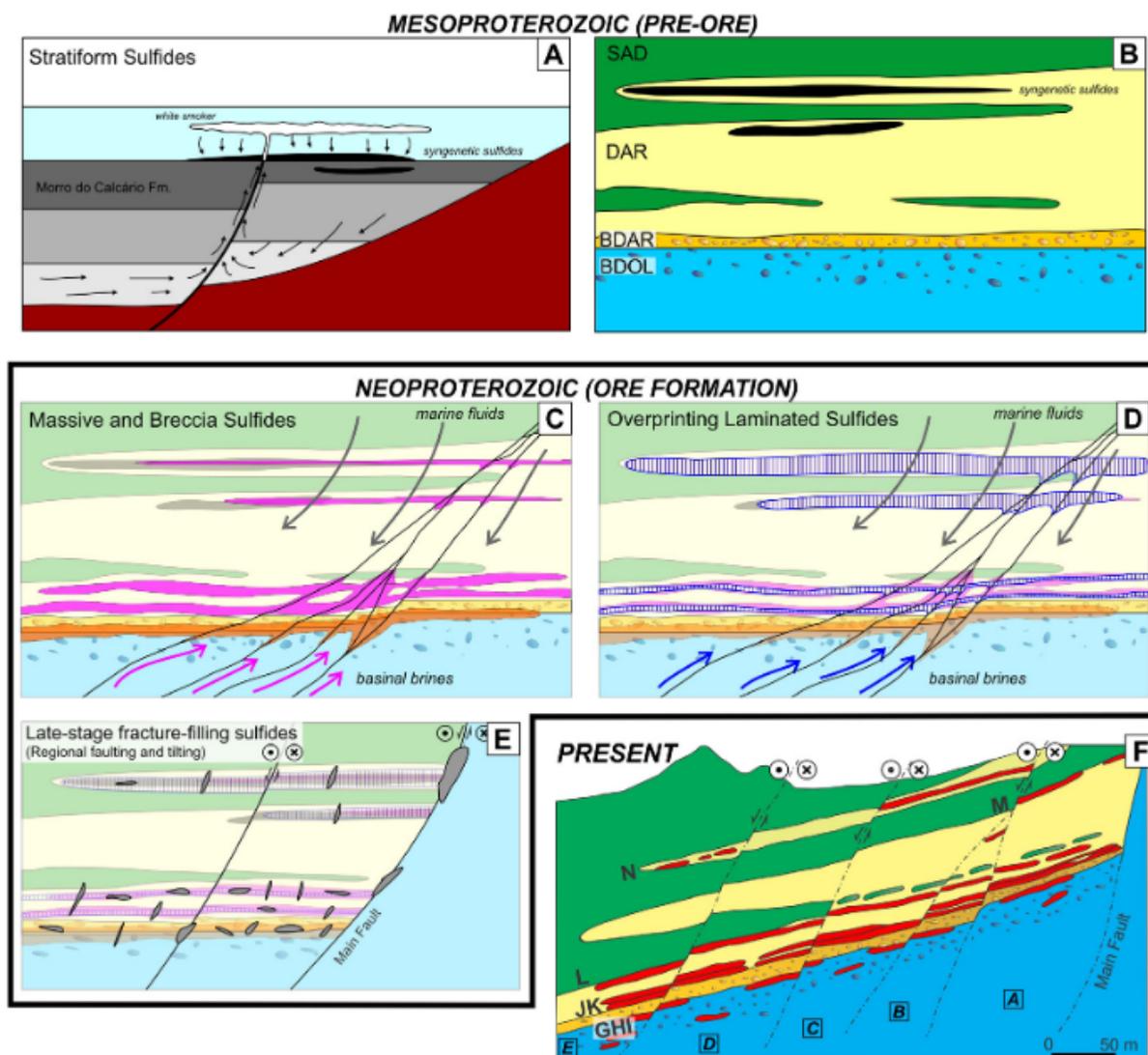
[Dardenne \(1979\)](#) questionou a gênese das mineralizações de Morro Agudo a partir das características do corpo N, pois sua composição com presença de pirita maciça e intercalações de chert, esfalerita, quartzo e dolomito, além da identificação de dobras características de dobra sinsedimentar, sugerem uma origem genética diferente das sugeridas para as mineralizações inferiores do depósito, Levando isto em consideração, passou-se a crer que Morro Agudo era um depósito do tipo SEDEX (Sedimentar Exalativo), apesar da ausência de magmatismo no cinturão e de outras características comuns a este tipo de modelo de depósito ([Misi et al., 1996](#); [Dardenne e Freitas-Silva, 1998](#), [Dardenne e Schobbenhaus, 2001](#)).

As mineralizações vinham sendo consideradas de caráter sin-diagenético por [Romagna e Costa \(1988\)](#), [Dardenne e Freitas-Silva \(1999\)](#), [Cunha \(1999\)](#) e [Misi et al., \(1999\)](#). Porém, [Dardenne e Schobbenhaus \(2001\)](#) apontam que as diferentes texturas dos sulfetos indicavam episódios de mineralização tardi-diagenéticos a epigenéticos, relacionados à evolução do Grupo Vazante. [Cunha et al., \(2007\)](#) realizou estudos com isótopos de Pb nas mineralizações de Morro Agudo e atestou que a galena encontrada no corpo N apresentou razões de Pb radiogênico menores, formada então em estágios iniciais da mineralização. Já os corpos GHI, JKL e M possuem razões Pb radiogênico maiores, devido a uma mistura incompleta dos sulfetos de pelo menos duas fontes, e possivelmente relacionadas à crosta superior. Com isso, [Cunha et al., \(2007\)](#) concluiu que apenas o minério do corpo N seria sin-diagenético, enquanto os demais corpos seriam epigenéticos.

Atualmente, autores afirmam que o depósito de Morro Agudo pode ser definido como MVT (*Mississippi Valley Type*) do tipo *Irish*, por ser semelhante às *Midlands* Irlandesas, definição proposta por [Paradis et al., \(2007\)](#) e defendido por [Biondi \(2003\)](#) e [Cordeiro et al., \(2018\)](#). São depósitos que mesclam características dos depósitos MVT e SEDEX, mas se assemelham mais ao tipo MVT.

De maneira geral, os depósitos tipo *Mississippi Valley* são constituídos por corpos de minério epigenéticos, estratificados, ritmicamente bandados e com substituição de feições sedimentares primárias, de rochas hospedeiras predominantemente carbonáticas ([Biondi, 2003](#), [Paradis et al., 2007](#); [Haldar, 2013](#)). O minério é formado por esfalerita, galena e barita, ocasionados pela recristalização diagenética de carbonatos por contato de fluidos de salmouras, de temperatura moderada (75-200 °C) ([Holland e Turekian, 2014](#)). Este evento cria uma solução hidrotermal de baixa temperatura que migra para armadilhas estratigráficas, localizadas em margem continental, no cenário de bacia intracratônica ([Haldar, 2013](#)).

O modelo metalogenético de Morro Agudo proposto por [Cordeiro \*et al.\*, \(2018\)](#), representado na [Figura 4.4](#), ilustra o processo de formação do depósito, com a deposição do corpo N, sin-diagenético de idade mesoproterozóica, anterior ao restante dos corpos, de idade neoproterozóica e formados pelo soerguimento da Faixa Brasília. Este modelo distingue quatro fases de mineralização presentes em Morro Agudo: *stratiform sulfides*, *massive and breccia sulfides*, *overprinting laminated sulfides* e *late-stage fracture-filling sulfides* ([Cordeiro \*et al.\*, \(2018\)](#)).



0

Figura 4.4: Modelo metalogenético do depósito Zn-Pb de Morro Agudo por [Cordeiro \*et al.\*, \(2018\)](#). AB- Deposição dos sulfetos estratiformes sin-sedimentares dentro de um plataforma carbonática mesoproterozóica intracratônica, representada pela Fm. Morro do Calcário; C- Durante a Orogenia Brasiliana neoproterozóica, um evento inicial de mistura de fluidos de fontes basais e marinhas precipitou sulfetos maciços (rosa) e brechas (laranja) dentro das rochas hospedeiras; D- Um evento posterior de mistura de fluidos parcial sobrepôs localmente a mineralização anterior com sulfetos laminados (azul); E- Esta parte da bacia sofreu falhas e inclinações oblíquas normais, com consequente remobilização dos sulfetos (cinza); F- O soerguimento posterior expôs a sequência a erosão e criou a topografia atual.

#### 4.5 Métodos de Lavra

A mina de Morro Agudo como sabido, opera como lavra subterrânea. [Hartman e Mutmansky \(1987\)](#) utilizam o termo “autoportabilidade” para designar os métodos de lavra subterrânea para cada tipo de sustentação, considerando aspectos litológicos e geometria dos depósitos: suporte natural com o método Câmaras e Pilares e *Sublevel Stopping*; suporte artificial, como Recalque e Corte e Aterro; e abatimento com *Block Caving*, *Sublevel Caving* e *Longwall*.

Em Morro Agudo utiliza-se do método Câmaras e Pilares desde a abertura de sua rampa, em 1973, e consiste em abrir grandes câmaras sustentadas por pilares, podendo deixar pilares de minério, com a finalidade de sustentar as encaixantes ([Votorantim Metais, 2017](#)). Utilizar o método Câmaras e Pilares parte do pressuposto que o corpo de minério possui uma continuidade geométrica e uma distribuição homogênea de minério, duas características presentes na mina. Porém, novas áreas em exploração, com foco ao Bloco F, mostraram algumas mudanças nas características do depósito, como a verticalização das lentes de minério, podendo então implementar um novo método de lavra, e neste caso foi implantado o *Sublevel Stopping*, que consiste em abrir um realce vertical, resultante da detonação do corpo mineral, procurando abranger topo e base ([Oliveira, 2012](#)). A alocação dos *stopes* é feita em cima das galerias, chamadas de subníveis, onde a atividade de perfuração, desmonte e transporte é realizada ([Fig. 4.5](#)). A lavra utilizada em Morro Agudo segue o método *Blasthole Method*, onde um leque de testemunhos de sondagem é aberto, e a detonação é feita dentro do *stope* ([Oliveira, 2012](#)).

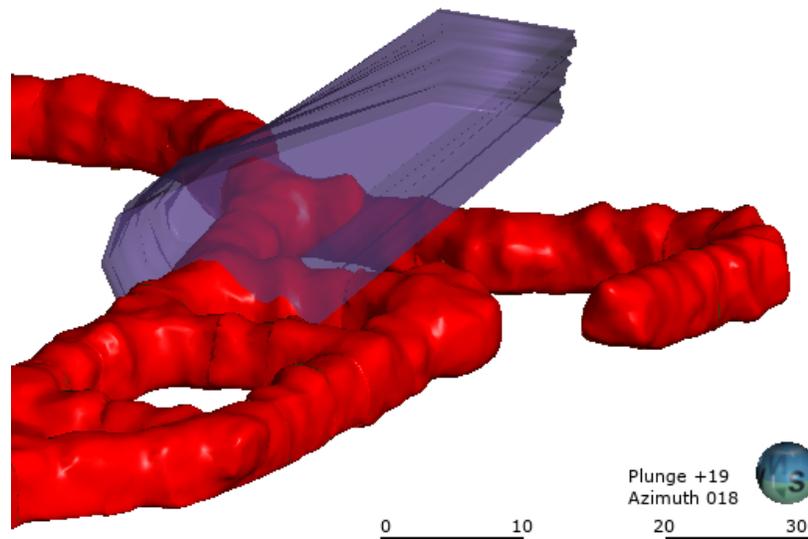


Figura 4.5: Exemplo de alocação de *stope* (polígono em roxo) acima do subnível (vermelho) 716 RJKF. Representação em ambiente *Leapfrog Geo*.

## Capítulo 5: Metodologia

Para o presente trabalho foram realizadas as seguintes etapas de estudo: revisão bibliográfica, mapeamento de galerias com caracterização dos litotipos, texturas de minério e caracterização estrutural das fraturas e falhas, e por fim, a atualização do modelo exploratório das lentes de minério JKL.

## 5.1 Revisão bibliográfica

Para o presente projeto foram utilizados diferentes tipos de publicações, separados em dois grupos distintos. O primeiro grupo de publicações trata sobre o Grupo Vazante, e especificamente sobre a mina de Morro Agudo. Entre estes destaca-se mapas, teses, dissertações, artigos em revistas científicas e relatórios internos da companhia. Estas publicações abordam geologia regional e local, além de estudos estratigráficos, litogeoquímicos, tectônicos e isotópicos. O segundo grupo de publicações diz respeito ao modelo exploratório do tipo *Mississippi Valley* (MVT), modelo de depósito melhor aceito atualmente para o caso de Morro Agudo, e que procuram sintetizar as características principais, além de abordar os depósitos conhecidos neste modelo. A revisão bibliográfica realizada foi primordial para o entendimento da região e do alvo de estudo.

## 5.2 Mapeamento das galerias subterrâneas

As galerias subterrâneas, chamadas a partir daqui de subnível, levam este nome por conta do método de lavra em que o Bloco F se desenvolve, o *Sublevel Stopping*. Este método de lavra consiste na abertura de galerias, os subníveis, onde as atividades de perfuração, desmonte e transporte são desenvolvidos, abaixo de um realce vertical chamado *stope*, onde há a detonação do material, melhor explicado posteriormente.

O desenvolvimento dos subníveis na mina de Morro Agudo seguem um padrão, que consiste em um nível composto por duas galerias maiores, chamadas de GM, com extensão determinada pelo desenvolvimento, e interligadas por travessas chamadas TRM, com 10 metros de comprimento. As galerias possuem uma dimensão com 5 m de altura por 5 m de largura, ao contrário dos pontos de carga, representados por realces na parede das GMs, normalmente do lado direito, com dimensão de 5 m de altura por 6 m de largura. A [Figura 5.1A](#) apresenta os subníveis 716 RJKF e 750 RJKE, uma acima do outro respectivamente, e a [Figura 5.1B](#) os componentes do subnível, sendo as GMs 1 e 2, e travessas numeradas de TRM 1 a TRM 10 para a 716 RJKF, e TRM 2 a TRM 11 na 750 RJKE. O mapeamento foi realizado numa extensão de aproximadamente 170 m de extensão, englobando as duas GMs e suas travessas.

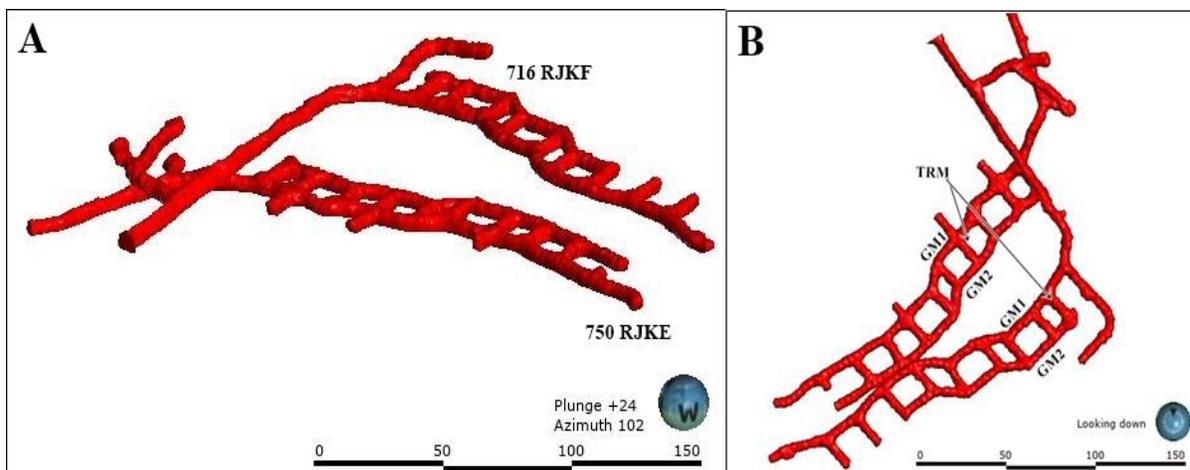


Figura 5.1: Apresentação dos subníveis do Bloco F estudados. A- Os subníveis 716 RJKF (acima) e 750 RJKE (abaixo); B- Os componentes de um subnível na mina de Morro Agudo: GM1, GM2 e TRMs.

O croqui é feito à mão em malha quadriculada, tal como um perfil de caminhada, cobrindo uma extensão de interesse. Os croquis realizados dentro dos subníveis foram feitos à mão, e procuraram cobrir em escala 1:500 as estruturas e litotipos identificados nas paredes (Fig. 5.2). Para isso, as laterais são marcadas em intervalos de 5 metros, e em cada porção é feito um croqui, posteriormente interligados. Nas paredes das travessas, é feito o croqui total de 10 metros.

Um subnível em desenvolvimento, onde há fluxo intenso de materiais e equipamentos, costumam ficar com suas paredes empoeiradas e com as feições cobertas. Para reverter esta situação, é necessário lavar as paredes no ato do mapeamento e isto já é parte do protocolo para análise geral das galerias. A permanência dentro das galerias é limitada por questões de segurança e também é afetada pelo ciclo operacional. Com isso, é necessário selecionar áreas de interesse, como paredes com falhas importantes, presença de contatos litológicos e limite das lentes mineralizadas.

Ao final de cada dia de mapeamento, os croquis físicos dos perfis são levados ao escritório, onde são refeitos e detalhados, com objetivo de confeccionar o mapa de cada subnível em uma planta baixa, que consiste em uma projeção das estruturas vistas nas paredes em um único plano, em grandes escalas, localizada geralmente acima do piso (Marjoribanks, 2010). As plantas baixas serão utilizadas na atualização do modelo numérico das lentes JKL no software *Leapfrog Geo*. Todos os croquis e mapas confeccionados à mão durante o período de mapeamento estão nos Anexos 1 e 2. Para as regiões em que for necessário dar ênfase, estes desenhos serão apresentados em formato digital.

Para o mapeamento dos subníveis foram utilizados os seguintes materiais: mangueira d'água, lanternas de capacete e de mão (Maglite), trena convencional com metragem de 5m, e quando disponível, trena a *laser*, materiais de desenho (lápiz grafite e de cor, borracha, escalímetro, transferidor) e bússola Clar. As medidas estruturais são assim apresentadas em Clar, com a direção de mergulho e azimute e seu mergulho.

