

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISCIPLINA 0440500 – TRABALHO DE FORMATURA – 2024

Monografia - TF 24/05

**Caracterização da alteração hidrotermal e minério do depósito de Zn-Pb de Fagundes,
Província Mineral Vazante-Paracatu, MG**

Aluno: Bruno Oliver Alves Silva (Nº USP 10883679)

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Silva Pestilho – Departamento GSA

Coorientador: Prof. Dr. R. Agustin Mors – CICTERRA (CONICET-UNC)

São Paulo

2024

Caracterização da Alteração Hidrotermal e Minério do Depósito de Zn-Pb de Fagundes, Província Mineral Vazante-Paracatu, MG

Resumo

O presente estudo objetivou a caracterização da alteração hidrotermal e o minério do depósito de Zn-Pb Fagundes, localizado no Distrito Mineral de Vazante–Paracatu, no estado de Minas Gerais. O distrito mineral de Vazante-Paracatu representa o maior distrito zincífero do país, em que se insere o depósito de Fagundes, além de vários outros depósitos importantes, tais como, Vazante, Morro Agudo e Ambrósia. O depósito de Fagundes foi classificado como tipo Mississippi Valley (MVT) por caracterizar-se de um depósito epigenético, stratabound, hospedado nos carbonatos marinhos da Formação Morro do Calcário. As rochas hospedeiras do depósito de Fagundes são representadas por dolomitos cristalinos, boundstones estromatolíticos laminares e colunares e, ocasionalmente, rudstones intraclásticos ou brechas sindeposicionais. As características epigenéticas deste depósito incluem brechamento, dissolução, preenchimento de espaços abertos com dolomita e sílica, fraturamento, preenchimento de veios, dolomitização e silicificação. O minério na zona mineralizada é hospedado principalmente por *cemented crackle packbreccias* e *cemented rubble floatbreccias* e apresenta duas formas principais de ocorrência, que pode estar associada às brechas e aos veios. Ambos apresentam esfalerita, pirita e galena associadas a dolomita branca de granulação grossa. A silicificação é um processo de pré-mineralização com o preenchimento de espaços abertos, que envolveu a substituição de dolomita por calcedônia e quartzo. É comum a ocorrência de esfalerita e pirita coloformes, marcassita e galena, com texturas de preenchimento ou substituição, além de pirita euédrica preenchendo espaços abertos e estilólitos, relacionados ao estágio de mineralização principal. Dolomita em sela de granulação grossa com faces de cristal curvas ocorre como cimento de fratura e preenchimento de cavidade. As rochas apresentam feições semelhantes e processos similares aos descritos para o depósito de Fagundes, como sugerido pela ordem de formação de eventos e as associações minerais, porém registram significativa remobilização associado a formação de veios tardios. Distintivamente do depósito de Fagundes descrito anteriormente, este estudo identificou a associação temporal de minerais relacionada à gênese do minério com a formação prévia de brechas.

Palavras-chave: Vazante-Paracatu, zinco, brecha hidrotermal, depósito MVT, esfalerita.

Characterization of Hydrothermal Alteration and Ore of the Fagundes Zn-Pb Deposit, Vazante-Paracatu Mineral Province, MG

Abstract

The present study aimed to characterize the hydrothermal alteration and ore of the Fagundes Zn-Pb deposit, located in the Vazante–Paracatu Mineral District, in the state of Minas Gerais. The Vazante–Paracatu Mineral District represents the largest zinc-producing district in the country, encompassing the Fagundes deposit as well as several other significant deposits, such as Vazante, Morro Agudo, and Ambrósia. The Fagundes deposit has been classified as a Mississippi Valley Type (MVT) deposit, as it is an epigenetic, stratabound deposit hosted in the marine carbonates of the Morro do Calcário Formation. The host rocks of the Fagundes deposit are represented by crystalline dolomites, laminar and columnar stromatolitic boundstones and, occasionally, intraclastic rudstones or syndepositional breccias. The epigenetic characteristics of this deposit include brecciation, dissolution, filling of open spaces with dolomite and silica, fracturing, vein filling, dolomitization and silicification. The ore in the mineralized zone is hosted mainly by cemented crackle packbreccias and cemented rubble floatbreccias and presents two main forms of occurrence, which may be associated with breccias and veins. Both deposits present sphalerite, pyrite and galena associated with coarse-grained white dolomite. Silicification is a pre-mineralization process with the filling of open spaces, which involves the replacement of dolomite by chalcedony and quartz. The occurrence of colloform sphalerite and pyrite, marcasite and galena, with filling or replacement textures, is common, in addition to euhedral pyrite filling open spaces and stylolites, related to the main mineralization stage. Coarse-grained saddle dolomite with curved crystal faces occurs as fracture cement and cavity filling. The rocks present similar features and processes to those described for the Fagundes deposit, as suggested by the order of formation events and mineral associations, but they record significant remobilization associated with the formation of late veins. Distinctly from the previously described Fagundes deposit, this study identified the temporal association of minerals related to the genesis of the ore with the previous formation of breccias.

Keywords: Vazante-Paracatu, zinc, hydrothermal breccia, MVT deposit, sphalerite.

Lista de Figuras

- Figura 1.** A) Localização da Faixa Brasília e do Cráton São Francisco (Aldis *et al.*, 2022). B) Geologia regional da faixa Brasília com a localização do Grupo Vazante e dos depósitos de Zn-Pb de Vazante, Morro Agudo, Fagundes e Ambrósia (Misi *et al.*, 2014). C) Geologia do distrito mineral Vazante-Paracatu (Monteiro *et al.*, 2006; Fernandes *et al.*, 2019a,b). D) Perfil Geológico da Faixa Vazante (Cia. Mineira de metais, 1982).9
- Figura 2.** Coluna litoestratigráfica esquemática (sem escala) do Grupo Vazante (Dardenne, 2000; Aldis *et al.*, 2022).....10
- Figura 3.** Seção transversal da zona mineralizada do depósito de Fagundes (Cia. Mineira de metais, 1982; Monteiro, 2002).12
- Figura 4.** Testemunhos de rocha do furo de sondagem FAD3 do depósito Fagundes. Região A: brechas da zona mineralizada, compostas por *cemented crackle packbreccias* e *cemented rubble floatbreccias* com esfalerita, galena e pirita associadas a dolomita branca grossa. Região B: representa os dolomitos cristalinos de coloração cinza claro a escuro com dolomita..... 16
- Figura 5.** Perfil esquemático descritivo das rochas hospedeiras, feições de alteração e zona mineralizada do furo de sondagem FAD3 do depósito Fagundes, Paracatu-MG. O perfil foi dividido em 3 zonas: i) Filito milonítico, ii) Zona mineralizada, composta por *cemented crackle packbreccias* e *cemented rubble floatbreccia* com esfalerita, galena e pirita e..... 17
- Figura 6.** Filito milonítico e rochas hospedeiras dolomíticas do depósito Fagundes: A) Filito milonítico com bandas de coloração cinza escuro compostas por clorita, sericita e quartzo e bandas claras de quartzo, com estruturas de deformação dúctil, que sugerem..... 19
- Figura 7.** Fotomicrografias das rochas hospedeiras e fragmentos de dolomita primária do depósito Fagundes e filito milonítico: A) Filito milonítico com quartzo em ribbons e sigmóides de quartzo, além de possível associação de clorita, sericita e quartzo..... 20
- Figura 8.** Filito milonítico em análise por MEV: A. Fotomicrografia do filito milonítico com região demarcada em vermelho da área analisada em MEV (profundidade 198,18 a 198,41 m, em luz refletida com polarizadores descruzados, aumento de 2,5x) 21
- Figura 9.** Feições epigenéticas em rochas dolomíticas do depósito Fagundes: A) Preenchimento de cavidade por dolomita branca grossa em dolomito cristalino com dolomita fina de cor cinza, presença de estilólitos, calcedônia esférica.....25