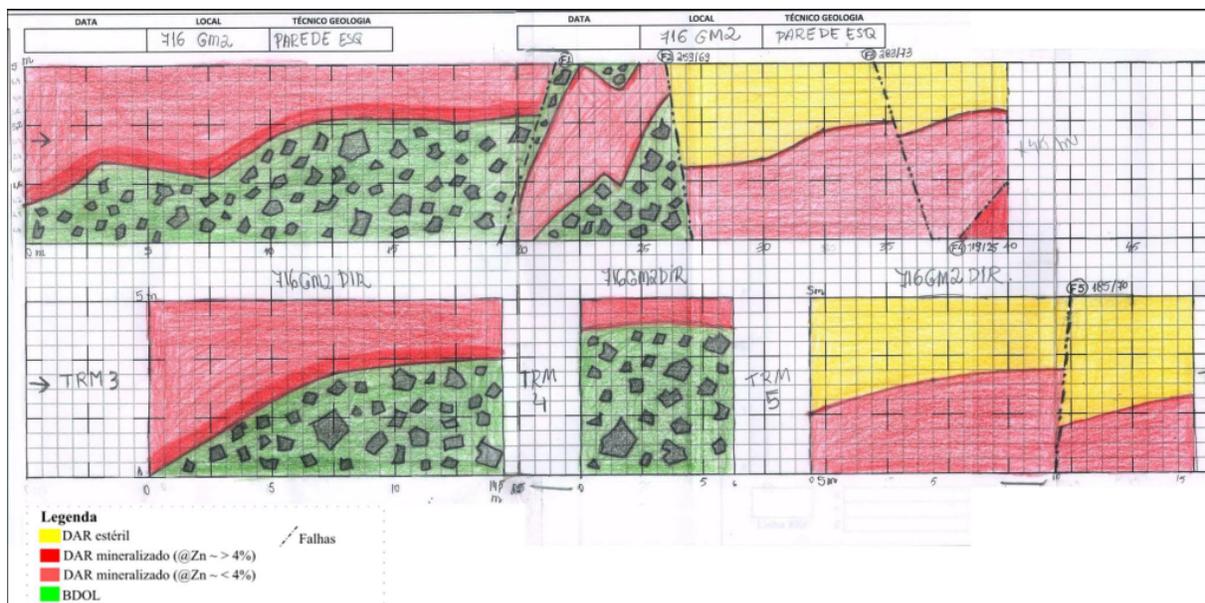


Figura 5.2: Croqui feito à mão representando perfil de caminhada de trecho da 716 RJKF, lado esquerdo (acima) e direito (abaixo) com os intervalos de entrada das TRMs.

### 5.3 Caracterização dos corpos de minério

A caracterização dos corpos de minério nos subníveis do Bloco F segue as definições propostas pela literatura, principalmente as descritas por Romagna e Costa (1988), detalhadas no capítulo de Geologia Local. O mapeamento dos corpos de minério levou em consideração o que se tem conhecido sobre depósitos do tipo MVT, os contatos litológicos e de teor de Zn e Pb entre as lentes mineralizadas e as camadas estéreis, bem como as texturas dos corpos mineralizados.

### 5.4 Caracterização estrutural dos subníveis

Seguindo as atividades de mapeamento, a caracterização estrutural dos subníveis leva em consideração a disposição do acamamento do litotipo hospedeiro e a movimentação e rejeito causado nos corpos mineralizados. Esta análise procura entender as movimentações das falhas, seu impacto na geometria das lentes de minério, e a correlação com as falhas maiores e regionais que interceptam o depósito.

### 5.5 Atualização do modelo exploratório das lentes JKL

As plantas baixas dos dois subníveis são utilizadas para a atualização do modelo exploratório de lentes mineralizadas, elaborado pelos geólogos da Nexa, em ambiente *Seequent Leapfrog Geo*®, última atualização em maio de 2022. O planejamento inicial para estas galerias (e outras no mesmo bloco e sobre o mesmo método de lavra) seria que toda extensão destas estivesse alocada dentro das lentes de minério JKL, algo confirmado pelo modelo, mas não real. A luz deste problema, o mapeamento se fez necessário para compreender o interior dos dois subníveis, e assim possibilitar a atualização do modelo exploratório de lentes.

A exploração do Bloco F possui como informação base uma malha de testemunhos de sondagem com espaçamento entre feixes de 15 a 20 m, realizados entre os anos de 2017 e 2018 (Fig. 5.3A), além de amostragens XRF que são realizadas durante o desenvolvimento, coletadas pelos técnicos de geologia. Os dados de testemunhos, além de determinar a disposição dos litotipos, também possibilita a identificação de teores Zn-Pb, na qual os teores exatos das amostras não podem ser divulgados (Fig. 5.3B). Com esses dados de teores e manipulação destes no *Leapfrog Geo*, gerou-se um modelo geológico de veio, pela ferramenta *surface chronology*, das lentes J (azul), K (amarelo) e L (verde) para o Bloco F (Fig. 5.3C). O modelo de veio usa como referência a concentração dos teores dos testemunhos e a disposição da unidade hospedeira, criando seções nos testemunhos que englobam grupos de teores que compõem uma lente. Este modelo é a atual ferramenta de exploração das galerias no método de lavra *Sublevel Stopping* da empresa (Fig. 5.3C).

A edição do modelo exploratório das lentes JKL foi realizada com base nos dados de litotipos e teores combinados Zn-Pb dos testemunhos de sondagem, denominados *Lito* e *Assay*, respectivamente. O *Assay* possui um *cut-off* de 0,01% e amostra teores de composição Zn-Pb em um gradiente de cores, onde a cor azul é o menor teor identificado (0,01%), e vermelho os maiores teores ( $\geq 9\%$ ) (Fig. 5.3B). Já as plantas baixas, confeccionadas na etapa de mapeamento, serão usadas como guia.

A partir de um corte usando a ferramenta *slicer*, e com o sólido das galerias na visão em planta, tem-se um espelho feito na vertical do subnível, para que seja possível editar a disposição das lentes (Fig.

5.3D). O *slicer* utilizado tem extensão de 15 m, e um *step size* de 5 m, que percorre a extensão do subnível e apresenta os dados de testemunhos daquele local.

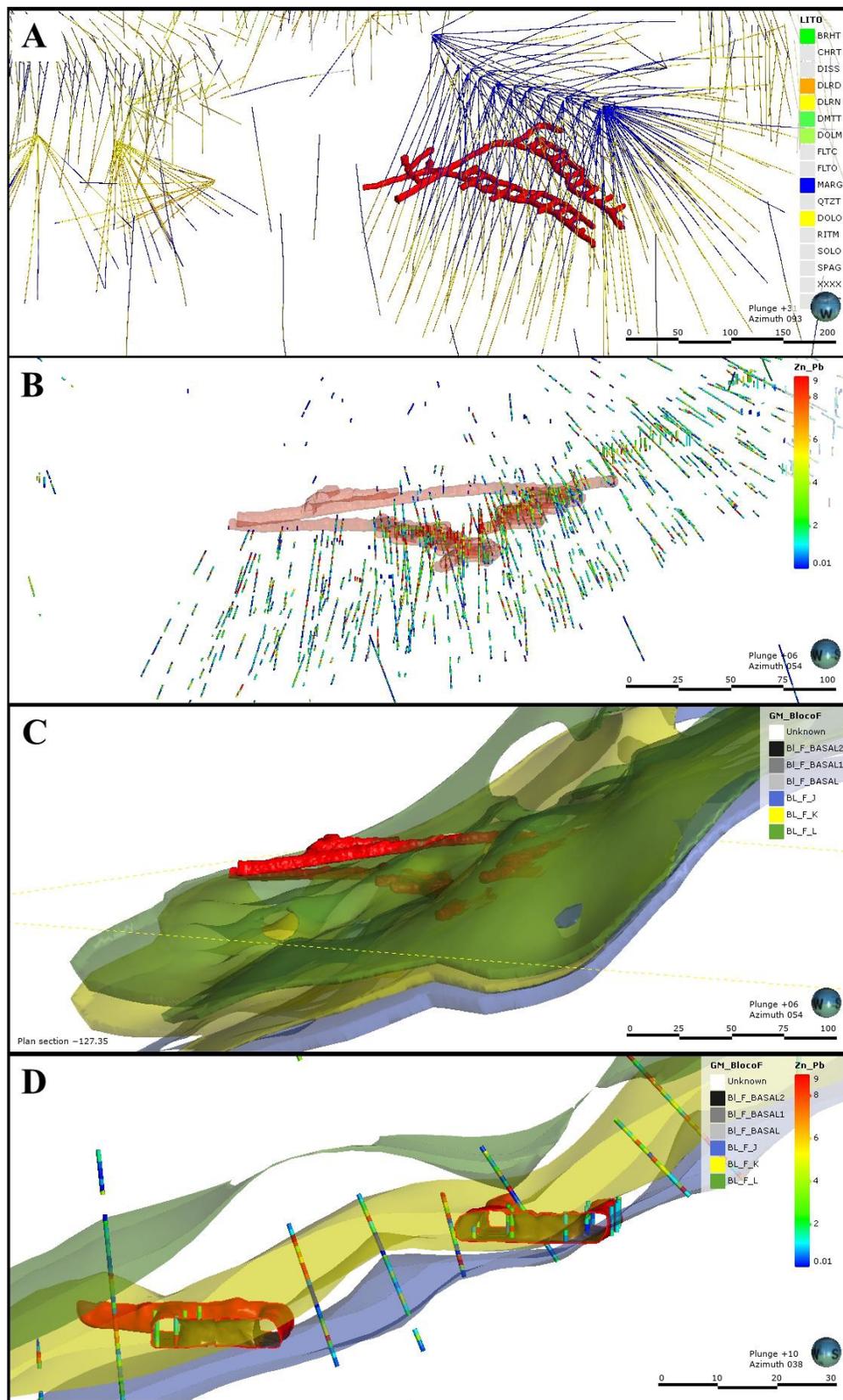


Figura 5.3: Prancha de imagens extraídas do *software Leapfrog Geo*, representando o modelamento implícito das lentes JKL. A- Conjunto de testemunhos de sondagem que interceptam a região do Bloco F, onde estão os subníveis de estudo (em vermelho). As sondagens expostas mostram os litotipos interceptados: marga (azul), dolarenito (amarelo), brechas (laranja); B- Representação dos teores de Zn-Pb nos testemunhos de sondagem. Estes teores são indicados por um gradiente de cores expostos na legenda interna, sendo azul o teor mais baixo (0,01 %) e vermelho o mais alto (> 9%).

Notar os subníveis estudados em rosa claro e a direção preferencial das amostras; C- O modelo implícito das lentes J (azul), K (amarelo) e L (verde), feitos a partir dos teores dos testemunhos de sondagem. A direção das lentes tem caimento para NW. Notar os subníveis estudados dentro do conjunto de lentes *stratabound* (em vermelho); D- Corte vertical nas galerias, mostrando a disposição das lentes segundo o modelo implícito, ditados pela disposição dos teores nos testemunhos de sondagem.

A setorização das lentes JKL, representada por um *display* nos testemunhos, também possui um valor de *cut-off*, de 1,6%. Este teor limita a disposição das lentes, considerando o teor mínimo de 1,6% para compor as lentes JKL.

O modelo exploratório das lentes JKL procura englobar teores combinados de Zn-Pb que estão dentro da Unidade Dolarenítica (DAR), a rocha hospedeira destas mineralizações e representada pela cor amarela nos dados de *Lito* (Fig. 5.4A). Com isso, o *display* das lentes citado anteriormente possui uma ferramenta de edição vinculada, possibilitando o remodelamento local da lente à mão. Para isso, é utilizado os dados de testemunhos *Lito\_Assay* e o caminho *select display > Lentes JKL > edit*. Após a habilitação da ferramenta de edição do *display* Lentes JKL, o caminho é feito novamente para *select display > Zn-Pb*. Com os dados de *Assay* abertos, observa-se o comportamento dos teores nos testemunhos. Como exemplo na Figura 5.4B, foi indicado três concentrações de teores, numerados em 1, 2 e 3 do topo à base. Este é um comportamento muito comum nos dados de *Assay*, e a partir deles é possível determinar as lentes JKL. Na Figura 5.4C é possível observar novamente a indicação das três concentrações, agora setorizados pelas lentes JKL, em azul, amarelo e verde, respectivamente.

Para o modelo ser atualizado conforme o visto em campo, será usada a ferramenta de edição citada acima. Nesta etapa, o modelo poderá extrapolar as concentrações e deslocar as lentes de maneira manual, com tanto que fique melhor representado ao mapeado.

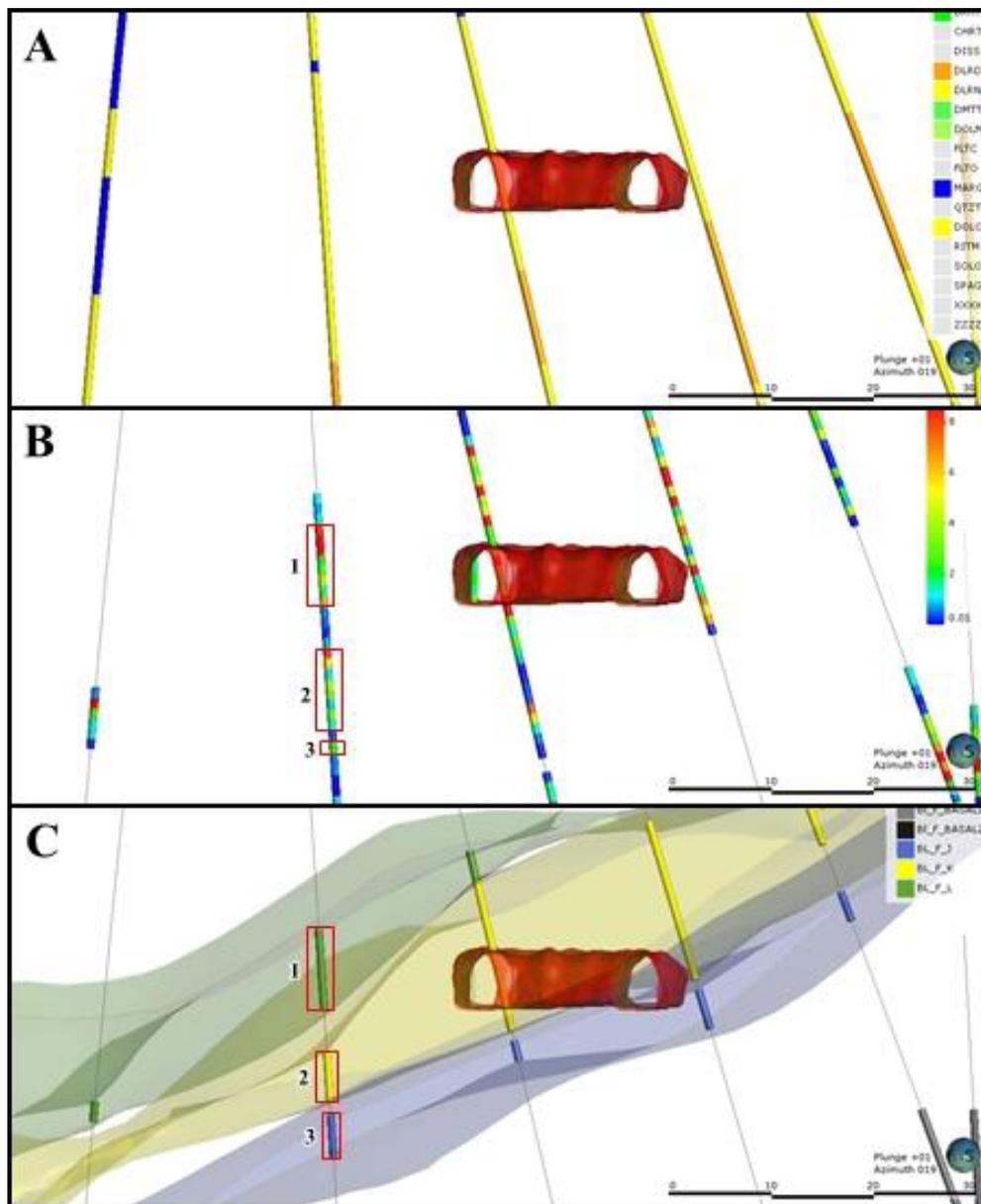


Figura 5.4: Prancha de imagens da visão do corte vertical, utilizado para edição do modelo de lentes JKL, no subnível 750 RJKE. A- Corte mostrando os testemunhos de sondagem, com dados de litotipos. Azul- margas, amarelo- dolarenito, laranja- brecha dolomítica; B-Corte mostrando os teores Zn-Pb, representado pelo gradiente de cores na legenda. Os valores mínimos (0,01%) são apresentados em azul, enquanto os teores elevados ( $\geq 9\%$ ) são apresentados em vermelho; C- Corte mostrando a setorização das lentes J (azul), K (amarelo) e L (verde).

## Capítulo 6: Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados de mapeamento e atualização do modelo exploratório das lentes JKL nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE, do Bloco F. O tópico de nota explicativa apresenta os litotipos, texturas do minério e a estrutural, resultando em um mapa geológico em planta baixa de cada subnível. O modelo exploratório aborda os procedimentos de atualização do modelo, como ferramentas utilizadas e a introdução dos dados de mapeamento no processo.

## 6.1 Nota explicativa dos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE

Para apresentar os resultados e integração dos dados do mapeamento geológico no Bloco F, esta nota explicativa, que abrange os dados de litotipos, textura dos corpos de minério e dados estruturais. A integração está representada nos mapas geológicos de cada subnível, 716 RJKF e 750 RJKE. (Fig. 6.1 e 6.2). Os mapas foram realizados em papel tamanho A1, em escala 1:500, porém a versão confeccionada em ambiente *ArcGIS* teve sua escala distorcida. Para contornar esta situação, os [Anexos 4 e 5](#) contarão com o mapeamento em escala, digitalizado, mas no corpo do trabalho os mapas apresentados são com escala distorcida .

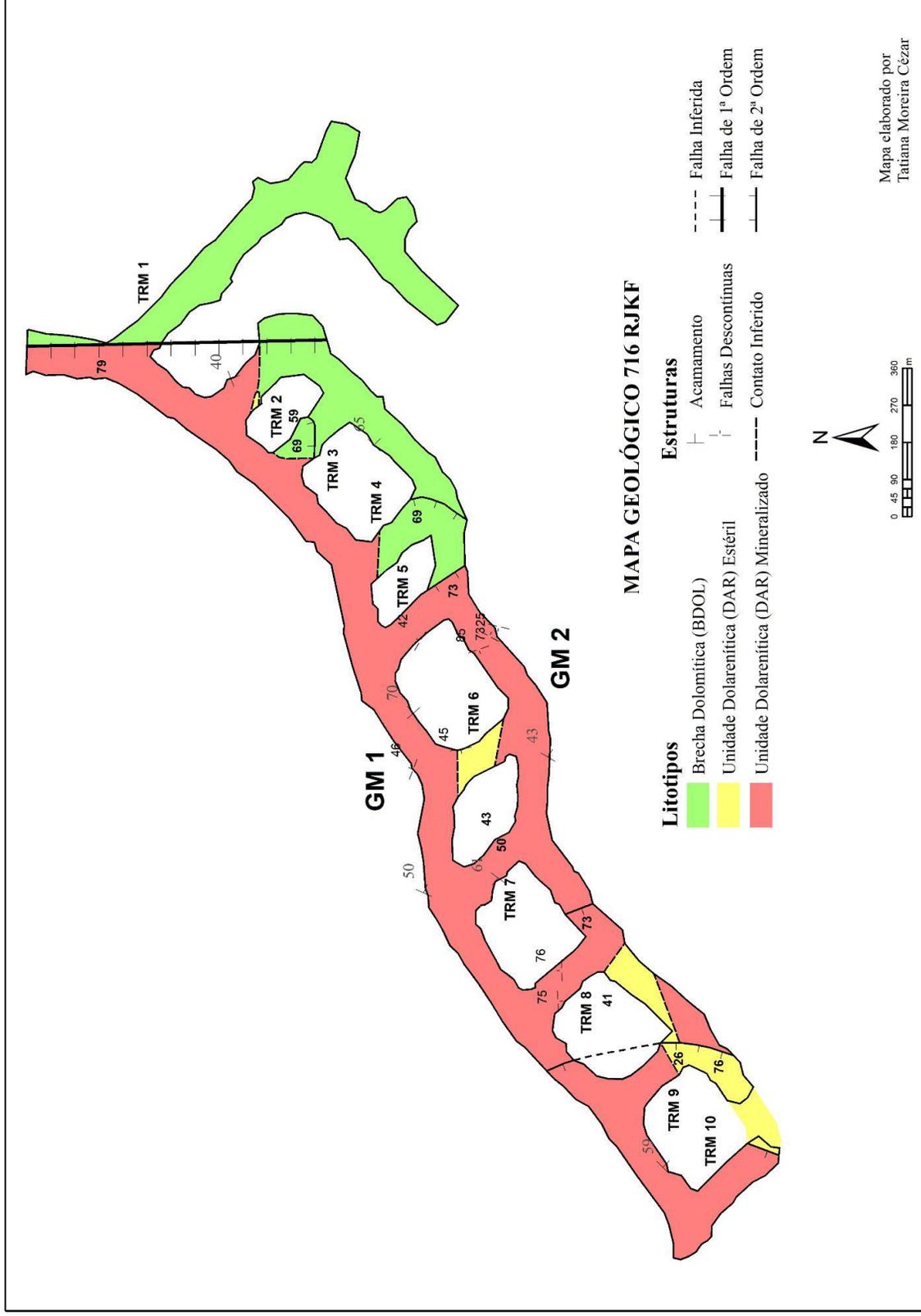


Figura 6.1: Mapa geológico do subnível 716 RJKF, confeccionado em ambiente *ArcGIS* a partir do mapeamento 1:500 feito em papel tamanho A1, localizado no Anexo 4.

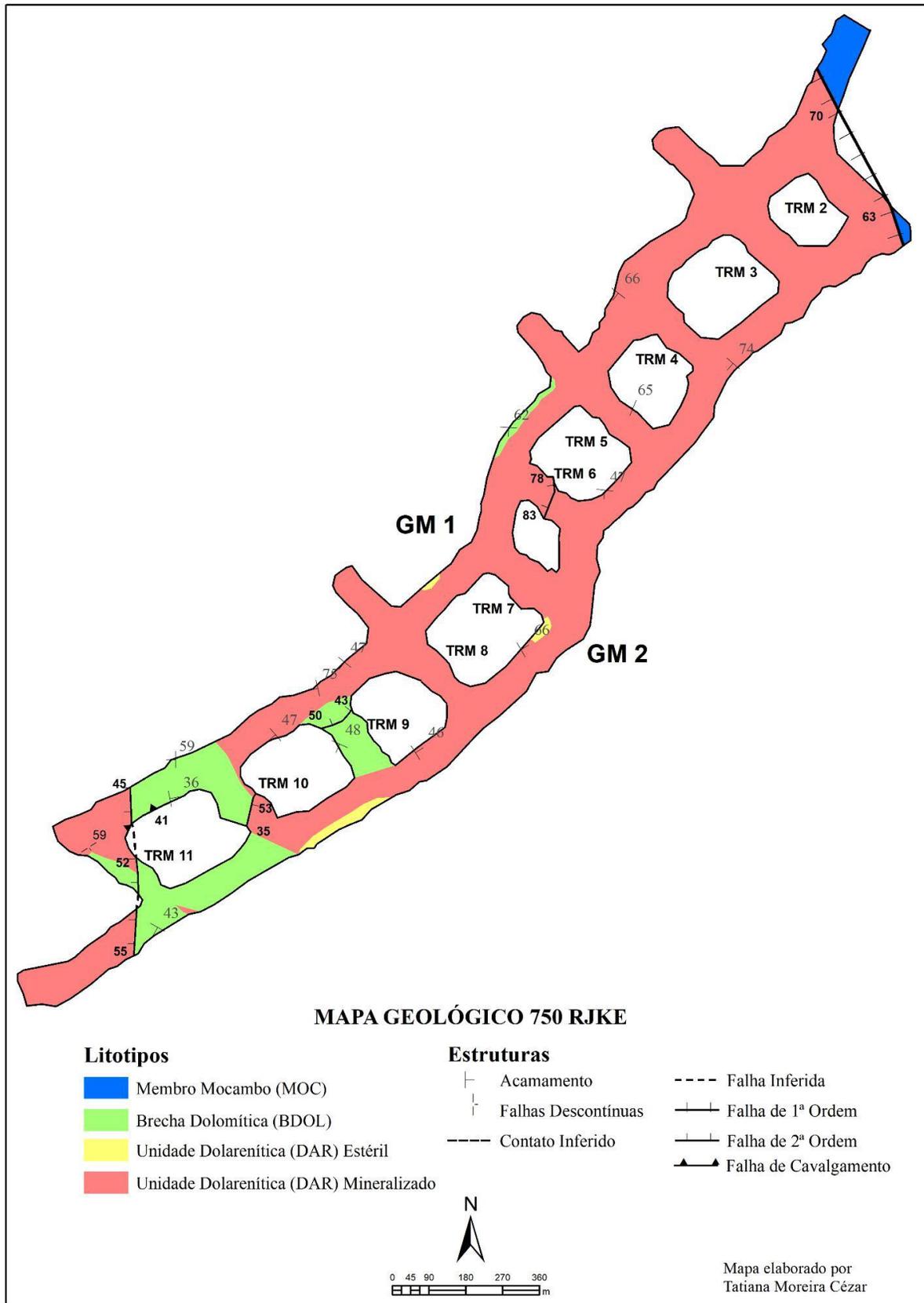


Figura 6.2: Mapa geológico do subnível 750 RJKE, confeccionado em ambiente *ArcGIS* a partir do mapeamento 1:500 feito em papel tamanho A1, localizado no Anexo 5.

### 6.1.1 Litotipos

Os litotipos descritos nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE são unidades pertencentes à Formação Morro do Calcário, conforme coluna estratigráfica da [Figura 3.4](#). As unidades descritas, da base para o topo, são: Membro Mocambo (MOC), Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL) e Unidade Dolarenítica (DAR).

O Membro Mocambo (MOC) é localizado apenas na entrada do subnível 750 RJKE, e está em um contato por falha com o dolarenito ([Fig.6.2](#)). É caracterizado por um filito cinza escuro de laminação inclinadas, sendo estas lâminas de espessura entre 1 e 5 cm, em escala de galeria ([Fig. 6.3A](#)). Em maior detalhe, as lâminas apresentam-se com até 2 mm, compostas por intercalações dolomítica e argilosa, e possui continuidade lateral na região visível, cobrindo a parede do teto à base. No contato com o dolarenito, as laminações da unidade são inclinadas e infletidas para baixo, característica dada pela movimentação normal da falha. É uma unidade rica em matéria orgânica, facilmente identificada por ser preta a cinza escura e pelo deslocamento das lâminas, semelhante a uma clivagem ardosiana ([Fig. 6.3B](#)).

A Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL) está presente nos dois subníveis de estudo e encontra-se em contato de topo gradual com o dolarenito, além de haver contatos por falha também com o dolarenito. É representada por uma brecha sedimentar cinza clara, composta por clastos angulosos e mal selecionados de dolomito e dolarenito, envoltos por cimento dolomítico muito fino ([Fig. 6.3C-D](#)). Os clastos de dolomito chegam a 1 m no comprimento maior, na vertical ([Fig. 6.3C](#)), são maciços, cinza claro a médio, ocorrendo também esteiras microbianas de cor cinza médio, laminares e colunares ([Fig. 6.3E](#)). Os clastos de dolarenito são cinza claro a médio e são os de menor dimensão da unidade e são subarredondados. Na região de brecha dolomítica, na 750 RJKE, ocorre uma porção de até 45 cm de um dolomito cinza escuro, composto por lentes de 2 a 5 cm, irregulares e maciças. Este dolomito possui um contato gradual e está inserido no pacote de brecha, e é encontrado próximo a um caso particular de cavalgamento, que será melhor descrito a seguir.

A Unidade Dolarenítica (DAR), presente em quase toda extensão dos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE, é classificada como um dolarenito de granulometria fina a média, cinza médio, composto por grãos dolomíticos e envoltos por cimento dolomítico muito fino ([Fig.6.3F](#)). O dolarenito possui estrutura sedimentar visível, sendo este seu acamamento, e é comumente encontrado inclinado. A unidade possui contato gradual na base com a brecha dolomítica, além de possuir contato recorrente por falha com a brecha dolomítica nos dois subníveis, e em particular no 750 RJKF, também por falha, com o membro Mocambo. Os grãos citados são essencialmente de dolomito cinza médio e possuem formato subarredondado ([Fig. 6.3G](#)), podendo ocorrer com pouca frequência grãos de quartzo cinza claro. Sabe-se da presença de aloquímicos compondo os grãos, como oólitos e pelóides, mas na escala estudada não é possível fazer esta distinção. O dolarenito é a principal unidade mineralizada de Morro Agudo, e os grãos podem ser preservados ou substituídos pelo minério ([Fig. 6.3H](#)).

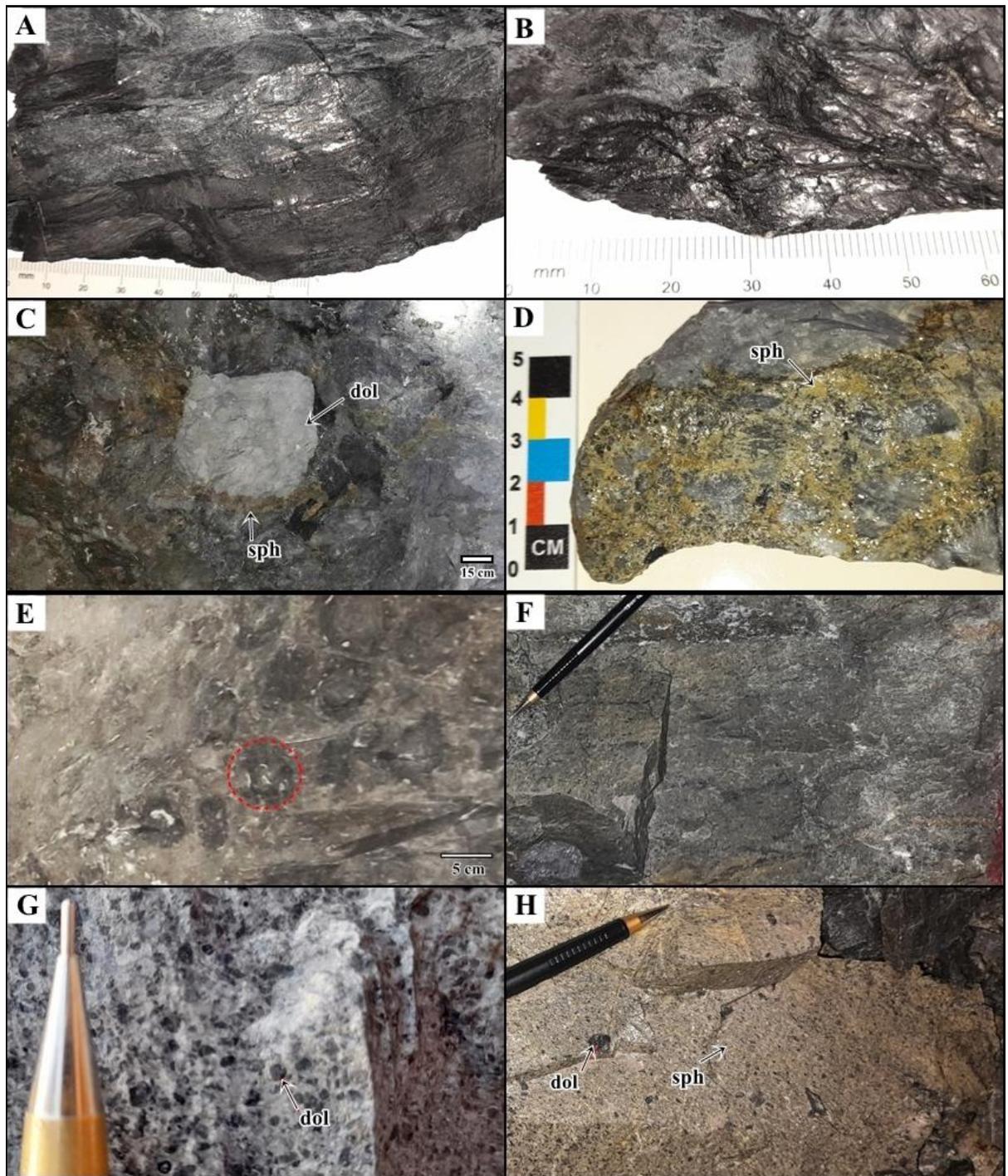


Figura 6.3: Prancha de fotos das unidades encontradas nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE, da base para o topo. A- Amostra de mão do Membro Mocambo (MOC) mostrando o acamamento centimétrico, observável em campo no subnível 750 RJKE; B- Amostra de mão do Membro Mocambo (MOC), mostrando laminações milimétricas, semelhantes a uma clivagem ardósiana, no subnível 750 RJKE; C- Fotografia de porção de parede da Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL), mostrando um clasto de dolomito, de aproximadamente 1 m de largura, envolto de cimento dolomítico cinza, do subnível 750 RJKE; D- Amostra de mão de brecha dolomítica, com clastos de tamanhos variados, subarredondados a angulosos, envoltos do minério de esfalerita; E- Fotografia de porção de parede com colônia de estromatólitos colunares (círculo em vermelho), clasto componente da brecha dolomítica, no subnível 750 RJKE; F- Foto de porção de parede da Unidade Dolarenítica (DAR), do subnível 716 RJKF; G- Fotografia de detalhe do dolarenito, mostrando os clastos de dolomito subarredondado, indicado pela seta vermelha, da 716 RJKF; H- Fotografia de porção de parede de dolarenito mineralizado, com os grãos de dolomito envoltos da massa de minério, indicado pela seta vermelha, da 750 RJKE. dol- dolomito, sph- esfalerita

### 6.1.2 Caracterização do minério

As lentes de minério do depósito de Morro Agudo possuem diferentes texturas e estruturas, que estão controladas principalmente pelos litotipos hospedeiros. As texturas de minério encontradas nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE serão aqui divididas em três classes: minério do tipo cimento de granulação fina, minério em vênulas e agregados de granulação média, e minério em fraturas e falhas de granulação grossa.

#### 6.1.2.1 Minério tipo cimento de granulação fina

A textura de cimento de granulação fina é a mais recorrente nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE e compõe o corpo de minério predominante no dolarenito. Nesta textura, o minério de esfalerita, com galena secundária, preenche a porosidade entre os grãos de dolomito e as cavidades da rocha hospedeira, além de substituir o cimento dolomítico (Fig. 6.4A). Os minerais de minério são muito finos, e o que se identifica é uma massa amarela a cinza, maciça, envolta nos grãos dolomíticos (Fig. 6.4B). Por ser uma rocha de granulometria variada, os teores diminuem conforme a granulometria também diminui, e fica possível ver o contato da lente de dolarenito mineralizada com a porção estéril, criando um halo de alteração que altera a cor do dolarenito, e ocorre comumente nos dois subníveis de estudo. (Fig. 6.4C).

Semelhante à mineralização encontrada no dolarenito, há também textura de cimento na brecha dolomítica, e esta unidade mineralizada é encontrada somente na 750 RJKE, região da TRM9 à TRM11 (Fig. 6.2). A brecha dolomítica mineralizada é cinza amarelada, composta por esfalerita, com galena e pirita secundários. O minério ocorre na forma de cimento, preenchendo cavidades e sustentando os clastos subarredondados a angulosos (Fig. 6.4D).

A textura de cimento é a principal característica das lentes J e K, e é a textura predominante na extensão dos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE. As lentes de minério JK se apresentam por uma cimentação fina e maciça, composta por esfalerita e galena (Romagna e Costa, 1988). Os teores podem variar conforme a granulação da rocha hospedeira, desde teores baixos com apenas ocupação de porosidade, até a substituição do cimento dolomítico e de grãos dolomíticos (Fig. 6.3H). As lentes JK podem se apresentar separadas por um nível de dolarenito estéril ou unidas, dificultando a distinção das duas lentes.