Figura 10. Fotomicrografias em luz polarizada transmitida e refletida, com feições epigenéticas: A) <i>Cemented rubble floatbreccia</i> com dolomita fina tipo I anédrica à tipo II subédrica, com borda de preenchimento por calcedônia e pirita	26
Figura 11. Brechas e veios da zona mineralizada do depósito Fagundes: A) <i>Cemented rubble floatbreccia</i> , com fragmento de dolomita tipo I de cor cinza escuro, dolomita fina cinza claro e dolomita branca de preenchimento de espaços vazios.....	29
Figura 12. Fotomicrografias das brechas com mineralização de esfalerita, pirita e galena: A) <i>Cemented rubble floatbreccia</i> , com pirita fina subédrica à euédrica, esfalerita e dolomita fina tipo II associada a esfalerita.....	31
Figura 13. Amostra da zona mineralizada em análise por MEV: A. Fotomicrografia de feição de preenchimento; no centro da imagem, observa-se dolomita xenomórfica grossa associada a pirita subédrica, esfalerita.....	32
Figura 14. Amostra da zona mineralizada em análise por MEV: A. Fotomicrografia de feição de preenchimento, com dolomita subédrica, pirita anédrica e marcassita coloforme	33
Figura 15. Gráficos de barras dos teores de Zn, Pb, Ag, Cu, Fe, Mo, S, Mn e Mg para as amostras do furo de sondagem FAD3 do depósito Fagundes, Paracatu-MG.....	34
Figura 16. Relação temporal das associações diagenética e epigenética dos minerais do depósito Fagundes, considerando os estágios de pré, sin e pós-mineralização, em brechas e veios.....	37

Sumário

1. Introdução	7
2. Geologia Regional	8
2.1. <i>Grupo Vazante</i>	8
2.2. <i>Depósito de Zn-Pb de Fagundes</i>	11
3. Objetivos	12
4. Materiais e Métodos	13
4.1. <i>Materiais de estudo</i>	13
4.2. <i>Métodos</i>	13
4.2.1. <i>Revisão bibliográfica</i>	13
4.2.2. <i>Descrição macroscópica de testemunhos</i>	13
4.2.3. <i>Análise petrográfica</i>	14
4.2.4. <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	14
4.2.5. <i>Litogeoquímica</i>	14
5. Resultados	15
5.1. <i>Caracterização mesoscópica</i>	15
5.2. <i>Rochas hospedeiras</i>	17
5.3. <i>Feições epigenéticas</i>	22
5.3.1. <i>Cemented crackle packbreccia</i>	23
5.3.2. <i>Cemented rubble floatbreccia</i>	23
5.4. <i>Zona mineralizada</i>	27
5.5. <i>Dados geoquímicos</i>	33
6. Discussão	34
6.1. <i>Evolução temporal da zona mineralizada</i>	34
7. Conclusões	38
8. Referências	39

1. Introdução

Este trabalho propõe caracterizar a alteração hidrotermal e o minério do depósito de Zn-Pb Fagundes, localizado no Distrito Mineral de Vazante–Paracatu, no estado de Minas Gerais (**Figura 1**). Este distrito tem sido responsável por parte significativa da produção de zinco do país, concentrada nas minas de Vazante e Morro Agudo (encerrada em 2024), que apresentavam, respectivamente, recursos estimados em 30,59 Mt com 21% de Zn e 0,48% de Pb (Olivo *et al.*, 2018) e 20 Mt com 5% de Zn e 2% de Pb (Fernandes *et al.*, 2019a). No distrito de Vazante-Paracatu são reconhecidos depósitos de Zn-Pb com a mesma especialização metalogenética, porém com inúmeros atributos distintos em relação ao tamanho das reservas, à natureza do minério e aos tipos de alteração hidrotermal.

As características dos depósitos minerais são comumente usadas como guia para exploração. No entanto, sem a compreensão dos processos genéticos responsáveis pelos atributos de cada um dos depósitos, a definição dos aspectos chave relacionados com as maiores reservas e teores de uma determinada classe de depósitos, não podem ser identificados (Cox e Singer, 1992). Isso dificulta a definição de vetores para os corpos de minério ou resulta em insucesso das estratégias de exploração mineral.

A compreensão de processos responsáveis pela gênese de cada tipo específico de mineralização pode levar à elaboração de modelos metalogenéticos e de exploração abrangentes para os depósitos de Zn-Pb de Vazante-Paracatu, como identificado por Monteiro *et al.* (2006). Tais estudos apresentam importância no Distrito de Vazante–Paracatu, no qual depósitos hidrotermais de zinco não-sulfetados (willemita–hematita) e sulfetados (esfalerita–galena–pirita) são reconhecidos e hospedados por rochas dolomíticas do Grupo Vazante (Monteiro *et al.*, 1999, 2006, 2007; Olivo *et al.*, 2018). Esse projeto propõe a realização de estudos petrográficos e de microscopia eletrônica de varredura no depósito de Zn-Pb de Fagundes, hospedado em rochas dolomíticas da Formação Morro do Calcário do Grupo Vazante.

Em termos mundiais, importantes depósitos de Zn-Pb hospedados em rochas carbonáticas são classificados como tipo Mississippi Valley (MVT), que apresentam características como: são hospedados principalmente por rochas dolomíticas; são epigenéticos; os minerais dominantes são esfalerita, galena, pirita, mascassita, dolomita e calcita; a alteração consiste principalmente em dolomitização, dissolução da rocha hospedeira e brechação (Leach e Taylor, 2009).

A capacidade da indústria de mineração de suprir a demanda por metais básicos depende da descoberta de novos depósitos minerais e do aumento da produção em minas ativas (Edwards *et al.*, 1986). No entanto, a busca por novos depósitos de minério em todo o mundo requer uma crescente inovação tanto em tecnologia (Sánchez *et al.*, 2020) quanto em pensamento geológico (Graybeal, 2022) para melhorar os modelos de exploração, reduzir as emissões de CO₂, o consumo de energia e os gastos orçamentários. Neste sentido, o estudo de depósitos de zinco, tal como o depósito de Fagundes, justifica-se por ter grande relevância na contribuição da melhoria dos atuais modelos genéticos e vetores exploratórios.

2. Geologia Regional

A região de Vazante-Paracatu está localizada na parte leste da Faixa Brasília que se estende por mais de 1000 km com uma largura de 300 km ao longo da margem oeste do Cráton São Francisco (**Figura 1**). Este cinturão de dobramentos formou-se no fechamento de uma ampla bacia oceânica durante a Orogenia Brasileira Neoproterozoica (Pimentel *et al.*, 2001). Na Faixa Brasília, ocorrem sequências de rochas que foram empurradas para leste com deformação e metamorfismo crescentes para oeste, o que reflete a vergência da faixa em relação ao Cráton São Francisco (Dardenne, 2000).

2.1. Grupo Vazante

O Grupo Vazante é uma sucessão predominantemente carbonática dolomítica que é intercalada com rochas siliciclásticas e pelíticas. Ele se estende em um cinturão arqueado de direção N, com 250 km de comprimento e 25–30 km de largura (Dardenne, 2000). Este grupo apresenta baixo metamorfismo de fácies xisto verde e possui uma foliação generalizada (S₁), que está relacionada ao dobramento regional, sobreimpresas por foliações S₂ e S₃, relacionadas às dobras locais D₁ isoclinais e D₂ abertas, respectivamente (Monteiro, 1997). Dardenne (2000) estabeleceu a litoestratigrafia do Grupo Vazante, que da base ao topo está dividido em 7 formações: Santo Antônio do Bonito, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário (em que se hospeda o depósito Fagundes) e Lapa (**Figura 2**).

Rodrigues *et al.* (2012) propuseram que o Grupo Vazante teria sido depositado durante o Neoproterozoico. Já Martins-Neto (2009) e Valeriano *et al.* (2008) interpretaram a deposição de Vazante em um cenário de margem passiva no Paleocôntinente de São Francisco, durante o Mesoproterozoico. Porém, com novos

dados geoquímicos e geocronológicos das unidades siliciclásticas do Grupo Vazante, propôs-se que essas rochas foram derivadas de rochas continentais andesíticas à félsicas Paleoproterozoicas, cujo os sedimentos foram depositados entre 1.1 e 1.3 Ga em um ambiente de rifte (Fernandes *et al.*, 2019b).