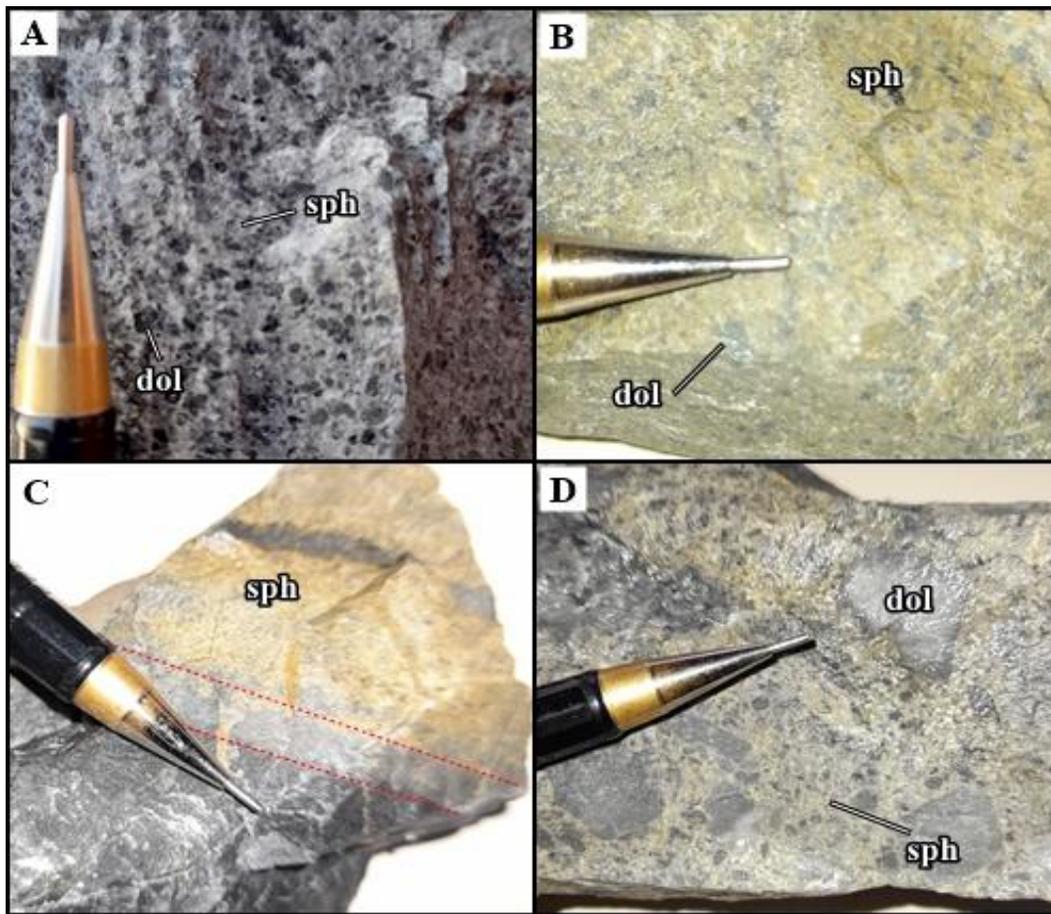


Figura 6.4: Fotografias de amostras de mão do minério com textura de cimentação. A - Amostra de dolarenito 716 RJKF, onde o minério de esfalerita cinza ocorre como cimento sustentando os clastos de dolomito; B - Amostra de dolarenito 750 RJKE amarela pálida com alto teor de Zn, de cimento de esfalerita substituindo cimento dolomítico; C - Amostra de dolarenito 716 RJKF com transição minério-estéril, exibindo halo de alteração hidrotermal que modifica localmente a cor do dolarenito (delimitado pelas linhas tracejadas vermelhas); D - Amostra de brecha dolomítica clasto suportada 750 RJKE onde os clastos de dolomito arredondados a prismáticos de tamanhos variados são sustentados por cimento de esfalerita. dol - dolomita, sph - esfalerita.

#### 6.1.3.2 Minério em vênulas e agregados de granulação média

Os minerais de minério ocorrem em vênulas, cavidades ou sobrepõem o cimento de granulação fina, em forma de agregados. É composto por cristais idiomórficos de granulação média de esfalerita e galena, com pirita e dolomita esparítica subordinados. Quando o agregado é sobreposto ao cimento de esfalerita fina, ocorre o apagamento do cimento, cristalizando na área esfalerita e galena de granulação média (Fig. 6.5A). Quando em vênulas, o preenchimento é irregular, de até 1 cm de espessura e apresentam contato nítido entre suas paredes e o minério cimentado (Fig. 6.5B, C). As vênulas são compostas de galena monominerálica ou de esfalerita e dolomita esparítica de granulação fina a média. Estas últimas também podem ocorrer como enxames de vênulas de espessuras milimétricas sem orientação preferencial, do tipo *stockwork* (Fig. 6.5B). Cavidades preenchidas por cristais idiomórficos grossos de galena são comuns e afetam o minério em cimento fino (Fig. 6.5D).

A textura de minério em vênulas e agregados está presente em diversos pontos dos subnível 716 RJKF e 750 RJKE, se sobrepondo à textura de cimentação, preenchendo vênulas e cavidades. Na área de

estudo, a sobreposição é evidente mas pouco significativa, ocorrendo apenas agregados pequenos e preenchimento de vênulas (Fig. 6.5C-D). Segundo Romagna e Costa (1988), a sobreposição do cimento mineralizado por um minério secundário rico em galena ocorreu de forma mais predominante na lente de minério L, exposta na Figura 4.3. Logo, como não foram localizadas sobreposições massivas e extensas, é possível indicar a ausência da lente L nos dois subnível de estudo.

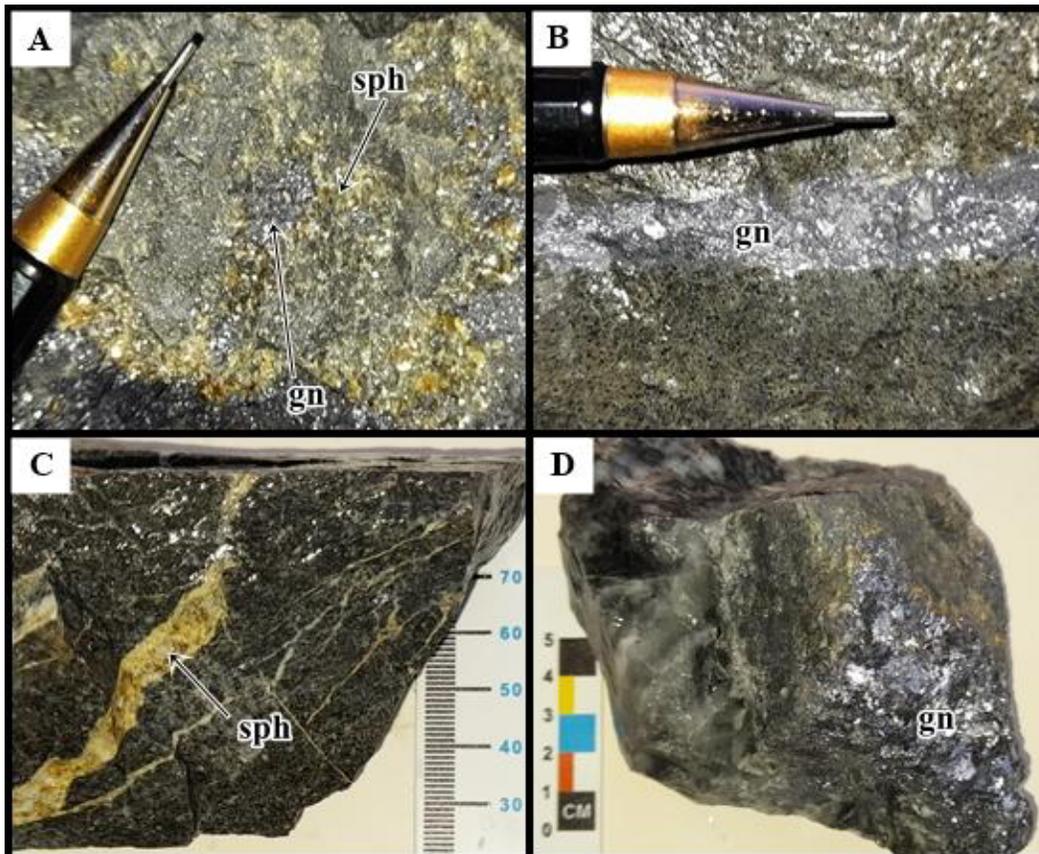


Figura 6.5: Fotografias de amostras de mão do minério com textura de sobreposição. A- Cristais de esfalerita e galena de dimensão maior que a do cimento, obliterando a textura de cimentação e substituição (750 RJKE); B- Vênula preenchida por galena cortando a rocha com textura de cimentação em suas bordas (716 RJKF); C- Vênulas preenchidas por esfalerita e dolomita esparítica, cortando a textura de cimentação. Notar vênulas milimétricas secundárias a vênula de espessura mais grossa (716 RJKF); D- Cavidade preenchida por cristais idiomórficos de galena em minério de cimentação, 750 RJKE. gn - galena, sph - esfalerita, dol - rocha dolomítica.

### 6.1.2.3 Minério em fraturas e falhas de granulação grossa

O minério hospedado em fraturas e falhas está presente em todo depósito, incluindo os subníveis 716 RJKF e 750 RJKE. O minério preenche falhas e fraturas, cortando as texturas de minério descritas anteriormente. É um minério maciço, que além do preenchimento das falhas, também pode ser disposto como tabular ou em bolsões nas proximidades das estruturas, e composto por agregados de cristais de granulação média a grossa de esfalerita, galena, pirita e dois tipos de dolomita, esparítica (dolomita clara) e do tipo amorfo (cinza escuro) (Fig. 6.6A-C). Nesta textura, a presença da pirita se faz muito marcante, cobrindo o dolarenito e os outros minerais com uma espécie de camada se sobrepondo às mineralizações anteriores (Fig. 6.6B). Nos subníveis estudados, para além dos bolsões predominantes, também é encontrada

preenchendo algumas falhas, compostas principalmente por pirita e galena. A textura de falhas e fraturas é presente rompendo todas as lentes de minério do depósito, então essa textura, por mais presente que seja na área estudada, não é determinante para identificação das lentes JKL.

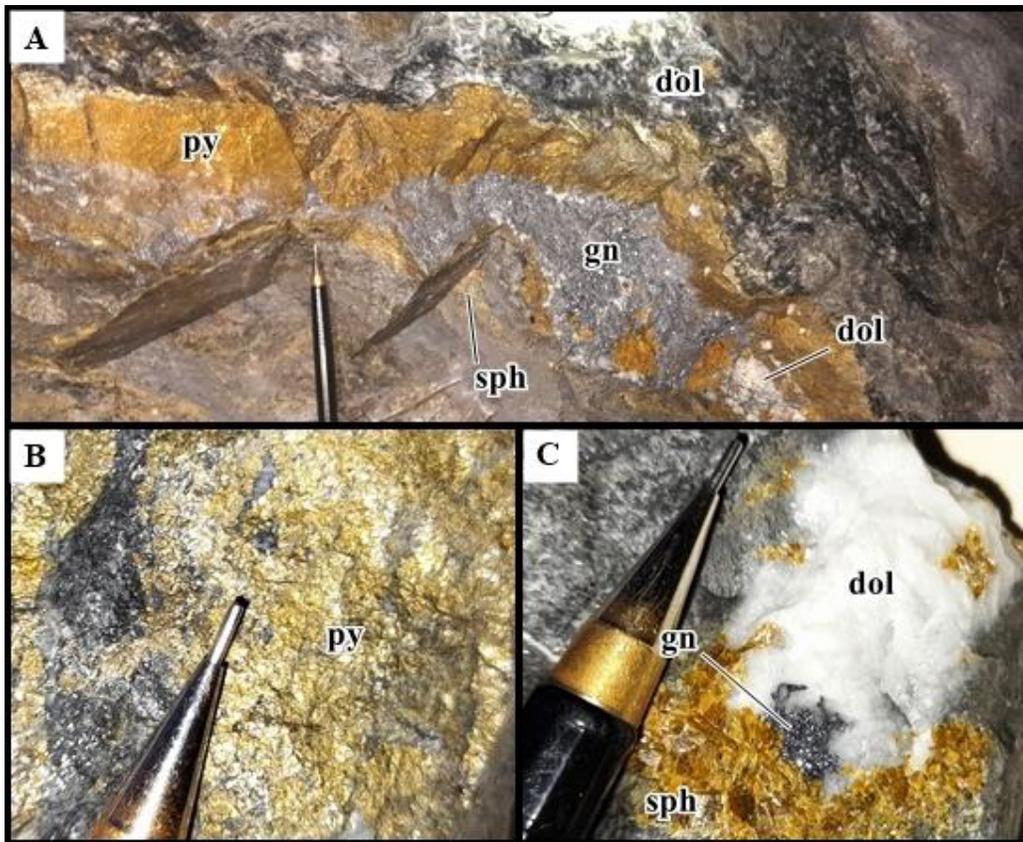


Figura 6.6: Fotografias do minério com textura de fraturas e falhas de granulação grossa. A - Bolsão de minério de granulação grossa composto por galena, esfalerita, pirita, e dolomita espática e nível de *chert* (parede do subnível 750 RJKE); B - Amostra de mão de pirita maciça preenchendo fratura (com plano paralelo a fotografia) na rocha encaixante dolarenito (subnível 716 RJKF); C - Amostra de mão de fratura preenchida por agregados de cristais idiomórficos de dolomita espática, esfalerita e galena (de dolarenito, 750 RJKE). dol - dolomita, gn - galena, py - pirita, sph - esfalerita.

### 6.1.3 Caracterização estrutural

A caracterização estrutural dos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE é composta pelo acamamento das unidades Membro Mocambo (MOC) e Unidade Dolarenítica (DAR), e pelas falhas que interceptam e deslocam as unidades Membro Mocambo (MOC), Unidade de Brecha Dolomítica (BDOL) e Unidade Dolarenítica (DAR), e conseqüentemente, o minério. Poderá ser notada neste tópico a ausência de dados de lineações dos planos de falha. Por conta dos poucos dados de lineações coletadas dado a dificuldade de obter bons planos de falha, optou-se por não usá-los neste estudo.

As falhas são classificadas como: primeira ordem, pois tem escala regional e limita totalmente a região mineralizada no início das galerias; segunda ordem, de escala local, pois deslocam as unidades e lentes de minério. A caracterização das falhas são descritas separadamente por subnível, usando os croquis de paredes para maior detalhamento das características, apresentados nos [Anexos 1 e 2](#).

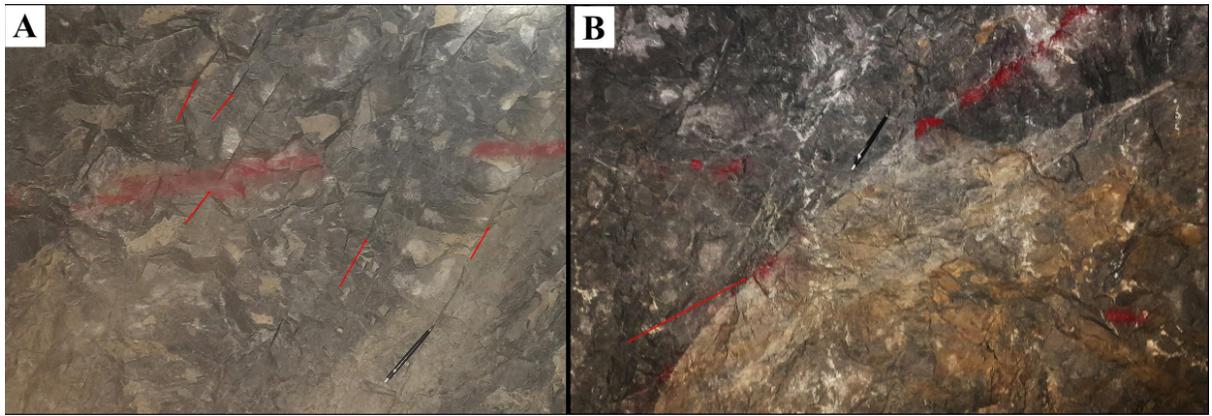


Figura 6.7: Principais feições encontradas na região de estudo do Bloco F. A- Acamamento sedimentar, indicada pela caneta-escala em preto, e pelas linhas em vermelho, da 750 RJKE; B- Falha do subnível 716 RJKF, deslocando a lente de minério amarelo abaixo, e colocando em contato com porção de Unidade Dolarenítica estéril cinza acima.

O acamamento observado no membro Mocambo possui inclinação maior que  $45^\circ$  e espessura média de 20 cm em escala de galeria. Contudo, por conta do deslocamento da clivagem ardosiana e da inflexão causada pelo movimento da falha de primeira ordem, o acamamento do membro Mocambo não será considerado. O Unidade Dolarenítica possui um acamamento de espessura variada, de 5 a 25 cm, com planos definidos, sem variação de cores (Fig. 6.7A). O acamamento tem orientação preferencial NE-SW, com média de mergulho 55 para a direção 127 (Fig. 6.8). Além da concentração principal de medidas, outros planos de acamamento são identificados, possuindo direções variadas, como os pólos no quadrante SE.

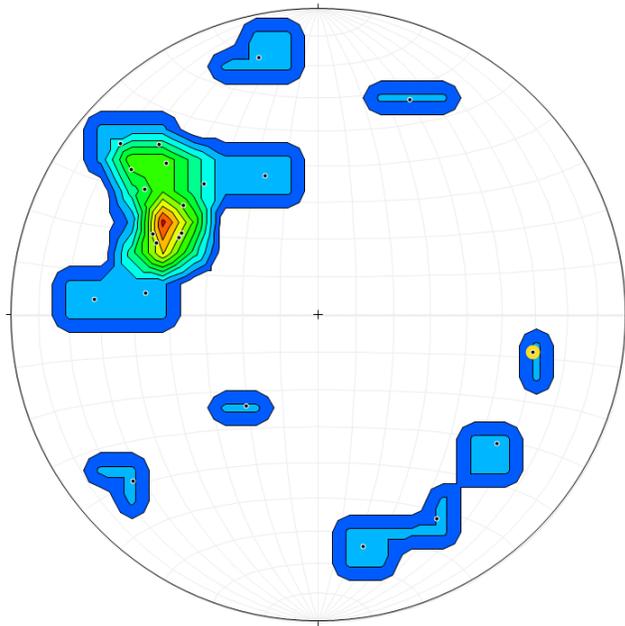


Figura 6.8: Estereograma com Rede de Schmidt, mostrando a orientação do acamamento sedimentar (S0) nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE. Contém 21 medidas de pólos de acamamento e o polo da Falha Principal (amarelo), e a densidade de pólos correspondente (isolinhas de contorno).

#### 6.1.3.1 716 RJKF

O subnível 716 RJKF é interceptado a leste pela falha de primeira ordem, que limita a porção mineralizada. Esta falha colocou lado-a-lado a brecha dolomítica, mais antiga à NE, e o dolarenito à

SW, além de uma porção de teto da brecha dolomítica, indicando movimento normal (Fig. 6.1). A falha de primeira ordem, representada pelo polo verde na Figura 6.11, tem mergulho 79 para a direção de mergulho 173 e não está mineralizada.

Ao longo do subnível, ocorrem falhas de segunda ordem, que movimentam a capa do minério na direção do mergulho, indicando movimento normal e gerando rejeitos aparentes de até 2m. Os rejeitos são igualmente observados nas falhas que interceptam as travessas TRM 3 à TRM 6, (Fig. 6.9A). Já nas travessas TRM 8 à TRM 10, o rejeito aparente é superior a 3 m, identificados pela movimentação da Unidade Dolarenítica estéril (Fig. 6.9B).