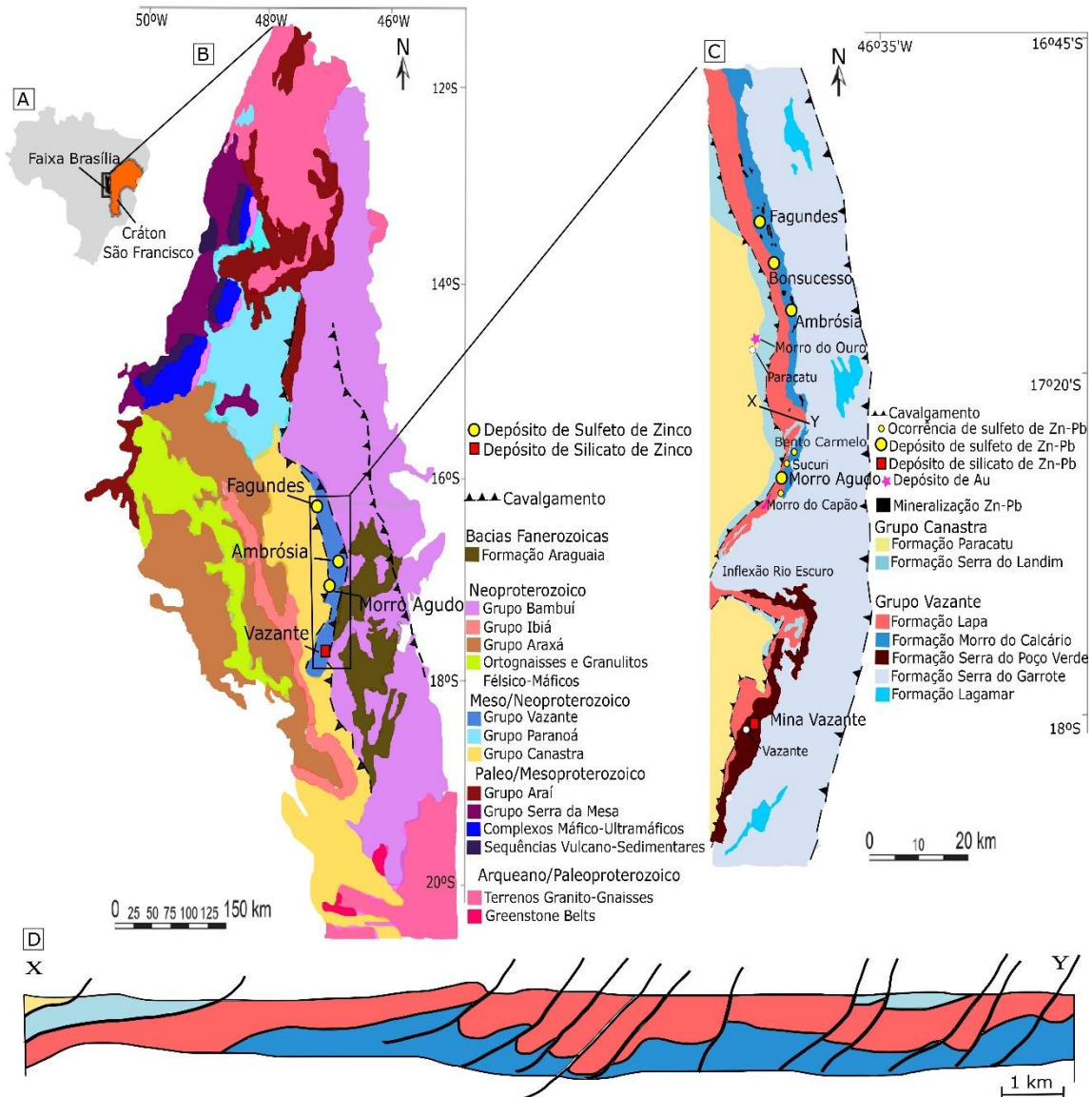


Figura 1. A) Localização da Faixa Brasília e do Cráton São Francisco (Aldis *et al.*, 2022). B) Geologia regional da faixa Brasília com a localização do Grupo Vazante e dos depósitos de Zn-Pb de Vazante, Morro Agudo, Fagundes e Ambrósia (Misi *et al.*, 2014). C) Geologia do distrito mineral Vazante-Paracatu (Monteiro *et al.*, 2006; Fernandes *et al.*, 2019a,b). D) Perfil Geológico da Faixa Vazante (Cia. Mineira de metais, 1982).

A Formação Morro do Calcário, é composta por dolarenitos oolíticos e peloidais (Monteiro *et al.*, 2007), biohermas estromatolíticas e fácies biostroma típicas de ambiente submaré raso (Dardenne, 2000). Finas camadas de filito e siltito estão

intercaladas com rochas dolomíticas (Dardenne, 2000). Os dolomitos apresentam vários graus de brechação. Rodrigues *et al.* (2012) obtiveram idades Sm-Nd T_{DM} de 2.11 a 2.18 Ga e zircão detrítico U-Pb com uma idade mais jovem de 1137 ± 8 Ma, consistente com uma fonte Paleoproterozoica de detritos e idade de deposição Mesoproterozoica. (Fernandes *et al.*, 2019b).

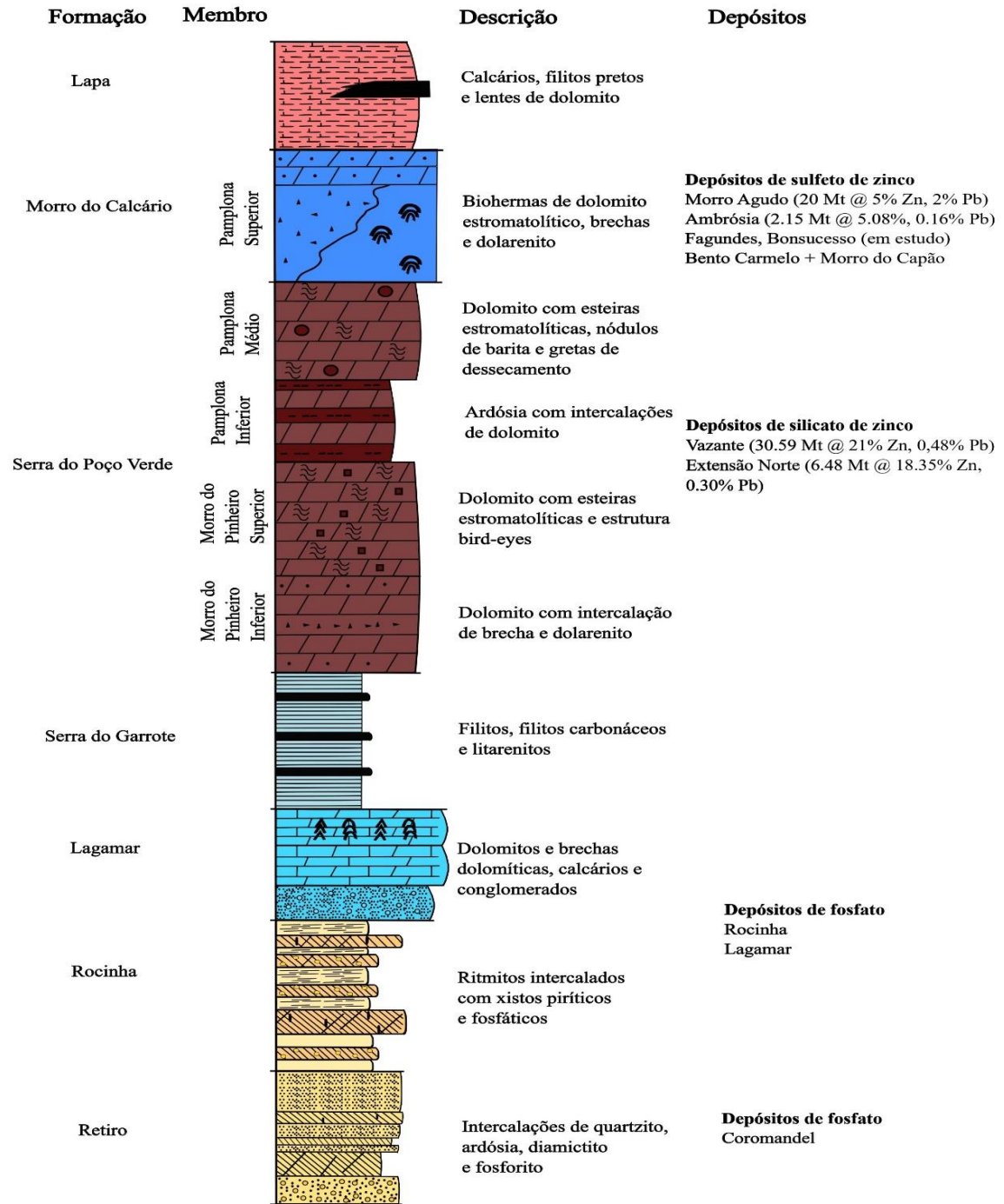


Figura 2. Coluna litoestratigráfica esquemática (sem escala) do Grupo Vazante (Dardenne, 2000; Aldis *et al.*, 2022).

2.2. Depósito de Zn-Pb de Fagundes

O depósito Fagundes (**Figura 3**), está hospedado no Membro Pamplona Superior, na Formação Morro do Calcário, no Grupo Vazante, que é coberto pelos Membros Serra do Velosinho e Serra da Lapa da Formação Lapa. As principais rochas hospedeiras são dolomitos com estruturas estromatolíticas (Monteiro, 2002). O Membro Serra do Velosinho é composto por folhelhos pretos gráficas rítmicos intercalados com camadas argiláceas-carbonáticas, que contém quartzo detrital e subcamadas ricas em microclínio. O Membro Serra da Lapa é constituído por metapelito intercalado com sericita-clorita filito e metasiltito. Próximo ao contato com o Membro Pamplona Superior estes litotipos apresentam evidências de milonitização, como forte estiramento mineral, textura de quartzo em *ribbons* e fraturas extensionais preenchidas com quartzo, sericita, flogopita, pirita e anquerita (Monteiro *et al.*, 2006).

Na área de Fagundes, o Membro Pamplona Superior é representado por um complexo estromatolítico, com fácies recifal posterior e anterior. As áreas do recife anterior são compostas por dolomito, dolorudito e dolarenito laminados com algas. A fácies recifal é composta por dolomita cinza laminada microbiana e estromatólito colunar, que apresentam laminação côncava e grãos dolomíticos cristalinos. A fácies de recife posterior inclui dolomito cinza recristalizado de granulação fina com esteiras planares a onduladas e camadas subordinadas de dolarenito e brecha (Monteiro *et al.*, 2006).

Fagundes é um depósito *stratabound*, caracterizado por forte silicificação, que antecede a mineralização. Os corpos de minério estão deslocados por falhas normais de direção geral N65E (Monteiro, 2002). Nas rochas hospedeiras das mineralizações é comum a presença de estilólitos com pirita, *chert* e argilominerais, relacionadas à diagênese de soterramento, que ocorrem em diferentes microfácies e com graus variáveis de recristalização. Silicificação, posterior à dolomitização, é comum nos dolomitos estromatolíticos e/ou fraturados. A alteração hidrotermal pré-mineralização é marcada por silicificação fissural e substituição por dolomita em sela e pirita. A silicificação fissural é representada pelo preenchimento por calcedônia e quartzo de fraturas e espaços abertos. A matriz das brechas é predominantemente dolomítica, no entanto, matriz calcítica esparítica e fibrosa ocorre em determinados locais. Vênulas carbonáticas, principalmente ankeríticas, cortam as brechas (Monteiro, 2002).

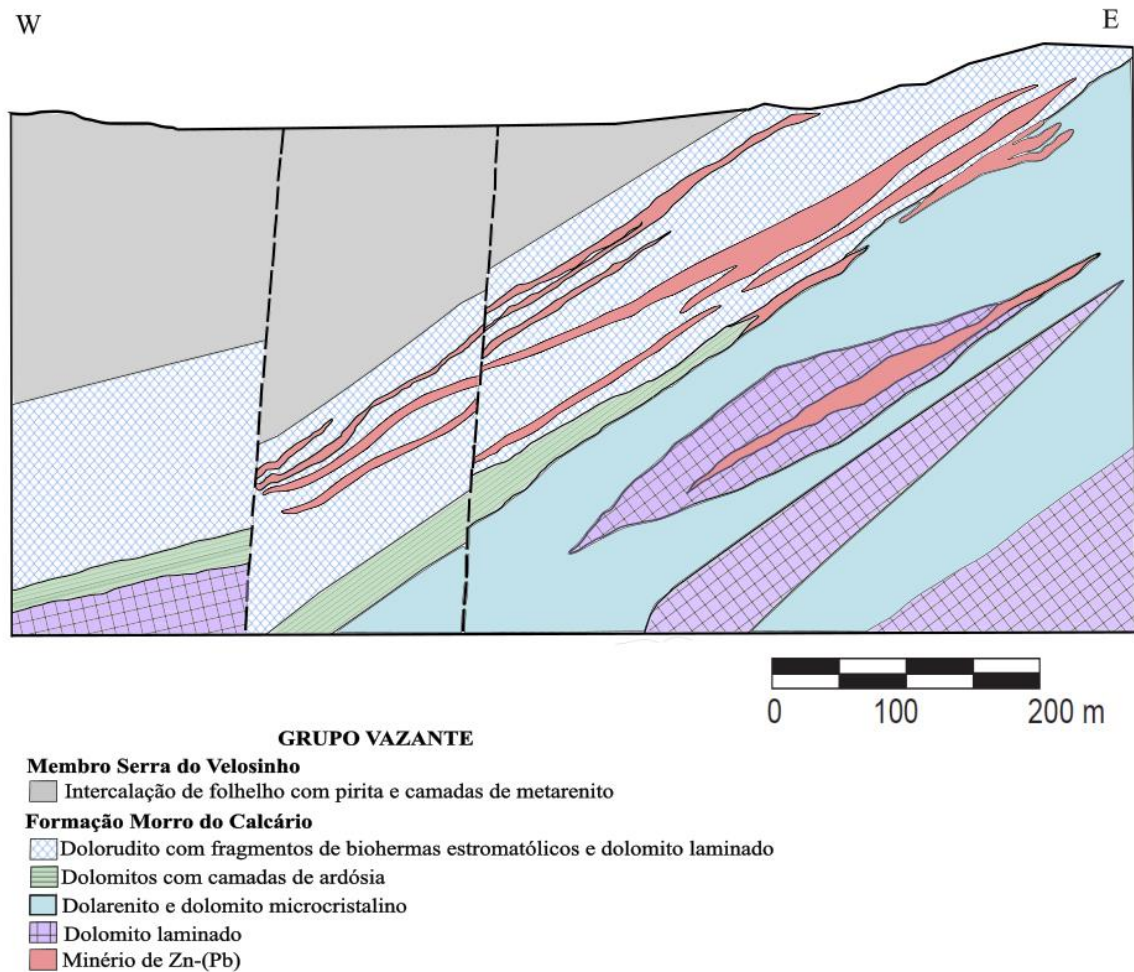


Figura 3. Seção transversal da zona mineralizada do depósito de Fagundes (Cia. Mineira de metais, 1982; Monteiro, 2002).

3. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi caracterizar os estilos de alteração hidrotermal e o minério de zinco buscando as possíveis relações com mecanismos responsáveis pela formação do depósito Fagundes. Entre os objetivos específicos, estão:

- a) Caracterizar as fácies de alteração hidrotermal, suas paragêneses e estilos de alteração hidrotermal;
- b) Discutir os possíveis processos de precipitação do minério de zinco e sua relação temporal.

4. Materiais e Métodos

4.1. Materiais de estudo

Para este estudo, foram utilizadas amostras de testemunho de 1 furo de sondagem do depósito de Fagundes, cedidos pela empresa Nexa Recursos Minerais S.A., situados nas adjacências a mina de Morro Agudo, no município de Paracatu-MG. A coleta das amostras foi conduzida pelos orientadores no período de 15 a 20 de maio de 2023.

4.2. Métodos

4.2.1. Revisão bibliográfica

A revisão esteve focada no aprofundamento da literatura referente ao depósito de Fagundes, bem como a pesquisa de novos materiais a partir da consulta e síntese das principais bases de dados eletrônicas (ex. SCIELO, ScienceDirect, Geoscience World) além de dissertações e teses. O foco da revisão foi: (i) geologia da área de estudo; (ii) a coletânea de textos relacionados aos processos hidrotermais em depósitos de chumbo e zinco hospedados em rochas sedimentares e (iii) a revisão dos métodos de estudo.

4.2.2. Descrição macroscópica de testemunhos

As amostras de testemunho de sondagem foram analisadas e descritas com relação à textura, estrutura, mineralogia, alteração hidrotermal, feições de dissolução, preenchimento e estabeleceu-se a relação temporal. Para isso, utilizou-se de lupa e ácido.