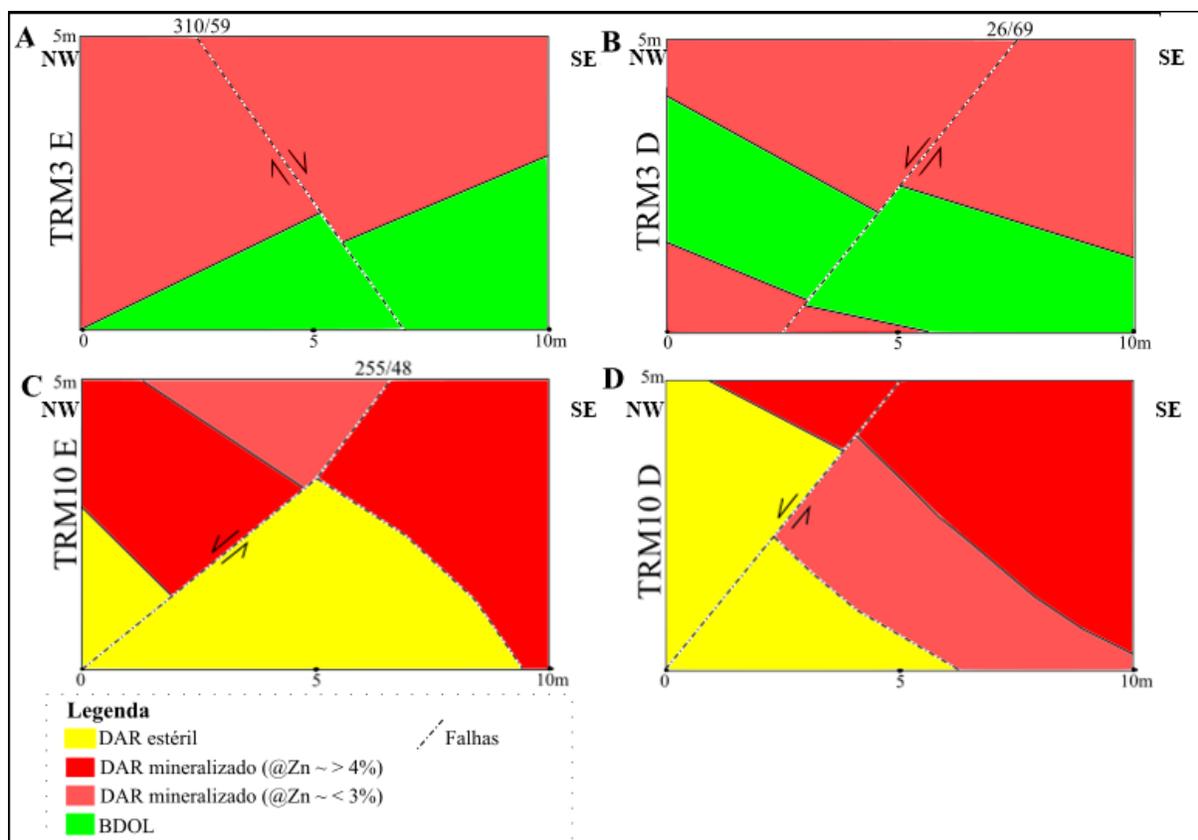


Figura 6.9: Croquis digitalizados das relações de movimento das falhas no subnível 716 RJKF. A- Falha normal com deslocamento das unidades, mas mantendo a brecha dolomítica na base da parede (croqui da parede direita da TRM3). B- Falha normal com deslocamento pouco significativo das unidades, mantendo na base o contato gradual das unidades de brecha dolomítica e Unidade Dolarenítica (croqui da parede direita da TRM3), C- Falha normal levemente curvada, deslocando a lente de dolarenito estéril (croqui da parede esquerda da TRM10); D- Falha normal deslocando a lentes de dolarenito estéril superior, expondo duas lentes de minério distintas em um contato de falha (croqui da parede direita da TRM10).

Na lateral esquerda da GM2 observam-se duas falhas normais, sem preenchimento por minério, com mergulhos similares porém para direções opostas (Fig. 6.10) A falha à direita do perfil (próximo do 27 m) tem mergulho 73 para direção 259 e desloca todo bloco da Unidade Dolarenítica, mineralizado e estéril para baixo (Fig. 6.10). A falha à esquerda (próxima de 20m) tem mergulho semelhante, mas direção oposta. Esta desloca o topo da brecha dolomítica e a base do dolarenito mineralizado para baixo. Entre as duas falhas há uma porção de minério com maior teor, com formas irregulares, controlado pelas duas falhas. Estas falhas

não só controlam a porção irregular entre elas, mas também controlam o minério à direita e o contato gradual da brecha dolomítica com o dolarenito mineralizado à esquerda (Fig. 6.10).

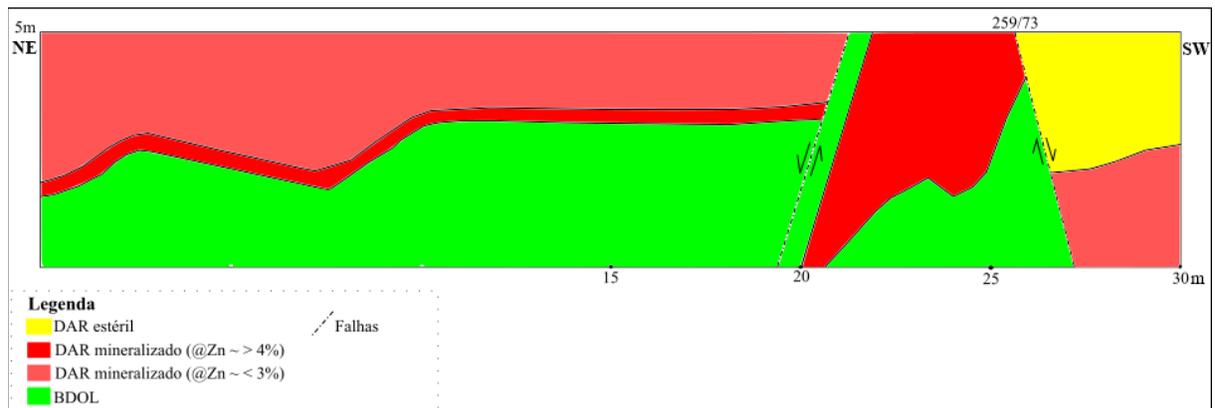


Figura 6.10: Croqui do perfil de caminhamento da 716 RJKF GM2, lado esquerdo, entre as TRMs 2 e 5. O perfil é composto por uma falha normal à direita, de atitude 259/73, e uma segunda falha à esquerda, de mergulho semelhante, mas direção oposta.

Foram coletadas 17 medidas de falhas ao longo da extensão do subnível, entre de primeira e segunda ordem, que de alguma maneira exercem um controle na disposição do minério. Não houve distinção entre as falhas que cortam diretamente o minério, pois são poucas falhas preenchidas com minério, sendo a maioria das falhas encontradas como a exposta na Figura 6.7B. A única característica utilizada para diferenciar as falhas foi o formato, distinguindo entre retilíneas e curvas, pois formatos diferentes podem indicar estágios diferentes de movimentação. As falhas curvas estão localizadas na GM2, TRM9 e TRM10, onde das travessas ambas estão do lado esquerdo, quando acessadas pela GM1. Os croquis com todas as falhas estão no Anexo 1.

O estereograma foi elaborado no *software Stereonet* e usa como base a Rede de Schmidt, e nela estão plotados todos os pólos de falha identificados (Fig. 6.11). A primeira família tem maior densidade de medidas (7) e possui direção NNW-SSE, com média de mergulho 67 para a direção 264 (Fig. 6.11). Uma 2ª família contendo 5 falhas tem orientação geral WNW-ESE e média de mergulho 61 para a direção 18, perpendicular à primeira família (Fig. 6.11).

Na primeira família está incluída uma das falhas curvas, de mergulho 48 para a direção 255, e a falha de primeira ordem. Uma segunda falha curva possui mergulho 26 para a direção 270 e não está vinculada a primeira família de pólos, porém possui a mesma orientação NNW-SSE. A terceira falha curva está em uma direção oposta às outras duas falhas, possui mergulho 25 para a direção 119. Todas as falhas curvas estão indicadas no estereograma pelos pólos amarelos (Fig. 6.11).

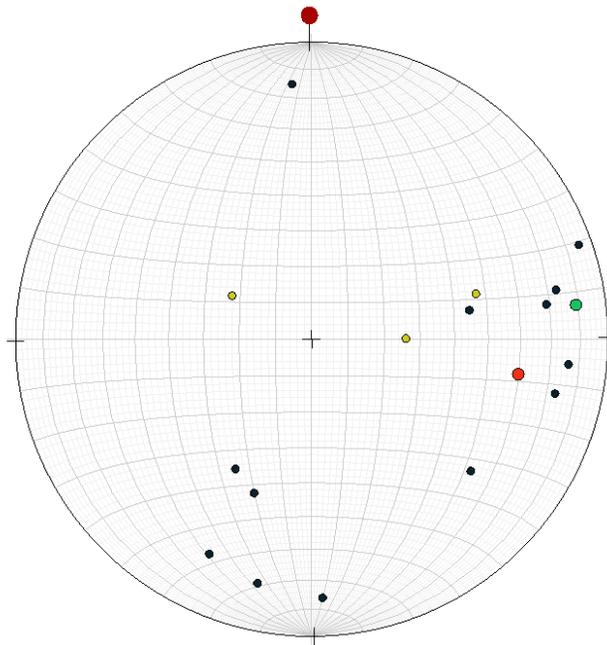


Figura 6.11: Estereograma elaborado no *software Stereonet* com Rede de Schmidt, subnível 716 RJKF. Polos de planos de 17 falhas, incluindo a Falha Principal (vermelho). Os polos foram separados em falha de primeira ordem (verde), falhas de segunda ordem retilíneas (preto) e falhas de segunda ordem curvas (amarelo).

#### 6.1.3.2 750 RJKE

Na entrada do subnível 750 RJKE ocorre a falha de primeira ordem, que limita o dolarenito mineralizado à SW do membro Mocambo à NE (Fig. 6.2). Estas unidades foram postas lado-a-lado, contudo, estas duas unidades são separadas estratigraficamente pela Unidade de Brecha Dolomítica, sugerindo que a falha tem movimentação normal. Esta tem média de mergulho 66 para a direção 248, indicado pelo polo verde na Figura 6.13.

Ao longo do subnível as poucas falhas de segunda ordem se concentram a partir da TRM9 à TRM11. Estas falhas são majoritariamente de movimentação normal, contudo pode ocorrer falhas de cavalgamento localizadas. No subnível 750 RJKF, identificou-se uma falha de cavalgamento, está medindo 20 m de comprimento exposto e possui mergulho 41 e direção para 140, representado pelo pólo laranja na Figura 6.13. Esta sobrepôs a brecha dolomítica da base em cima do dolarenito, unidades que não são encontradas nesta configuração (Fig. 6.12A). Além disso, lentes subparalelas de dolomito dentro da brecha dolomítica infletem para a zona de falha indicando movimento reverso (Fig. 6.12B).

As falhas normais possuem rejeito de 0,5 a 0,8 m, e em locais como o lado esquerdo TRM11, vê-se apenas o contato das unidades, e não é possível estimar o rejeito (Fig. 6.12C). Também na TRM11, do lado direito, ocorre um conjunto de falhas de diferentes orientações e mergulhos opostos, com movimento normal (Fig. 6.12D). Estas deslocam os blocos centrais e formam um *graben* alojando ao centro uma porção de minério mais rico.

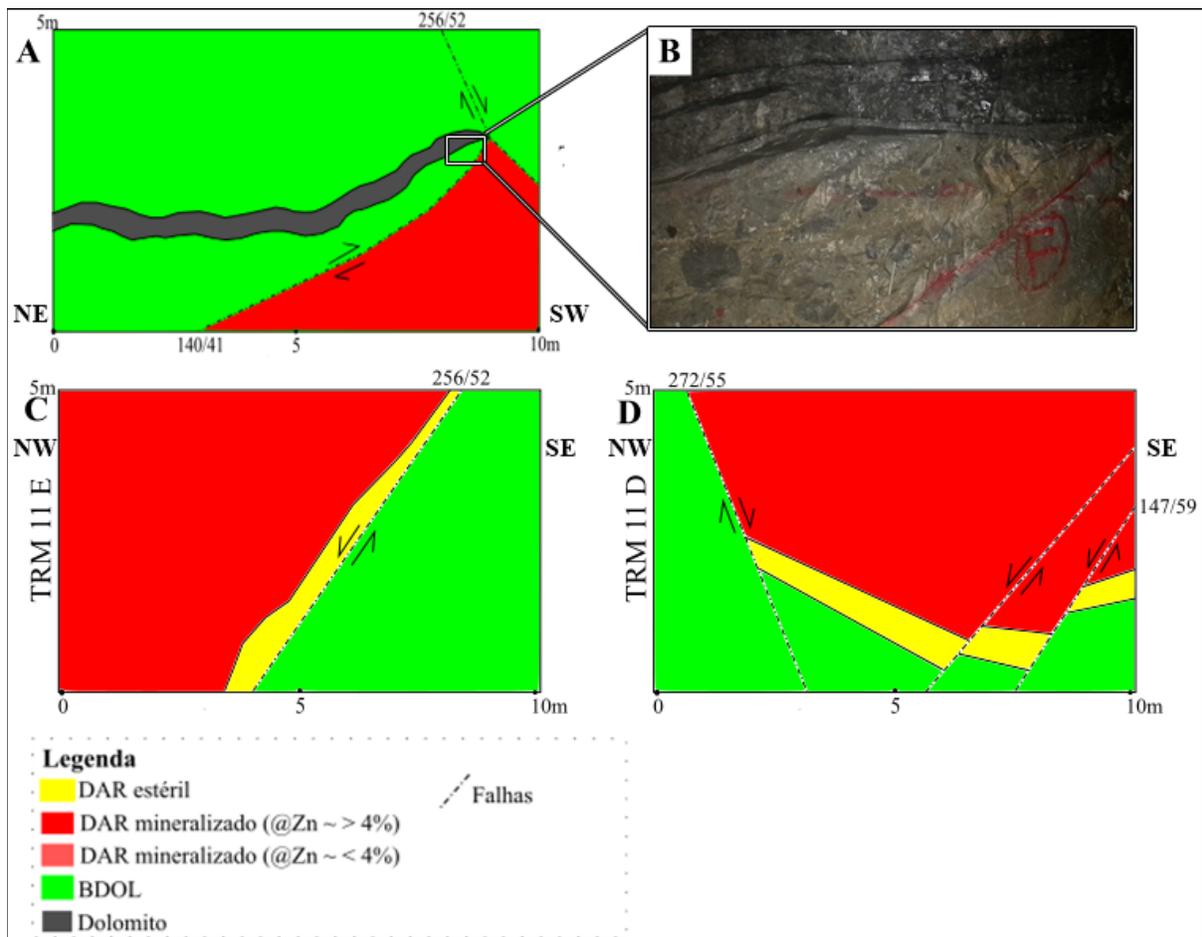


Figura 6.12: Croquis digitalizados das características de diferentes falhas na 750 RJKE. A- Falha de cavalgamento, onde a unidade de Brecha Dolomítica (BDOL) se encontra acima do dolarenito mineralizado (GM1, entre as TRMs 10 e 11); B- Fotografia local do cavalgamento, mostrando a brecha dolomítica sobreposto ao dolarenito, a falha indicada em vermelho e a lente de dolomito cinza escuro acima da zona de falha; C- Falha normal, contato brecha dolomítica e dolarenito de porção estéril, sem rejeito identificado (TRM 11 lado esquerdo); D- Falhas normais, com diferentes orientações e mergulhos, individualizando uma estrutura em graben com minério mais rico alojado no centro (Travessa TRM 11 lado direito).

Foram coletadas 13 medidas de falhas na extensão do subnível 750 RJKE, sendo falhas de primeira e segunda ordem, que deslocaram as unidades e o minério. A falha de primeira ordem, por possuir duas medidas, decidiu-se por plotar no estereograma o seu pólo médio destacado em verde, de mergulho 66 para a direção 248. O mesmo critério foi usado para a Falha Principal, destacada em vermelho, de mergulho 60 para a direção 280 (Fig. 6.13). A primeira família é composta por 3 falhas, apresentando *trend* NNW-SSE, com média de mergulho 66 para a direção 256 (Fig. 6.13). Como 2ª família, temos 3 falhas de direção NE-SW, com média de mergulho 51 para a direção 141, família na qual está inserido o cavalgamento. Com mergulho oposto à 2ª família, observa-se 2 falhas de direção NE-SW, de média de mergulho 46 com direção 334. Por fim, 2 falhas de *trend* N-S possuem média de mergulho 80 para a direção 266, e a falha classificada como curva com *trend* NNE-SSW de mergulho 35 para a direção 108, indicada como o pólo amarelo (Fig. 6.13).

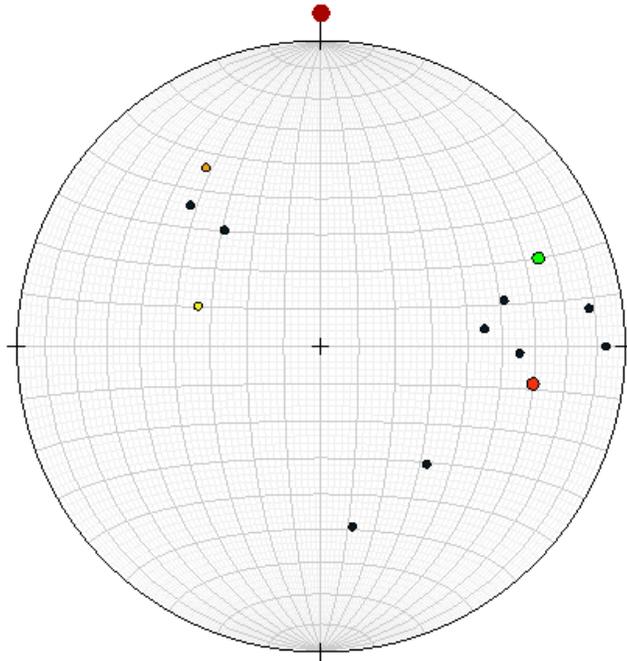


Figura 6.13: Estereograma elaborado no *software Stereonet* com Rede de Schmidt, subnível 750 RJKE. Polos de planos de 13 falhas, incluindo a Falha Principal (vermelho). Os polos foram separados em falha de primeira ordem (verde), falhas de segunda ordem retilíneas (preto), falhas de segunda ordem curvas (amarelo) e falha de cavalgamento (laranja).

## 6.2 Atualização do modelo exploratório das lentes JKL

O novo modelo exploratório das lentes J (azul), K (amarelo) e L (verde) na [Figura 6.14](#) contou com uma edição local, em que foram utilizados o mapeamento geológico e perfis de paredes dos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE, além dos teores de Zn-Pb dos testemunhos de sondagem. O cuidado tomado nesta etapa foi da geometria dos corpos, que apesar de remodelados, seguem as definições dadas na literatura. As observações e resultados serão expostos a seguir.

No subnível 716 RJKF, observamos a lente J quase imperceptível no modelo exploratório inicial, representada apenas por pequenas lentes descontínuas ([Fig. 6.14A](#)). Esta representação da lente J não contempla as mineralizações descritas pelos perfis de parede das travessas TRM2 a TRM 7, que estão agrupadas no [Anexo 1](#), e não correspondem às concentrações de teor dos testemunhos. Em galeria, a região das TRMs 2 a 7 possuem duas lentes de minério separadas por uma porção de dolarenito estéril, e esta característica foi acrescentada ao modelo. No ajuste do modelo, a lente J foi evidenciada, aumentando sua cobertura ao lado da lente K, separadas por uma área vazia ([Fig. 6.15B](#)). É interessante reparar que o modelo editado também reduziu a espessura da lente K na 716 RJKF, e incluiu uma porção da lente L na GM1, próxima a TRM8 ([Fig. 6.15B](#)).