Um perfil foi esquematizado no programa livre *Inkscape* (**Figura 5**). Para tal descrição, optou-se por utilizar a classificação de brechas proposta por (Morrow, 1982), de natureza meramente descritiva. Morrow (1982) subdivide as brechas em 2 tipos principais, considerando-se o grau de proximidade mútua dos fragmentos: *Packbreccia*, quando os fragmentos estão amplamente em contato; e *Floatbreccia*, quando não estão em contato. As brechas podem ser do tipo *crackle* quando há pouco deslocamento relativo dos fragmentos, ou *mosaic*, quando os fragmentos estão, em grande parte, mas não totalmente, deslocados, e *rubble*, quando os fragmentos ocorrem em diversas direções diferentes. O espaço interfragmentado pode estar aberto e não preenchido ou estar preenchido por minerais cristalinos precipitados quimicamente e, portanto, cimentado, ou ainda, pode ser preenchido com grãos particulados. Neste estudo, prezou-se por reconhecer os princípios relativos ao

preenchimento (*infill*), alteração e sobreimpressão, para caracterizar as brechas relacionadas ao minério. Além disso, determinar a relação temporal dos eventos de formação do minério.

4.2.3. *Análise petrográfica*

Para a análise petrográfica, foram observadas e descritas aspectos de 28 lâminas ao microscópio petrográfico. A petrografia visou detalhar: (i) a caracterização dos estágios e estilos de alteração hidrotermal e rochas hospedeiras e (ii) definir a evolução temporal relativa associadas as texturas minerais nas feições epigenéticas.

A análise petrográfica foi realizada em microscópio petrográfico Leica DM2700P com luz polarizada transmitida, refletida e epifluorescência sob luz ultravioleta (fonte OSRAM HXP R 120 W/45 C UV, com uso de filtros D e N2.1). O método de descrição petrográfica utilizado neste estudo foi explanado em detalhe por Harwood (1988), visando a caracterização do arcabouço mineral, texturas (relações de corte, feições de substituição mineral), microestruturas (ex. vênulas, veios, estilólitos e estruturas primárias) e o sequenciamento temporal relativo de formação dos minerais. As fotomicrografias foram coletadas e tratadas utilizando o software Leica LAS X.

4.2.4. *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*

Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizando EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectrometry*) foram realizadas. O objetivo desta análise foi complementar a descrição petrográfica e a caracterização de minerais acessórios. O Phenom XL é equipado com detector de elétrons retroespalhados e sensor de espectrometria de raios-X (EDX - *Energy Dispersive X-Ray Spectrometer*). Foram obtidas imagens de elétrons retroespalhados e estimativas de abundância elementar pontual e mapas utilizando configuração de 10-15 kV. Utilizou-se o equipamento MEV Phenom XL da ThermoScientific. As análises de petrografia óptica e MEV ocorreram no laboratório GeoFluid do Instituto de Geociências da USP.

4.2.5. *Litogeoquímica*

Foram utilizados dados de litogeoquímica total cedidos pela Nexa Resources, para geração de gráficos de dispersão para os elementos Zn, Pb, Ag, Cu, Fe, Mo, S, Mn e Mg, com o objetivo de relacionar tendências geoquímicas e variações de hospedeiras e zonas de alteração hidrotermal e mineralização.

5. Resultados

5.1. Caracterização mesoscópica

A **Figura 4** apresenta uma foto representativa dos testemunhos de rocha do furo de sondagem FAD3 do depósito Fagundes em que podem ser visualizadas as principais rochas hospedeiras, feições de alteração hidrotermal e delimitação da zona mineralizada. Na **Figura 5**, é apresentado um perfil simplificado do furo FAD3, onde são indicados os locais em que foram confeccionadas as lâminas.

Para fins de simplificação, o perfil descrito está subdividido em 3 intervalos de profundidade, da base para o topo:

- (i) **Intervalo de 241,68 a 303,8 m:** intervalo composto por dolomitos cristalinos e *cemented rubble floatbreccias*. As rochas deste intervalo apresentam dolomita muito fina, de coloração cinza claro, que compõe os fragmentos de rocha hospedeira, além de dolomita grossa de cor branca que preenche veios e os espaços intersticiais dos seixos nas brechas. Em algumas ocasiões, foi possível diferenciar fragmentos de estromatólitos colunares conformando os seixos das *cemented rubble floatbreccias*.
- (ii) **Intervalo de 199,21 a 241,68 m:** intervalo mineralizado, predominantemente composto por *cemented rubble floatbreccias* e *cemented crackle packbreccias*, caracterizado pela presença abundante de esfalerita, galena e pirita associadas a dolomita grossa de cor branca, cementando os seixos. Os seixos de rocha hospedeira são compostos por principalmente por dolomitos cristalinos, de coloração cinza claro, e minoritariamente por fragmentos de estromatólitos. Os fragmentos de rocha hospedeira apresentam estilólitos.
- (iii) **Intervalo de 183,82 a 199,21 m:** alternância de lâminas de filito milonítico, de coloração cinza escuro, e lâminas quartzosas, de coloração branca, com estrutura crenulada e feições de cisalhamento (**Figura 6A**). Apresenta uma foliação milonítica, em alguns locais ocorrem pares S-C.

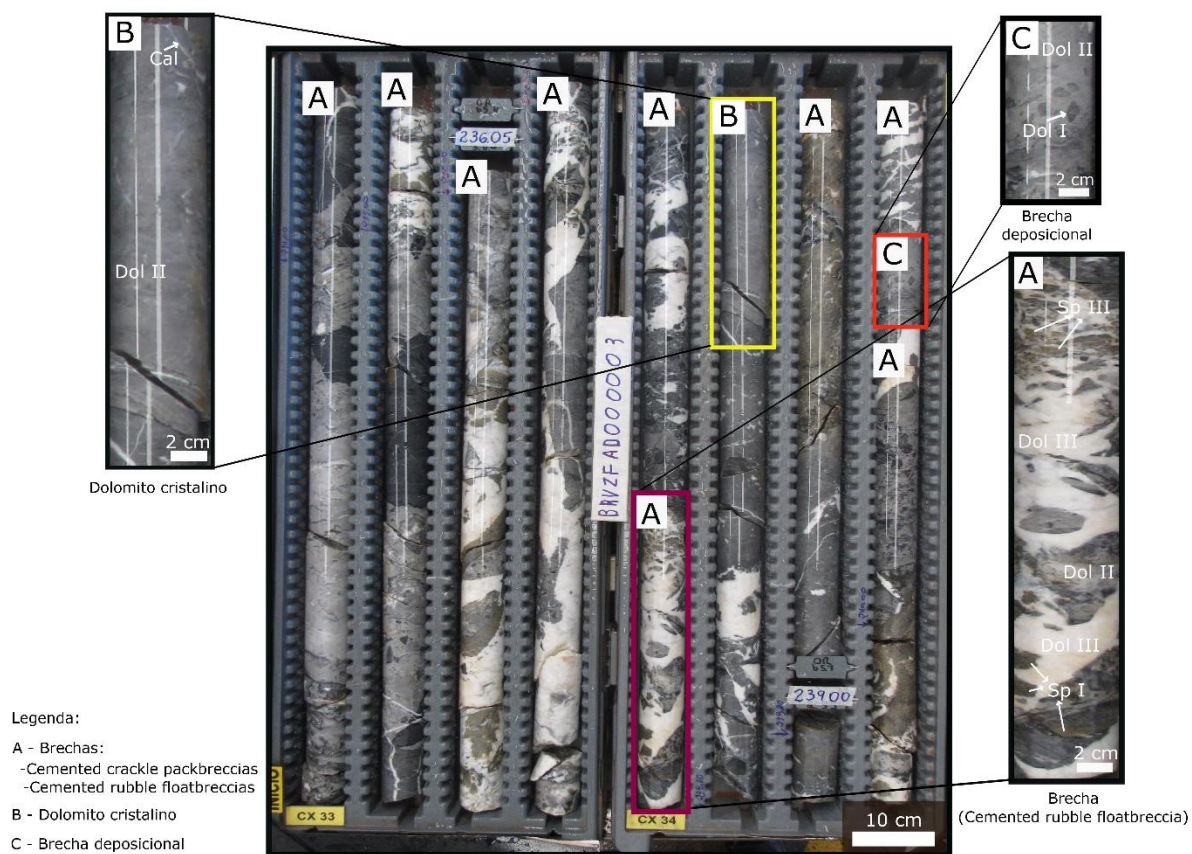


Figura 4. Testemunhos de rocha do furo de sondagem FAD3 do depósito Fagundes. Região A: brechas da zona mineralizada, compostas por *cemented crackle packbreccias* e *cemented rubble floatbreccias* com esfalerita, galena e pirita associadas a dolomita branca grossa. Região B: representa os dolomitos cristalinos de coloração cinza claro a escuro com dolomita fina. Região C: estromatólito planar com brecha sindeposicional no topo.

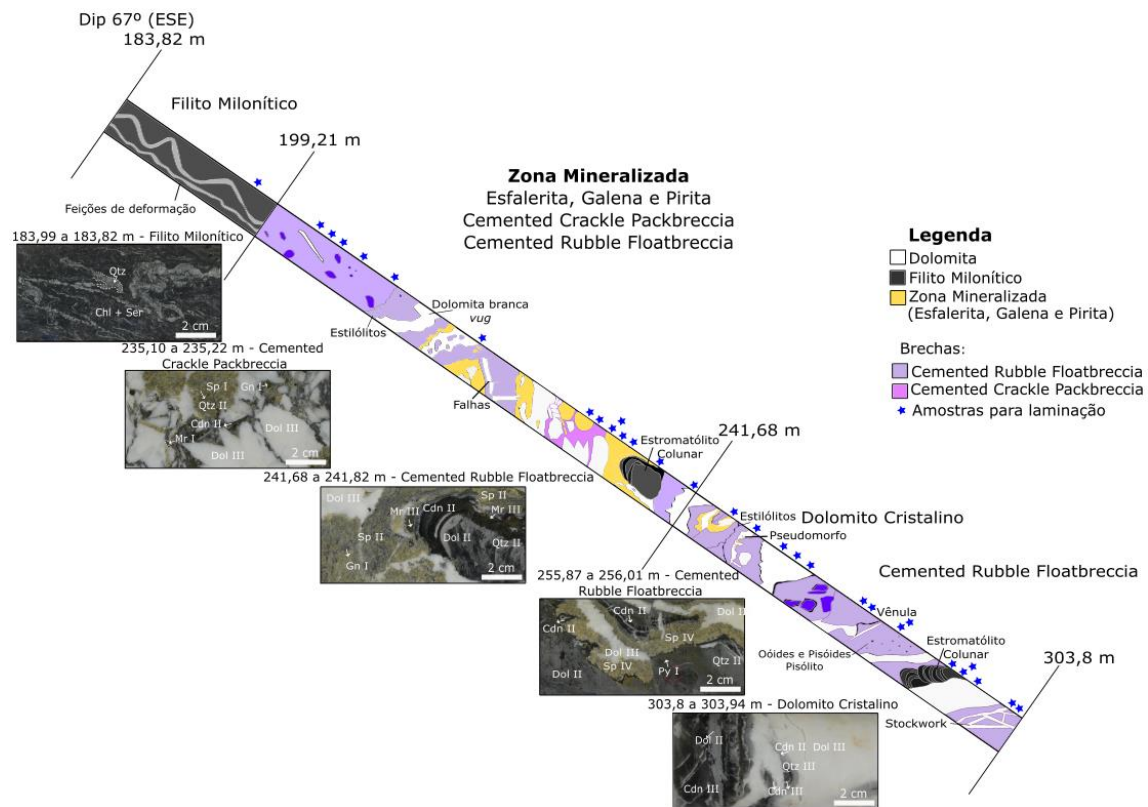


Figura 5. Perfil esquemático descritivo das rochas hospedeiras, feições de alteração e zona mineralizada do furo de sondagem FAD3 do depósito Fagundes, Paracatu-MG. O perfil foi dividido em 3 zonas: i) Filito milonítico, ii) Zona mineralizada, composta por cemented crackle packbreccias e cemented rubble floatbreccia com esfalerita, galena e piritita e iii) Dolomito cristalino, em que são observadas as porções mais profundas da sondagem, com rochas dolomíticas e boundstones estromatolíticos.

5.2. Rochas hospedeiras

As rochas hospedeiras do depósito Fagundes são representadas por dolomitos cristalinos, boundstones estromatolíticos laminares e colunares (*sensu* Embry e Klován, 1971), e ocasionalmente rudstones intraclásticos ou brechas sindeposicionais, da Formação Morro do Calcário. Essas rochas apresentam diferente grau de brechamento, dolomitização e silicificação (veja a seção **5.3 Feições epigenéticas**). Sobreposta à essas rochas, ocorre uma camada de filito milonítico (Figura 6A).

Macroscopicamente, os dolomitos cristalinos apresentam uma coloração que varia tons de cinza claro a escuro, homogênea, sem estrutura deposicional evidente,

denominada dolomita I (**Figura 6C**). Por vezes, é possível diferenciar grãos arredondados a subarredondados, de 1 a 4 mm de diâmetro, compostos por sílica.

Os estromatólitos caracterizam-se por apresentar uma laminação irregular, de geometria crenulada, na qual alternam lâminas com tonalidades variáveis de cinza claro a escuro (**Figuras 4 e 6B**). No furo de sondagem FAD3 foram reconhecidos estromatólitos planares (**Figura 4C**) e domais (**Figura 6B**). Enquanto no primeiro as lâminas se apresentam horizontais ou sub-horizontais ao longo do testemunho, no segundo as lâminas apresentam domos convexos e um forte encurtamento lateral. Isso gera corpos domais com limites bem definidos, justapostos, por vezes coalescentes, sem desenvolvimento de espaço intercolunar. É muito comum observar poros alongados no sentido da laminação (porosidade fenestral) associada à esta fácies.

No topo dos estromatólitos planares, é muito comum a presença de rudstones intraclásticos ou brechas sindeposicionais (**Figura 4C**), com contatos basais abruptos e irregulares. Estes possuem uma pobre seleção e são formados por intraclastos angulares a subangulares das litofácies circunjacentes. O material que preenche os seixos também é de composição dolomítica, com granulometria fina.

Ao microscópio, essas litofácies apresentam alto grau de recristalização, caracterizada por um mosaico uniforme de cristais de dolomita subédricas (**Figura 7E**). Os dolomitos de coloração cinza claro e escuro se apresentam em microescala como mosaicos cristalinos equigranulares, compostos essencialmente por dolomitas finas, xenomórficas, aqui denominadas como dolomita do tipo I (**Figuras 7C, 7D e 7I**). Este tipo de dolomita pode ocorrer associada ao quartzo microcristalino. Por sua vez, os dolomitos de coloração cinza claro apresentam um mosaico cristalino composto por cristais romboédricos de dolomita a subédricos, em mosaico hipidiotópico, de 30 a 50 μm de diâmetro, aqui denominadas como dolomita do tipo II (**Figuras 7E e 7F**), que pode ocorrer associada a quartzo microcristalino (**Figuras 7G e 7H**).

Sobreposto a esses dolomitos, ocorre uma camada de filito milonítico de coloração acinzentada escura (**Figura 6A**). A porção esbranquiçada com microdobras é composta essencialmente por quartzo, enquanto as porções escuras são compostas por sericita e clorita. Ocorrem feições de deformação dúctil que indicam estruturas como pares S-C, o que sugere cisalhamento, além de microfalhas com rejeito milimétrico.

Ao microscópio, o filito milonítico apresenta foliação milonítica, com cordões de minerais deformados e estirados gerando um padrão anastomosado, bem orientado, com porções escuras de uma associação de sericita, clorita e quartzo (**Figura 7A**), além de quartzo em sigmoides e em ribbons, além de quartzo fino anédrico, com cristais de 30 a 50 μm , com extinção ondulante (**Figura 7B**).