No subnível 750 RJKE, a lente K apresentava um *gap* na GM1, próximo a TRM4, e as lentes JK estavam muito afastadas e com curvas acentuadas na região inicial da GM2 ([Fig. 6.15C](#)). Com o mapeamento, foi possível identificar a mineralização quase completa no dolarenito, desde a falha de primeira ordem na TRM2, até próximo a TRM9 ([Fig. 6.2](#)). Observando o modelo exploratório inicial, as lentes não cobriam as galerias em sua totalidade, sendo pouco representativas. Para resolver este problema, as edições foram necessárias para aproximar as lentes J e K na região da GM2 ([Fig. 6.15D](#)). Para o *gap* na lente K na

GM1, identificou-se a falta de cobertura de um testemunho de sondagem que o software não conectou com o restante da lente. Com a conexão do testemunho à lente J, o *gap* foi resolvido (Fig. 6.15D).

Outra região do modelo no subnível 750 RJKE chamou a atenção pela inconsistência da disposição das lentes na porção entre TRM9 e TRM11. Nesta região, a lente K cobre quase toda a extensão que, pelo mapeamento, é composta por brecha dolomítica. Segundo o mapeamento, na região entre TRM9 e TRM11 é onde ocorre maior concentração de falhas, e uma delas é caracterizada como reversa (Fig. 6.2). Ao analisar o feixe de testemunhos de sondagem, podemos observar, que há duas bandas de dolarenito separadas por um pacote de brecha dolomítica (Fig. 5.4A). Partindo para o ajuste do modelo, foi necessário alocar a lente J para a parte inferior das galerias, e diminuir a extensão da lente K nas TRMs 9 a 11. O resultado está representado na Figura 6.14D, uma aproximação do visto em galeria.

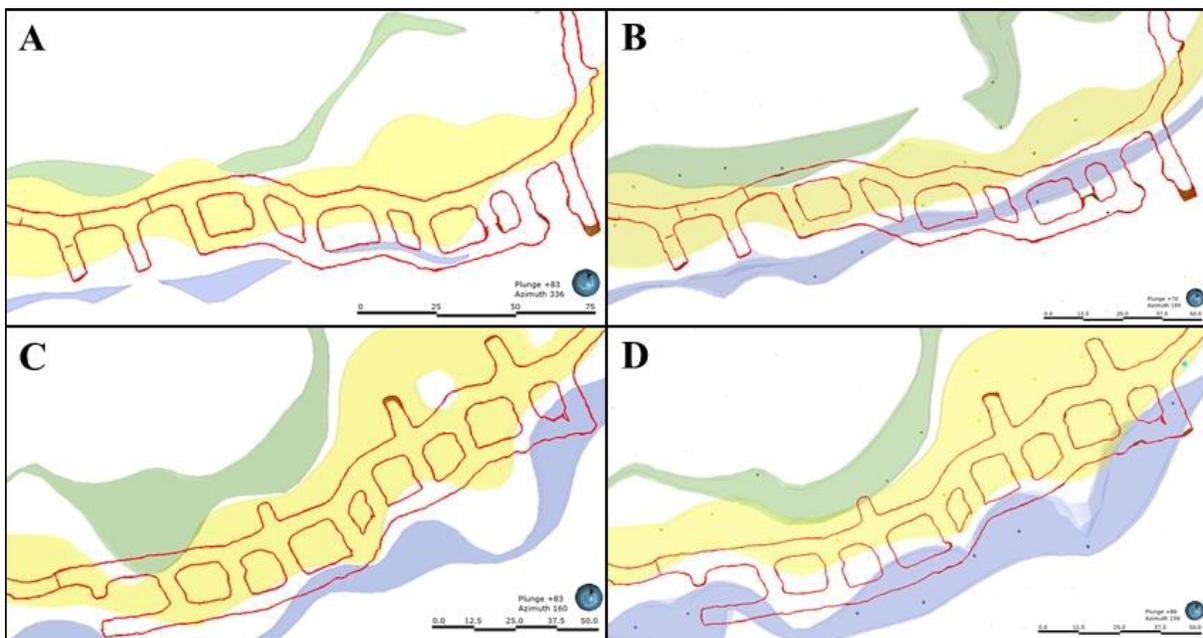


Figura 6.14: Visão em planta das lentes JKL, antes e depois da edição local das lentes de minério. J - azul, K - amarelo, L - verde. A- Planta do subnível 716 RJKF, com a disposição das lentes JKL pelo modelo implícito; B- Planta do subnível 716 RJKF após a edição manual; C- Planta do subnível 750 RJKE, com a disposição das lentes JKL pelo modelo implícito; D- Planta do subnível 750 RJKE após a edição manual.

## Capítulo 7: Discussão

A discussão abordará os seguintes tópicos: acamamento sedimentar, as texturas de minério e suas possíveis gerações, o contexto de fraturas e falhas de Morro Agudo, e as atividades de atualização do modelo exploratório das lentes JKL.

O acamamento sedimentar na Unidade Dolarenítica (DAR), encaixante do minério, analisado nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE apresentam *trend* preferencial NE-SW, e mergulho médio de 55 para a direção SE (Fig. 6.8). Os mergulhos acentuados das camadas da Formação Morro do Calcário sul levam Sotero (2019) a interpretar que as camadas foram controladas por sinformes suaves a abertas e por falhas normais. O que pode ser sugerido para a Unidade Dolarenítica na região estudada, é estar localizado em um

dos flancos das sinformes da Formação Morro do Calcário, acompanhando o *trend* NNE-SSW. [Dardenne \(2000\)](#) igualmente aponta que apesar da deformação, hidrotermalismo e metamorfismo sobrepostos, as relações estratigráficas do Grupo Vazante permaneceram bem preservadas.

As texturas de minério identificadas nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE, do Bloco F, foram divididas em três tipos, com base nas estruturas e texturas: cimento de granulação fina, vênulas e agregados de granulação média, e fraturas e falhas de granulação grossa. O minério mais antigo, representado pela textura em cimento de granulação fina, é caracterizado por um minério maciço, que ocupa porosidades e substitui o cimento dolomítico do dolarenito e das brechas ([Fig. 6.4B](#)). O cimento dolomítico, por sua vez, evidencia a ação epigenética da alteração hidrotermal precoce, que prepara o ambiente para percolação de fluidos sulfetados nos primeiros estágios de formação do modelo tipo *Mississippi Valley (MVT)* ([Paradis et al., 2007](#)). O segundo tipo de minério, caracterizado pela textura de vênulas e agregados, sobrepõe a textura de cimento de granulação fina de duas maneiras: (a) em forma de agregados de granulação média disseminados ([Fig. 6.5A](#)); e (b) em vênulas de gerações múltiplas ([Fig. 6.5C](#)). O terceiro tipo de minério é caracterizado pelo preenchimento de fraturas e falhas de granulação grossa, que cortam todas as texturas anteriores ([Fig. 6.6A](#)). Com as relações de sobreposição apresentadas, é possível correlacionar os três tipos de minério aqui definidos com a evolução de estágios de mineralização propostos por [Cordeiro et al., \(2018\)](#), sendo a textura de cimentação de granulação fina gerada em episódio que forma os sulfetos em brecha e maciços (*massive and breccia sulfides*); a textura de vênulas e agregados de granulação média gerada no episódio de sobreposição desenvolvendo sulfetos laminados (*overprinting and laminated sulfides*); e o terceiro minério em fraturas e falhas de granulação grossa gerado nos estágios tardios de preenchimento de fraturas (*late-stage fracture-filling sulfides*). Considerando trabalhos anteriores em Morro Agudo, [Dardenne e Schobbenhaus \(2001\)](#) sugerem que as diferentes texturas das lentes de minério indicam estágios de mineralização distintos, sendo tardi-diagenéticos a epigenéticos ([Fig. 4.3](#)). [Aldis et al., \(2021\)](#) igualmente citam que as mineralizações de Morro Agudo são caracterizadas por múltiplas gerações de esfalerita e galena. Com base nisso, sugere-se que as texturas encontradas nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE do Bloco F são produtos de três estágios de mineralização distintos e evolutivos.

As principais falhas analisadas nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE são falhas normais de primeira e segunda ordem com *trend* principal NNW-SSE, e mergulho W-WSW. Estas falhas estudadas estão provavelmente relacionadas à Falha Principal, de mergulho 60 e direção para 280, e pelas falhas normais paralelas secundárias, que dividem o depósito de Morro Agudo em blocos de A a E ([Rubo e Monteiro, 2010](#)). O fato de uma banda de brecha dolomítica, da base da sequência estratigráfica, estar entre duas bandas de dolarenito corrobora a existência de uma falha reversa de escala maior, que pode ter como subsidiárias as falhas de cavalgamento de 2ª ordem na escala de subnível ([Fig. 6.12B](#)). As falhas de segunda ordem com movimentação reversa observadas no subnível 750 RJKE já foram descritas por [Neto e Danderfer Filho \(2022\)](#) na mina de Ambrosia. [Sotero \(2019\)](#) apresenta uma zona de cisalhamento nas proximidades do depósito de Morro Agudo, na qual chamou de Zona de Cisalhamento Morro Agudo, de caráter transpressional dextral de direção NE-SW, que poderia estar associada aos movimentos

compressionais que geraram as falhas de cavalgamento do subnível 750 RJKE. Contudo para estas relações estruturais, se faz necessário uma análise estrutural em diferentes escalas, incluindo a escala regional.

A realização do mapeamento geológico e a confecção do croquis nos subníveis 716 RJKF e 750 RJKE resultou em dados importantes para a atualização do modelo exploratório de lentes JKL. Com o conhecimento de localização e movimentação das falhas, da presença dos litotipos e das áreas que abrangem o minério, a atualização das lentes se tornou uma tarefa mais rápida e melhor direcionada.

O modelo implícito das lentes JKL apresentou certa semelhança ao visto pelo mapeamento geológico dos dois subníveis, 716 RJKF e 750 RJKE. Apesar disso, foram identificadas algumas inconsistências, onde a edição das lentes foi mais intensificada. Segundo [Seequent \(2017\)](#), desenvolvedora do *software Leapfrog Geo*, a modelagem implícita facilita as transformações de dados de testemunhos de sondagem em modelos hipotéticos e manipuláveis, possibilitando inserção, exclusão e modificação de dados com rapidez. Os dados de testemunhos de sondagem, confeccionados e atualizados pelos geólogos da Nexa, foram essenciais para a compreensão e edição do modelo exploratório das lentes JKL. Para a atualização do modelo, alguns cuidados foram necessários no momento da edição. Definições importantes precisaram ser respeitadas, como: (a) a disposição das mineralizações em tipo lentes *stratabound* ([Romana e Costa, 1988](#); [Dardenne, 2000](#); [Cordeiro et al., 2018](#)); (b) a espessura das lentes, que se tornam menores a medida que se distanciam da Falha Principal ([Aldis et al., 2021](#)); e (c) a características das lentes *stratabound*, como granulação, textura e assembléia mineral ([Romana e Costa, 1988](#); [Dardenne, 2000](#); [Cordeiro et al., 2018](#)). Além disso, respeitar os três intervalos de concentração de teores Zn-Pb dos testemunhos foi priorizado ([Fig. 5.4B](#)).

As inconsistências encontradas durante a edição do modelo exploratório das lentes JKL estão relacionadas com os dados dos testemunhos de sondagem. Em algumas áreas, haviam testemunhos que não foram abrangidos pelo algoritmo do tipo veio. Esta deficiência do *software* causa lacunas nas informações, como por exemplo, o gap encontrado na lente K (amarelo) da 750 RJKE ([Fig. 6.14C](#)). No caso do subnível 750 RJKE, a malha de testemunhos de sondagem não foi suficiente, pois regiões sem dados de teores impossibilitaram a atualização mais fina das lentes ([Fig. 6.14D](#)). Em outros pontos, a lente J (azul) estava abrangendo teores que não correspondiam à rocha hospedeira, o dolarenito, colocando a lente nas porções dos testemunhos identificados como a brecha dolomítica. Nestes casos, foi preciso realocar a lente no testemunho de sondagem, para que ela estivesse localizada dentro do pacote de dolarenito. Outro caso interessante na atualização do modelo foram as regiões em que se identificou, a partir do mapeamento geológico, uma concentração maior de falhas que deslocam os litotipos e o minério, por movimento normal e reverso. O *software* não tem previsibilidade de características do pacote, como a presença de falhas e seus movimentos, e não consegue saber as características intrínsecas da rocha. Por conta disso, o modelo implícito desenhou as lentes JKL como se não houvessem falhas e variações de granulação, porosidade e cimentação da rocha. Isto levou as lentes a cobrir áreas que pelo mapeamento estão ausentes de minério característico das lentes JKL.

## Capítulo 8: Conclusões

Com base no mapeamento geológico e estrutural do subníveis 716 RJKF e 750 RJKE do Bloco F, e da atualização do modelo exploratório das lentes JKL da mina Zn-Pb de Morro Agudo, tem-se as seguintes conclusões:

- As texturas de minério identificadas pelo mapeamento geológico apontam para três episódios distintos de mineralização durante o processo de percolação de fluidos e formação do minério epigenético, correspondente ao modelo de depósito do tipo *Mississippi Valley* (MVT);
- As falhas de primeira e segunda ordem, de *trend* NNW-SSE e mergulho W-WSW, devem fazer parte do mesmo sistema da Falha Principal e de suas falhas subsidiárias subparalelas, que afetam o minério e dividem o depósito de Morro Agudo em blocos;
- A presença de falhas reversas secundárias foram identificadas no subnível 750 RJKE e foram inferidas pela banda da brecha dolomítica, base da sequência estratigráfica, alçada entre duas bandas de dolarenito, vistas em dados de testemunhos de sondagem. Estas podem sugerir a existência de falhas reversas ou transpressiva em escala regional;
- O modelo implícito das lentes JKL foi complementado pelo mapeamento geológico e estrutural dos subníveis e foi ferramenta fundamental para corrigir inconsistências e complementar as atividades de exploração mineral subterrânea.

Para as pesquisas futuras e implementação do modelo de lentes mais confiável sugere-se: desenvolver mapas de estruturas em escala regional; continuar com os mapeamentos estruturais e texturais de galeria com foco nas lineações; correlacionar os dados estruturais nas diferentes escalas; padronizar as malhas de sondagem com espaçamento padronizado de 10m entre os furos de sondagem.

## Referências Bibliográficas

- Aldis, C.; Olivo, G. R.; Arruda, J. A. A.; Cevik, I. S. (2021). **Proterozoic Carbonate-hosted Morro Agudo Sulfide Pb-Zn District, Brazil: Mineralogical and Geochemical Evidence of Fluid Mixing during the Ore Stage**. Ore Geology Reviews. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104592>
- Alkmim, F. F.; Martins-Neto, M. A. (2012). **Proterozoic first-order sedimentar sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil**. Mar. Petrol. Geol. 33, 127–139.
- Almeida, F. F. M. (1967). **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 36 p. (Boletim, 241)
- Almeida, F. F. M. (1977). **O Cráton do São Francisco**. Revista Brasileira de Geociências, 7(4), 349-364.
- Almeida, F. F. M. de, Hasui, Yf., Brito-Neves, B. B de, Fuck, R. A. (1981). **Brazilian Structural Provinces: an introduction**. Earth-Sci. Rev., 17: 1-29.
- Almeida, F. F. M. (1993). **Limites do cráton do São Francisco em Minas Gerais – Síntese dos conhecimentos**. In: SBG, Simpósio do Cráton do São Francisco 2, Salvador. Anais Salvador, p. 256-259.
- Azmy, K.; Veizer, J.; Misi, A.; Oliveira, T.F. de; Sanches, A.L.; Dardenne, M. A. (2001). **Dolomitizations an isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco Basin, Brazil**. Precambrian Research, 112:303-329.

- Azmy, K., Kendall, B., Creaser, R. A., Heaman, L., Oliveira, T. F. (2008). **Global correlation of the Vazante Group, São Francisco Basin, Brazil: Re-Os and U-Pb radiometric age constraints.** Precambrian Research, 164(3-4), 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.05.001>
- Baia, F. H. (2013). **Brechas Hidrotermais da Mina de Cercado e das Ocorrências de Olho d'água, Mata II e Pamplona: Implicações Metalogenéticas e Prospectivas para o zinco na região de Vazante, MG.** Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências - Universidade de Campinas, 230 p
- Braun, O.P.G. (1968). **Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí.** In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, XXII, Anais, p. 155-166.
- Cloud, P. E. & Dardenne, M. A. (1973). **Proterozoic age of the Bambui Group in Brazil.** Geol. Soc. Am. Bull., vol. 84, p. 1673 – 1676)
- Cunha I.A. (1999). **Estudos de inclusões fluidas e de isótopos de enxofre dos corpos de minério de Morro Agudo, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, 105 p.
- Cunha, I.A., Coelho, C., Misi, A., (2000). **Fluid inclusion study of the Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil.** Brazilian J. Geol. 318–321.
- Cunha I.A., Misi A., Babinski M., Iyer S.S.S. (2007). **Lead isotope constraints on the genesis of Pb-Zn deposits in the Neoproterozoic Vazante Group, Minas Gerais, Brazil.** Gondwana Research, 11:382-395.
- Dardenne, M. A. (1972). **A mineralização sulfetada de Pb-Zn de Morro Agudo (MG-Brasil).** XXVI Congresso Brasileiro de Geologia. Resumos, Boletim 1, p. 55-56. Belém: SBG
- Dardenne, M. A. (1976). **Tipos de depósitos de chumbo e zinco no Grupo Bambuí de Minas Gerais.** In:SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Resumos, p. 289.
- Dardenne, M. A. (1979). **Les minéralisations plomb-zinc du Groupe Bambui et leur contexte géologique.** Paris, Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), Thèse de Doct. Etat., 275 p.
- Dardenne, M. A. (1981). **Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa dobrada Brasília. Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais,** Anais, CPM/SBG, p. 140 – 157.
- Dardenne, M.A., Freitas-Silva, F.H., Nogueira, G.S.M., Souza, J.C.F. (1997). **Depósitos de fosfato de Rochinha e Lagamar, Minas Gerais.** In: C. Schobbenhaus, E.T. Queiroz, C.E.S. Coelho, (coords.) Principais Depósitos Mineraiis do Brasil. DNPM/CPRM, p.:113-122.
- 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., (1998). **Depósitos Pb-Zn-F-Ba do Supergrupo São Francisco,** in: 40º Congresso Brasileiro de Geologia. Belo Horizonte, pp. 133.
- Dardenne, M.A., Freitas-Silva, F.H., (1999). **Pb-Zn ore deposits of Bambuí and Vazante groups in Sao Francisco craton and Brasília fold belt, Brazil.** In: Silva, M.G., Misi, A. (Eds.), Base Metal Deposits of Brazil. MME/CPRM/DNPM, Belo Horizonte, pp. 75–83.
- Dardenne, M. A. (2000). **The Brasilia fold belt.** In: U. G. Cordani, E. G. Milani, A. Thomaz Filho, D. A. Campos (Eds.). Tectonic evolution of South America, p. 231-264. 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro.
- Dardenne, M. A., Schobbenhaus, C. (2001). **Metalogênese do Brasil.** Brasília: Editora Universidade de Brasília. 392p.
- Dias, P. H. M., Marinho, M. D. S., Sotero, M. P., Vilela, F. T., Marques, E. D., Matos, C. A. (2015). **Metalogenia das províncias mineraiis do Brasil: Distrito Zinífero de Vazante, MG - Estado de Minas Gerais.** Informe de Recursos Mineraiis - Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

- Dias, P. H. A., Sotero, M. P., Matos, C. A., Marques, E. D., Marinho, M. D. S., Couto Junior, M. A. (2018). **Área de Relevante Interesse Mineral-ARIM: distrito mineral de Paracatu-Unai (Zn-Pb-Cu), MG.** Informe de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil - CPRM.
- Fernandes, N. A., Olivo, G. R., Layton-Matthews, D., Voinot, A., Chipley, D., Diniz-Oliveira, G., (2019). **Geochemistry and provenance of siliciclastic rocks from the Mesoproterozoic Upper Vazante Sequence, Brazil: Insights on the evolution of the southwestern margin of the São Francisco Craton and the Columbia Supercontinent.** Precambrian Res., v. 335, 105483.
- Fuck, R. A.; Jardim, de Sá E. F.; Pimentel, M. M.; Dardenne, M. A.; Pedrosa Soares, A.C. (1993). **As faixas de dobramento marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos.** In: Dominguez J.M.L. & Misi A., (eds.) O Cráton do São Francisco. SBG/SMG/CNPq, Salvador, 161-185.
- Fuck, R. A. (1994). **A Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica da Província Tocantins.** IV Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. Anais, p. 184-187. Brasília: SBG.
- Fuck, R. A., Pimentel, M. M., Soares, J. E. P., Dantas E. L. (2005). **Compartimentação da Faixa Brasília.** IX Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. Atas, p. 26-27. Goiânia: SBG.
- Haldar, S. K. (2013). **Mineral Explorations: Principles and Applications.** Second Edition. Elsevier. 334p.
- Hartman, H. L., Mutmanský, J. M. (1987). **Introductory Mining Engineering.** Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. Tuscaloosa, Alabama.
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., de Almeida, F. F. M., & Bartorelli, A. (Eds.). (2012). **Geologia do Brasil.** Beca.
- Holland, H. D., Turekian, K. K. (2014). **Treatise on Geochemistry.** Second Edition. Elsevier Science. 454p.
- Madalosso, A., Valle, C. R. (1978). **Considerações sobre a Estratigrafia e Sedimentologia do Grupo Bambuí na Região de Paracatu – Morro Agudo (MG).** XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Anais, 2, 622-634. Recife: SBG.
- Marjoribanks, R. (2010). **Geological methods in mineral explorations and mining.** Second Edition. Springer. 248p.
- Martins-Neto, M. A. & Alkmim, F. F. (2001). **Estratigrafia e evolução tectônica das bacias Neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana.** In: Pinto C.P. & Martins-Neto M.A. (eds.). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. SBG-MG, Belo Horizonte, p.31-54.
- Misi, A., Iyer, S.S., Tassinari, C.C.G., (1996). **Boquira (2.5 Ga) and Morro Agudo (0.65 Ga) Lead-Zinc deposits, Brazil: new SEDEX subtypes?,** in: 39º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, pp. 251–253.
- Misi, A.; Veizer, J.; Kawashita, K.; Dardenne, M. A. (1997). **The age of the Neoproterozoic carbonate platform sedimentation based on 87Sr/86Sr determinations, Bambuí and Una Groups, Brazil.** In: I South American Symposium on Isotope Geology, Campos do Jordão, São Paulo, Brazil, Extended Abstracts, pp. 199–200.
- Misi, A., Iyer, S.S., Tassinari, C.C.G., Kyle, J.R., Coelho, C.E.S., Franca-Rocha, W.J.S., Gomes, A.S.R., Cunha, I.A., Carvalho, I.G., 1999. **Geological and isotopic constraints on the metallogenic evolution of the proterozoic sediment-hosted Pb-Zn (Ag) Deposits of Brazil.** Gondwana Res. 2, 47–65.
- Misi, A., Kaufman, A. J., Veizer, J., Powis, K., Azmy, K., Boggiani, P. C., Gaucher, C., Teixeira, J. B. G., Sanches, A. L., Iyer, S. S. (2007). **Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America.** Chemical Geology, 237(2), 143-167. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.06.019>

- Misi, A., Azmy, K., Kaufman, A. J., Oliveira, T. F., Sanches, A. L., Oliveira, G. D. (2014). **Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: implications to metallogenic and phosphogenic models.** *Ore Geology Reviews*, 63, 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.002>
- Monteiro, L. V. S.; Bettencourt, J. S.; Juliani, C.; Oliveira, T. F. (2006). **Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil.** *Ore Geology Reviews*, 28:201-234.
- Neto, B. B., & Danderfer Filho, A. (2022). **Drill core structural analysis and extensional-contractional controls on the sulfide mineralization at the Ambrosia Sul zinc deposit, Vazante group, Western São Francisco craton, Brazil.** *Journal of Structural Geology*, 154, 104474.
- Neves, L. P. (2011). **Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb Morro Agudo, Grupo Vazante.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília- UNB. 89p.
- Oliveira, M. M. (2012). **Dimensionamento empírico de realce em Sublevel Stoping.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Paradis, S., Hannigan, P., Dewing, K., 2007. . **Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits.** In: Goodgellow, W.D. (Ed.), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods.* Mineral Deposits Division, pp. 185–203.
- Pinho, J. M. M., Féboli, W. L., Signorelli, N., Tuller, M. P., Brito, D. C., Ribeiro, J. H., Baptista, M. C., Silva, R. N. (2017). **Geologia e recursos minerais das folhas: Cabeceira Grande, Unaí, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas. Escala 1:100.000.** 344 p. Belo Horizonte: CPRM
- Rigobello, A. E., Branquinho, J. A., Dantas, M. G. S., Oliveira, T. F., Neves-Filho, W. (1988). **Mina de zinco de Vazante.** In: C. Shobbenhaus, C. E. S. Coelho (Eds.). *Principais depósitos minerais do Brasil* (3, 101-110). Rio de Janeiro: DNPM.
- Rodrigues, J. B., Pimentel, M. M., Buhn, B., Matteini, M., Dardenne, M. A., Alvarenga, C. J. S., Armstrong, R. A. (2012). **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*, 21(2-3), 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.017>
- Romagna, G., Costa, R. R. (1988). **Jazida de zinco e chumbo de Morro Agudo, Paracatu, Minas Gerais.** In: C. Schobbenhaus, C. E. S. Coelho (Eds.). *Principais Depósitos Minerais do Brasil* (III, 83-90). Brasília: DNPM.
- Rubo, R. A., Monteiro, L.V. S., (2010). **Sistemática de isótopos de oxigênio e carbono aplicada ao estudo da evolução metalogenética do depósito de Zn-Pb de Morro Agudo (MG).** *Brazilian J. Geol.* 40, 438–452.
- Sotero, M. P. (2019). **Sedimentologia e estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio do Grupo vazante na região de Morro Agudo, Paracatu/MG.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais. 106p.
- Sotero, M. P., Caxito, F. A., Dias, P. M. A., Sotero, B. A. (2019). **Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região da mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais.** *Revista do Instituto de Geociências - USP. Geol. USP, Sér. cient., São Paulo*, v. 19, n. 2, p. 199-214, Junho 2019. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v19-144761.
- Valeriano C. M.; Dardenne M. A.; Fonseca M. A.; Simões L. S. A.; Seer, H. J. (2004). **A Evolução Tectônica da Faixa Brasília.** In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds). *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* Beca, São Paulo, p. 575-592.

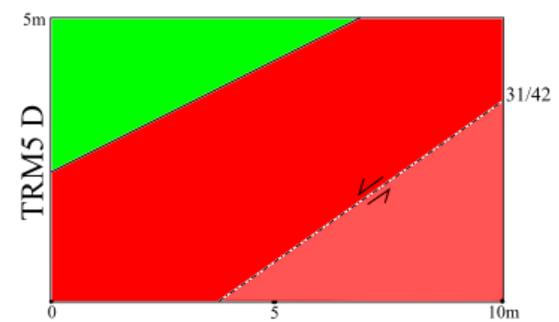
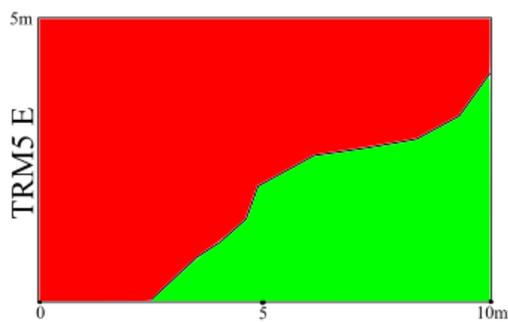
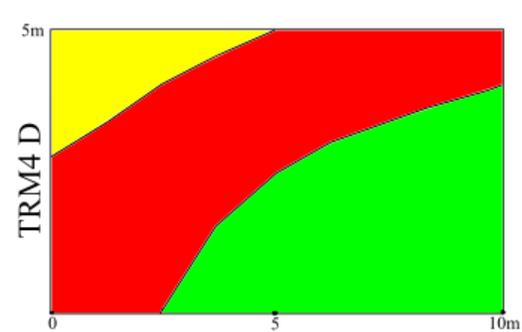
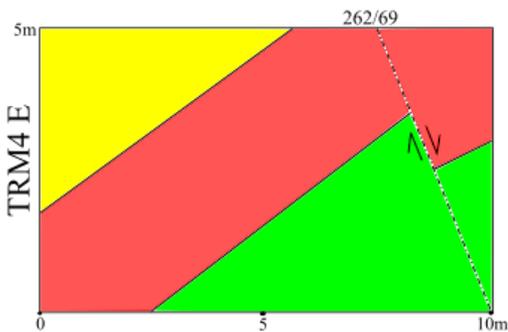
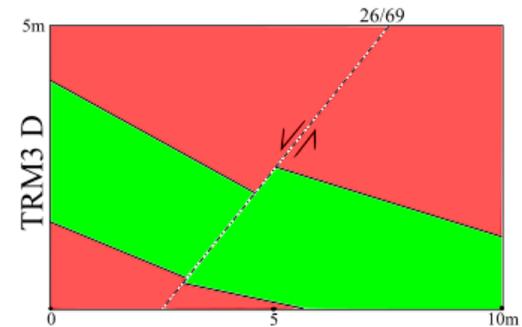
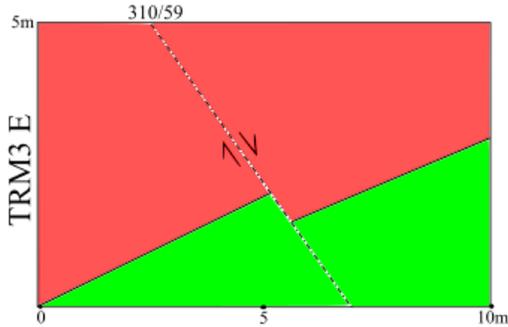
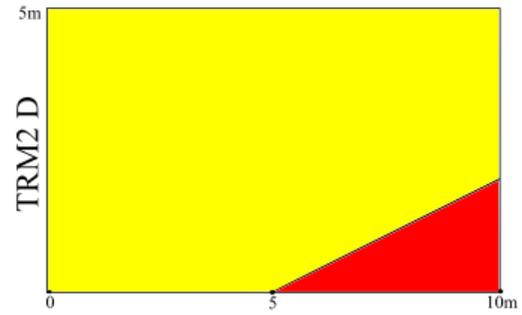
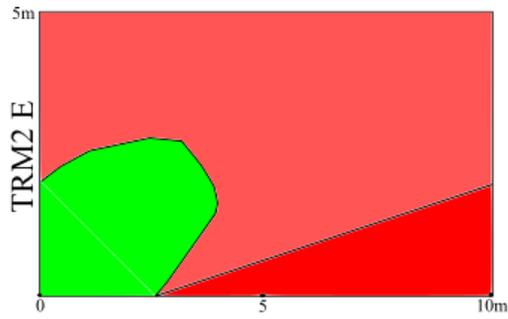
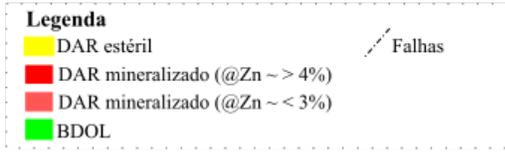
Valeriano C. M., Pimentel M. M., Heilbron M., Almeida J. C. H., Trouw R. A.J. (2008). **Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana**. Geological Society, London, Special Publications 284:197-210.

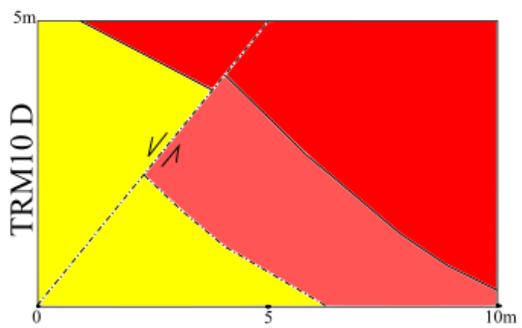
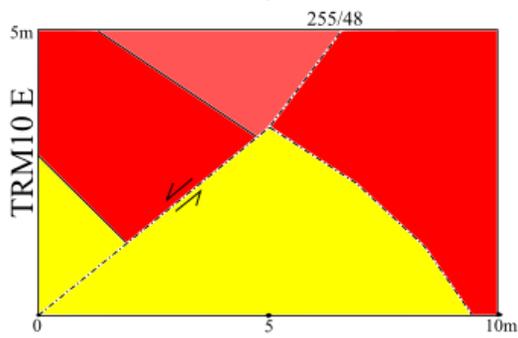
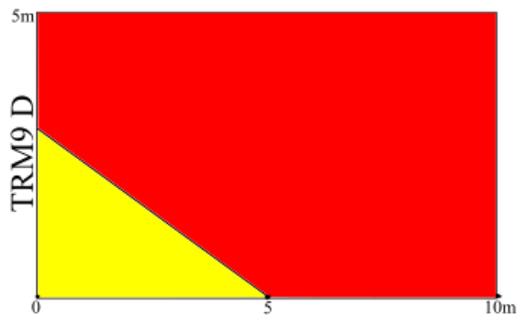
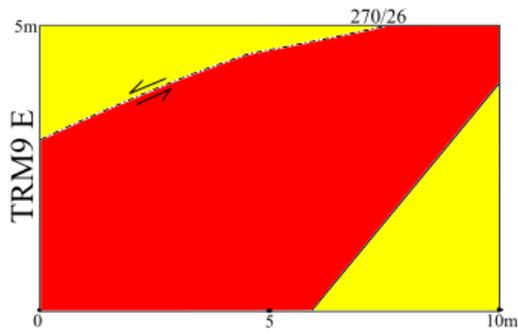
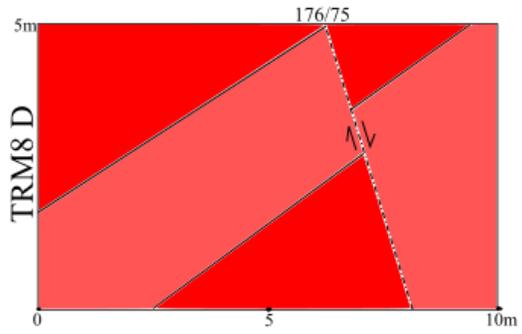
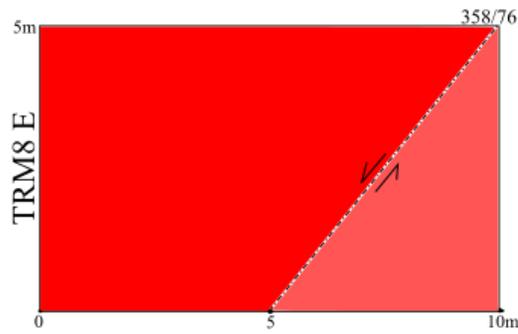
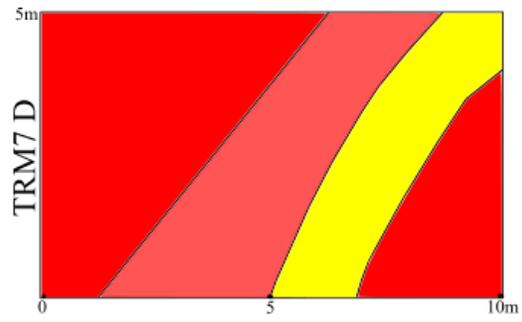
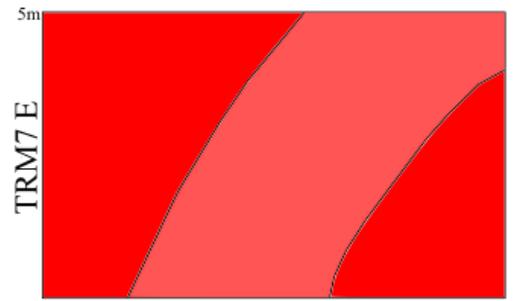
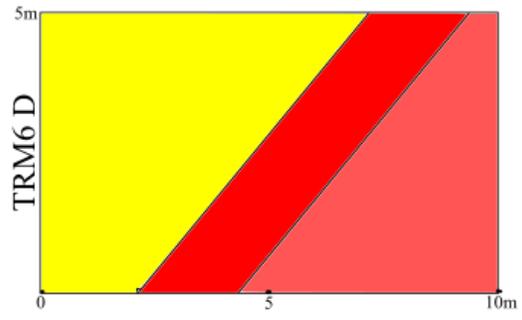
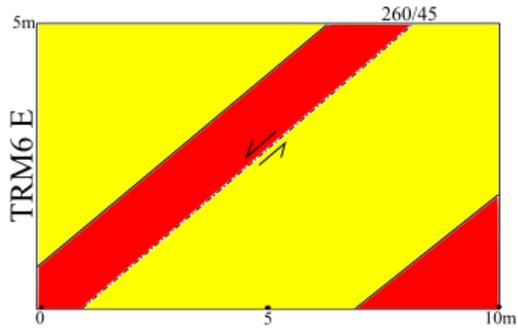
Votorantim Metais (2017). **Morro Agudo Project, Minas Gerais State, Brazil. NI 43-101 Technical Report on Preliminary Economic Assessment**. Link: <[https://www.miningdataonline.com/reports/MorroAgudo\\_PEA\\_07252017.pdf](https://www.miningdataonline.com/reports/MorroAgudo_PEA_07252017.pdf)>. Acesso em 17/06/2022.