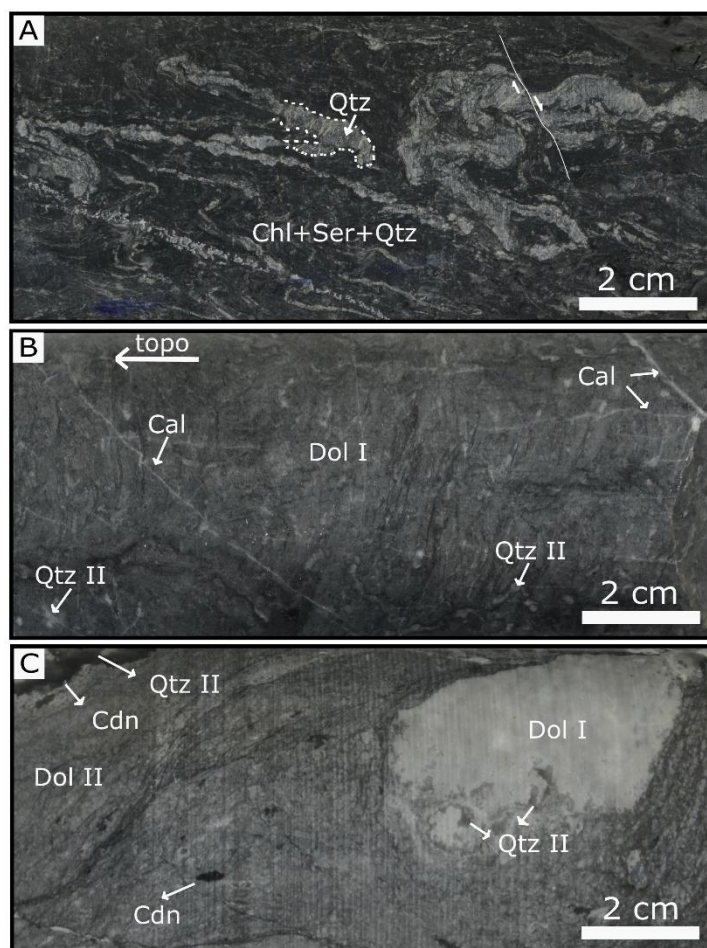


Figura 6. Filito milonítico e rochas hospedeiras dolomíticas do depósito Fagundes: A) Filito milonítico com bandas de coloração cinza escuro compostas por clorita, sericita e quartzo e bandas claras de quartzo, com estruturas de deformação dúctil, que sugerem cisalhamento, além de microfalha com 3 mm de rejeito (profundidade: 183,82 a 183,99 m). B) Boundstone estromatolítico com laminação rugosa, com alternância de bandas claras e escuras de carbonato em estromatólito, vênulas de calcita com cerca de 1 mm de espessura e quartzo fino. A seta na porção superior esquerda indica a direção do topo do estromatólito (profundidade: 294,58 a 294,72 m). C) Dolomito cristalino com dolomita fina tipo II com seixo de dolomita fina tipo I com evidência de dissolução e preenchimento na borda, além de calcedônia e quartzo (profundidade: 285,90 a 286,05 m). Abreviações: Cal – Calcita, Chl – Clorita, Cdn – Calcedônia, Dol – Dolomita, Qtz – Quartzo, Ser – Sericita.

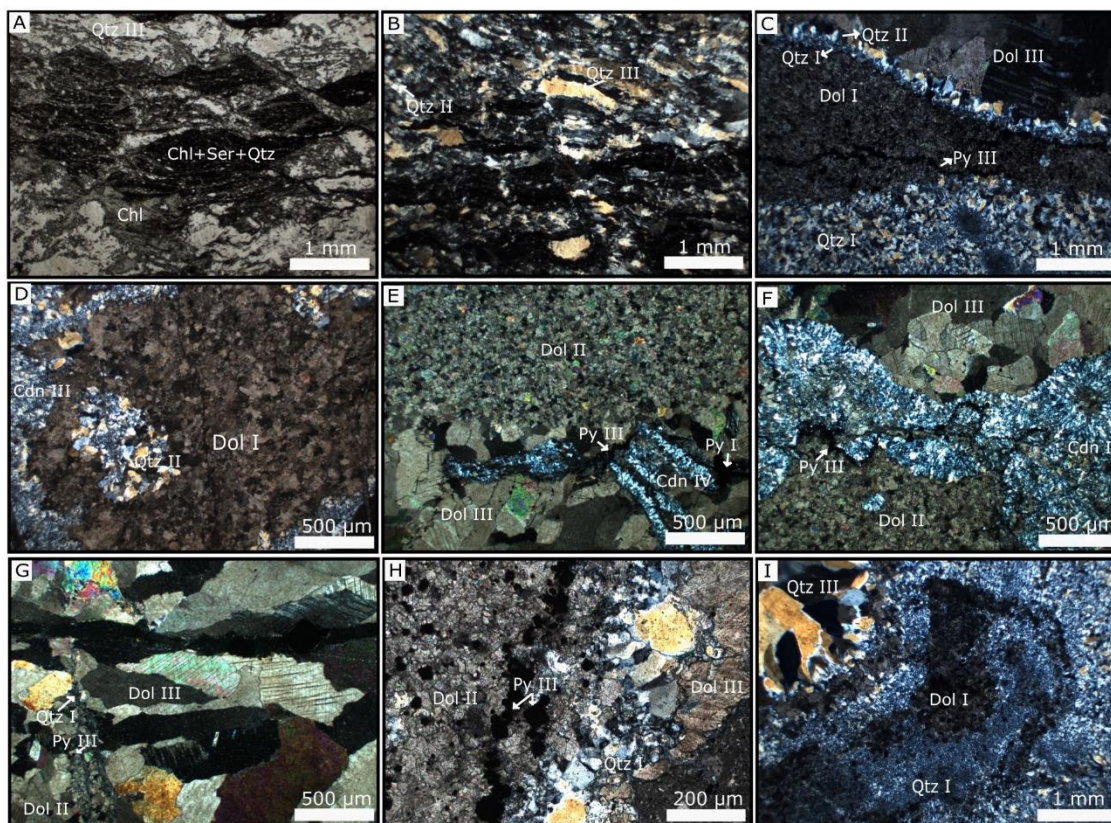


Figura 7. Fotomicrografias das rochas hospedeiras e fragmentos de dolomita primária do depósito Fagundes e filito milonítico: A) Filito milonítico com quartzo em ribbons e sigmóides de quartzo, além de possível associação de clorita, sericita e quartzo (profundidade: 198,18 a 198,41 m, PP, aumento de 2,5x). B) Filito milonítico com quartzo em ribbons, além de quartzo fino anédrico a subédrico (profundidade: 198,18 a 198,41 m, PX, aumento de 2,5x). C) Dolomito cristalino com dolomita fina tipo I e dolomita grossa xenomórficas, com borda de quartzo microcristalino (profundidade: 302,12 a 302,46 m, PX, aumento de 2,5x). D) Fragmento de dolomita primária em cemented rubble floatbreccia, com borda arredondada de calcedônia, com quartzo fino incluso (profundidade: 207,68 a 207,84 m, PX, aumento de 2,5x). E) Dolomito cristalino com dolomita subédrica fina tipo II associada a dolomita grossa xenomórfica com calcedônia e pirita fina euédrica, além de pirita anédrica (profundidade: 291,50 a 291,88 m, PX, aumento de 2,5x). F) Dolomito cristalino com dolomita fina subédrica tipo II associada a dolomita grossa xenomórfica com borda de calcedônia coloforme e pirita fina euédrica (profundidade: 291,50 a 291,88 m, PX, aumento de 2,5x). G) Cristais de dolomita grossa xenomórfica alongados em dolomito cristalino, associada a quartzo microcristalino, pirita fina euédrica e dolomita fina subédrica (profundidade: 291,50 a 291,88 m, PX, aumento de 2,5x). H) Dolomito cristalino com dolomita fina subédrica, pirita fina euédrica, quartzo microcristalino e dolomita grossa xenomórfica

(profundidade: 302,12 a 302,46 m, PX, aumento de 10x). I) Dolomito cristalino com associação de quartzo microcristalino e quartzo grosso drusiforme posterior com resquícios de dolomita primária fina xenomórfica (profundidade: 302,12 a 302,46 m, PX, aumento de 2,5x). Abreviações: Chl – Clorita Cdn – Calcedônia, Dol – Dolomita, Py – Pirita, Qtz – Quartzo, Ser – Sericita, Sp – Esfalerita, PP - luz polarizada transmitida com polarizadores em paralelo; PX - luz polarizada transmitida com polarizadores cruzados.

Realizou-se a obtenção de dados de microscopia eletrônica de varredura na amostra do filito milonítico, de profundidade 198,18 a 198,41 m, com o objetivo de aferir a presença de matéria carbonosa associada ao arcabouço mineral e verificar a existência de minerais acessórios. As análises de MEV aferiram a presença de quartzo, além de minerais acessórios como grafita, titanita e zircão, identificados pelos espectros gerados (**Figura 8**). Não foi identificada matéria orgânica na amostra. Alguns dos picos de carbono foram relacionados ao carvão de silício (SiC), abrasivo utilizado na confecção de lâminas.