# Anexos

## Anexo 1: Perfis de caminhada *subnível* 716 RJKF

### Perfis Sublevel 716 RJKF lados direito e esquerdo das travessas

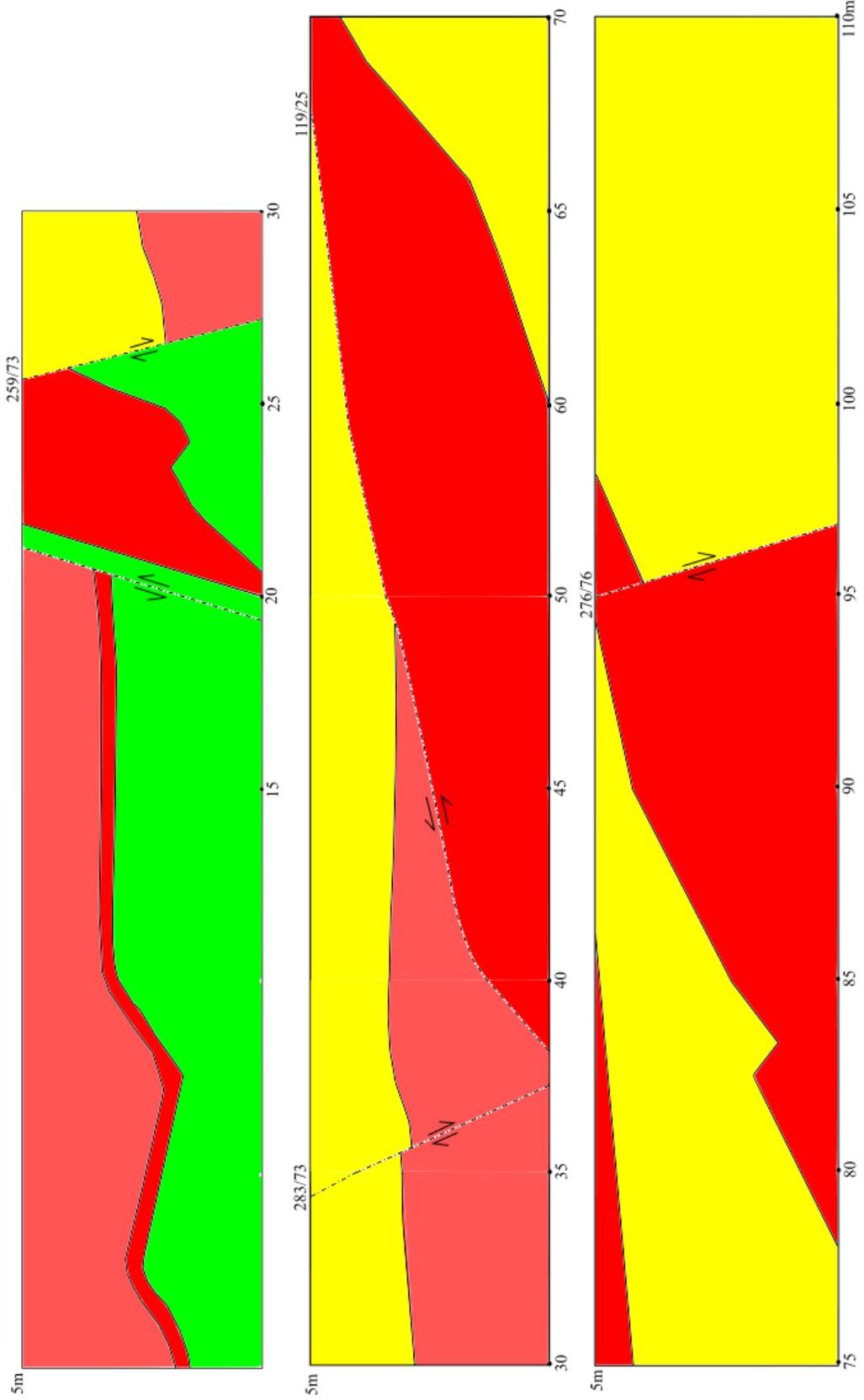
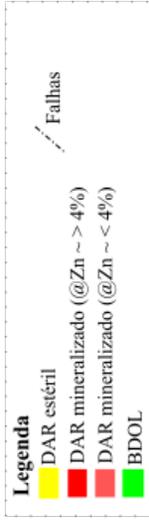




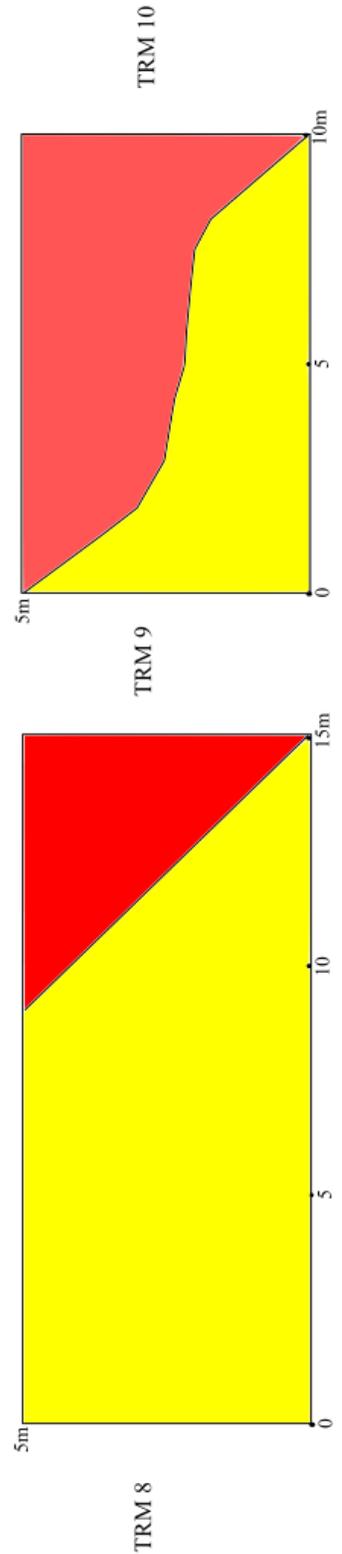
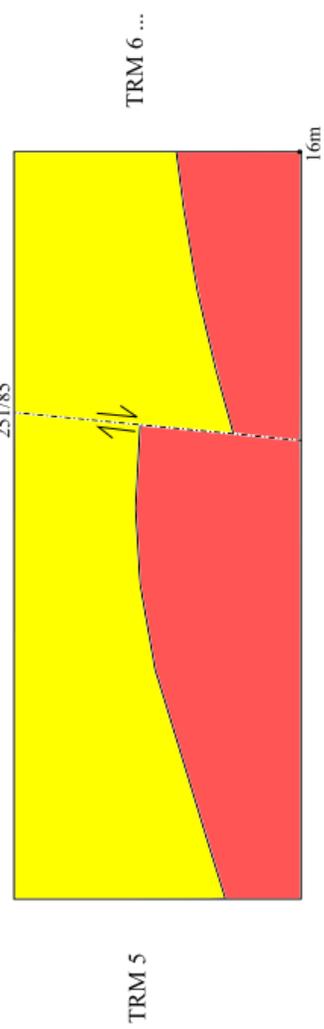
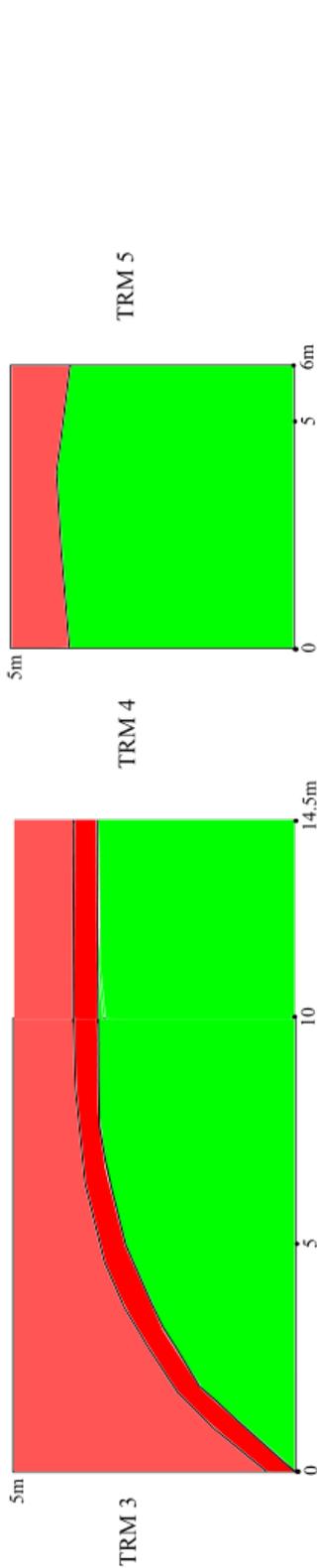
### Perfis Sublevel 716 RJKF

parede direita - GM2

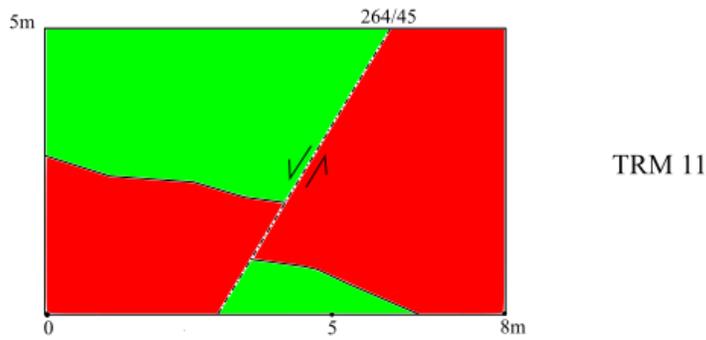
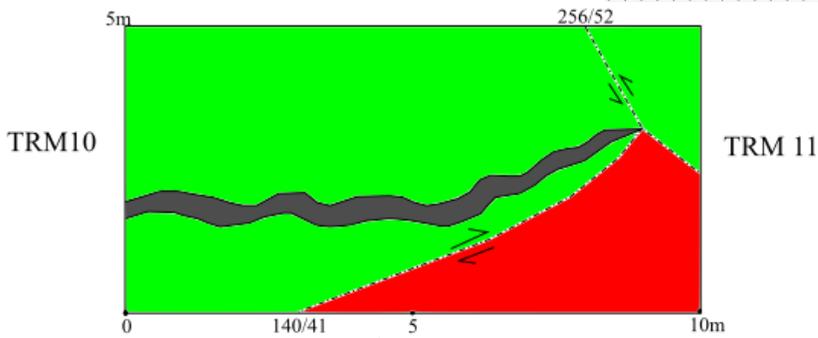
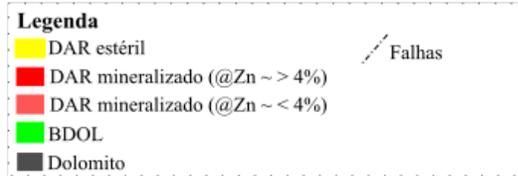
TRM 3 A TRM 10



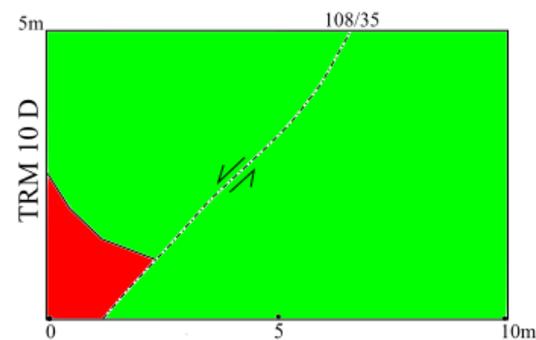
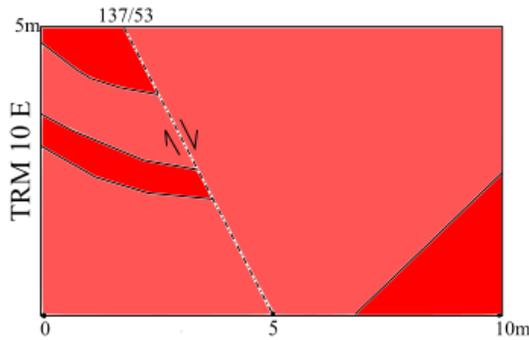
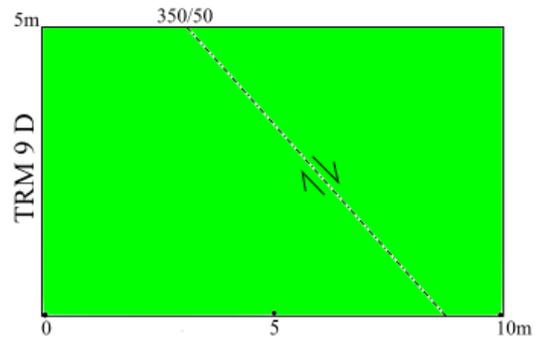
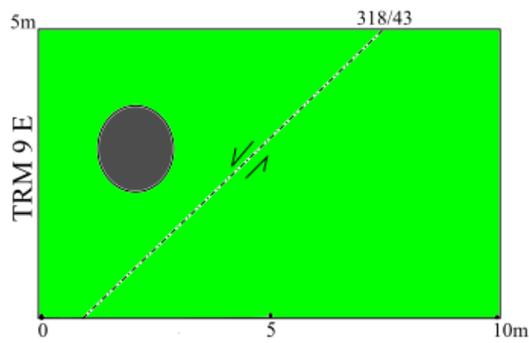
**Perfis Subnivel 716 RJKF**  
 parede esquerda - GM2  
 TRM 3 A TRM 6, TRM 8 A TRM 10

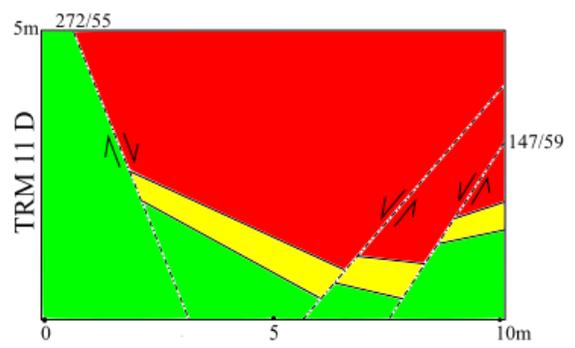
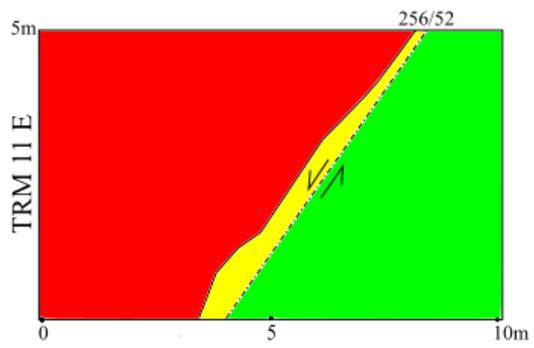


**Perfis Sublevel 750 RJKE**  
 parede direita e esquerda- GM1  
 TRM 10 A TRM 11



paredes das travessas  
 TRM 9 A TRM 11





Anexo 3: Tabelas com dados estruturais

<b>Falhas e fraturas 716 RJKF</b>			
	<b>dip direction</b>	<b>dip</b>	<b>Localização</b>
1	310	59	falha, TRM 3 lado esquerdo - continuidade na parede direita
2	251	85	falha, GM 2 lado direito, entre TRMs 5 e 6
3	259	73	falha, GM 2 lado esquerdo, entre TRMs 7 e 8 - continuidade na parede direita
4	21	46	fratura, GM 1 lado direito, próximo a TRM 6
5	260	45	falha, TRM 6, lado esquerdo
6	13	73	falha, GM2 lado esquerdo, entre TRMs 7 e 8
7	176	75	falha, TRM 8, lado direito - continuidade na parede esquerda
8	358	76	falha, TRM 8, lado esquerdo - continuidade da parede direita
9	270	26	falha, TRM 9, lado esquerdo - continuidade da falha da GM 2 parede esquerda, próximo a TRM 9
10	276	76	falha, GM 2 lado esquerdo, próximo a TRM 9 - continuidade na TRM 9 lado esquerdo
11	255	48	falha, TRM 10 lado esquerdo - continuidade na parede direita
12	262	69	falha TRM 4 lado esquerdo - continuidade na GM 2 lado esquerdo
13	26	69	falha, TRM 3, lado direito - continuidade na parede esquerda
14	31	42	falha, TRM 5, parede direita
15	283	73	falha, GM 2, lado esquerdo - próximo a TRM 5 e limita BDOL de DAR
16	119	25	falha, GM 2, lado esquerdo, entre TRMs 5 e 6 - continuidade na parede
17	173	79	entrada do subnível, falha de primeira ordem

<b>Falhas e fraturas 750 RJKE</b>			
	<b>dip direction</b>	<b>dip</b>	<b>Localização</b>
1	272	55	falha, GM 2 lado esquerdo, depois da TRM 11 - continuidade na TRM 11 e GM 1
2	256	52	falha, TRM 11 lado esquerdo - continuidade na GM 2 e GM 1
3	264	45	falha, GM 1, lado direito - continuidade na TRM 11 e GM 2
4	140	41	falha, GM 1 lado esquerdo, entre TRMs 10 e 11 - cavalgamento
5	147	59	falha, TRM 11, lado direito - próximo a GM 1, continuidade na parede entre TRMs 10 e 11, cavalgamento
6	108	35	falha, TRM 10, lado direito - continuidade na parede esquerda
7	137	53	falha, TRM 10, lado esquerdo - continuidade na parede direita
8	350	50	falha, TRM 9, lado direito - continuidade na parede esquerda
9	318	43	falha, TRM 9, lado esquerdo - continuidade na parede direita
10	270	83	falha, TRM 6, lado direito - continuidade na parede esquerda
11	262	78	falha TRM 6, lado esquerdo - continuidade na parede direita
12	243	70	falha de primeira ordem, entrada do subnível - continuidade na TRM 2
13	254	63	falha de primeira ordem, TRM 2 - continuidade na entrada do subnível



# PLANTA NÍVEL 750

Frente 750M's

Desen.

Planejamento de Mina

Folha Nº  
1/1

Projetista:  
Leonardo Guimarães

Data:  
Junho\_2022

■ Desenvolvimento realizado

Esc:

1:500

COORDENADAS GEODÉSICAS UTM  
PROJEÇÃO COORDENADAS  
N - Datum brasileiro 1964  
E - Escala 47 metros = 1:50.000  
Datum 1964