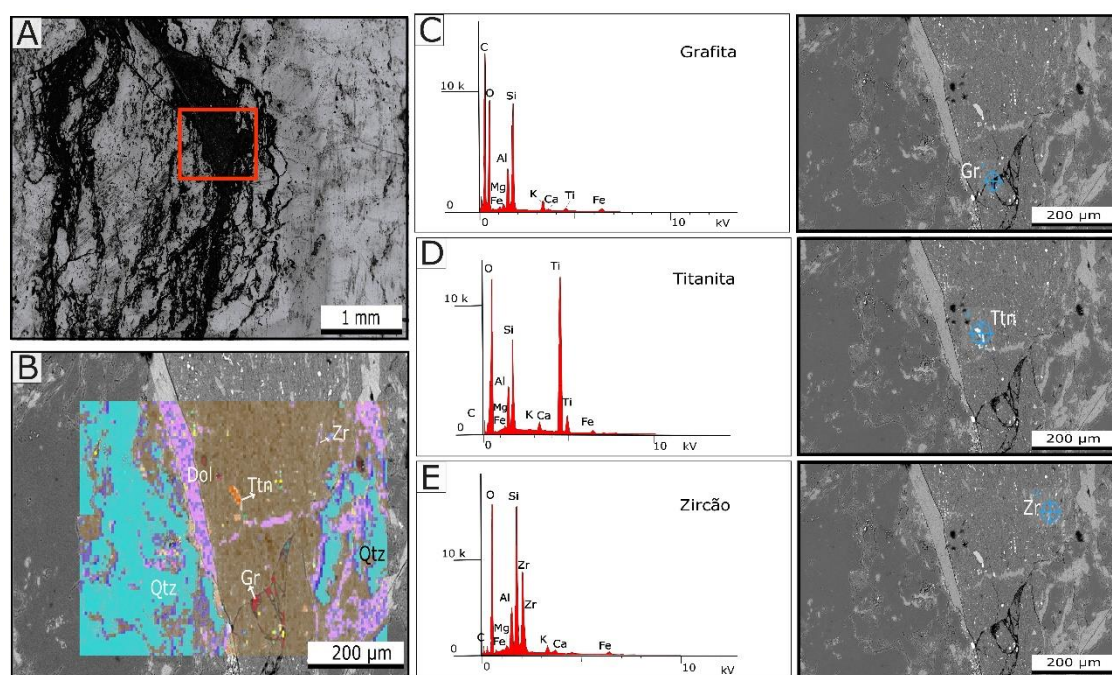


Figura 8. Filito milonítico em análise por MEV: A. Fotomicrografia do filito milonítico com região demarcada em vermelho da área analisada em MEV (profundidade 198,18 a 198,41 m, em luz refletida com polarizadores descruzados, aumento de 2,5x). B. Mapa de composição elemental obtido por análise de EDX, com os seguintes minerais identificados: Dol – dolomita em roxo, Gr – grafita em vermelho, Qtz – quartzo em azul e Ttn – titanita em laranja e Zr – zircão em violeta. C. Espectro da grafita obtido em

análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados. D. Espectro da titanita obtido em análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados. E. Espectro do zircão obtido em análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados.

5.3 Feições epigenéticas

As características epigenéticas incluem brechamento, dissolução, preenchimento de espaços abertos com dolomita e sílica, fraturamento e preenchimento de veios, dolomitização e silicificação. Foram observados dois tipos de brechas: *cemented crackle packbreccias* e *cemented rubble floatbreccias*.

O preenchimento de espaços abertos pode ocorrer por uma geração posterior de dolomita, aqui denominada por dolomita de tipo III, com coloração branca, de granulação grossa e pode apresentar bordas arredondadas, que podem evidenciar dissolução e estar associada a calcedônia (**Figura 9A**). Em alguns locais, a dolomita tipo II pode ter sido parcialmente substituída por quartzo (**Figura 9B**). Algumas rochas apresentam seixos com bordas angulares que estão preenchidas por calcedônia e quartzo (**Figura 9C**). Essas rochas também apresentam estilólitos ramificados de coloração preta (**Figura 9D**). Camadas concêntricas de calcedônia ocorrem no preenchimento de fraturas que foram substituídas na borda por quartzo (**Figura 9F**).

Por vezes, é possível observar preenchimento por calcedônia e quartzo em fraturas e espaços abertos e substituição de dolomita por quartzo e calcedônia (**Figura 9G**). Vênulas de calcita posteriores, de coloração branca com menos de 1 mm de espessura, cortam os dolomitos (**Figura 9H**).

Ocorrem veios preenchidos por dolomita branca com borda de calcedônia e quartzo, como na amostra de boundstone estromatolítico, em que há um veio de 2 cm de espessura (**Figura 9I**). A borda deste veio está substituída por quartzo. Por vezes, porções que estão silicificadas estão presentes na borda da dolomita de tipo III, em que observa-se quartzo e calcedônia que foram cortados por vênulas de calcita tardias (**Figura 9J**).

Ao microscópio, a dolomita de tipo III, xenomórfica, com contatos serrados, em mosaico xenotópico, ocorre em preenchimento de cavidades e apresenta bordas de dissolução, podendo ocorrer associada a dolomita II subédrica, pirita euédrica em cubos, quartzo microcristalino e calcedônia (**Figura 10A**). Os dolomitos ocorrem parcialmente silicificados e algumas porções ocorrem com quartzo microcristalino

associado a quartzo grosso (**Figura 10C**). Por vezes, observa-se pirita coloforme e calcedônia associadas a dolomita de tipo II (**Figura 10C**). A pirita euédrica, em cristais de 20 a 40 μm , em formatos de cubos, pode ocorrer ao longo de estilólitos. Também foram observadas calcedônias esféricas com extinção radial, que ocorrem em meio a dolomitas de tipo II e ambas foram cortadas por um veio de dolomita de tipo III (**Figura 10I**).

5.3.1. *Cemented crackle packbreccia*

Com relação ao grau de proximidade mútua dos fragmentos, neste tipo de brecha, eles ocorrem amplamente em contato e o termo *packbreccia* pode ser utilizado. Em termos da relação espacial dos fragmentos entre si, considerando o grau de orientação mútua, há pouco deslocamento relativo dos fragmentos em sua estrutura, o que permite classificá-las como *crackle breccias*. O cimento é composto por dolomita de coloração cinza claro com cristais de menos de 0.1 mm, sem estrutura evidente, e a brecha apresenta fragmentos angulosos que são compostos por dolomita de cor cinza escuro que ocorrem em meio ao cimento. Em alguns casos, a dolomita II foi parcialmente substituída por quartzo. Nessas rochas, é visível a superimposição de fraturamento e preenchimento no intervalo, que pode ocorrer por dolomita de tipo III, de fase posterior, com cristais de 1 a 3 mm, de coloração branca, além de pirita fina maciça e calcedônia, na borda de fragmentos (**Figura 9E**). Assim como no dolomito cristalino, também ocorrem estilólitos ramificados de coloração preta e vênulas de calcita de cor branca nestas brechas, com menos de 1 mm de espessura.

Ao microscópio, foi observada uma geração de marcassita coloforme associada a esfalerita e pirita e dolomita de tipo II, com veio de quartzo (**Figura 10B**). Neste tipo de brecha também ocorre dolomita em sela de granulação grossa com faces de cristal curvas que ocorrem como preenchimento de cavidade associada a esfalerita e quartzo microcristalino (**Figura 10E**).

5.3.2. *Cemented rubble floatbreccia*

Com relação ao grau de orientação mútua, observa-se que os fragmentos apresentam várias orientações e o termo *rubble* pode ser utilizado. Da mesma forma, com relação ao grau de proximidade mútua dos fragmentos, eles não ocorrem em contato, os fragmentos ocorrem inclusos no cimento dolomítico sem tocar em outros fragmentos, o que permite classificá-las como *floatbreccias*. Este tipo de brecha

apresenta dolomita fina de tipo I em fragmentos coloração cinza escuro, com cimento de dolomita fina de coloração cinza claro com cristais de menos de 0.1 mm, sem estrutura evidente. Ocorrem cavidades preenchidas por dolomita branca grossa posterior, com borda de calcedônia e quartzo (**Figura 9B**). Os fragmentos que ocorrem nestas brechas estão dispersos, com várias orientações. Foram observadas feições de dissolução na borda de fragmentos, que está preenchida por calcedônia (**Figura 9C**). Estilólitos ramificados e vênulas de menos de 1 mm de espessura também estão presentes nestas brechas. Algumas amostras ocorrem com esfalerita, galena e pirita, em menor quantidade comparada à zona mineralizada.

Ao microscópio, foi observado preenchimento de espaços abertos por quartzo microcristalino e quartzo que varia de granulação média a grossa. Observa-se dolomita tipo I que ocorre com borda de pirita fina euédrica e dolomita tipo II com borda de pirita fina euédrica e calcedônia coloforme (**Figuras 10A e 10C**). Calcedônia com padrões de extinção radial paralelas em preenchimento de fraturas que parecem ter sido afetadas por dissolução, associada a dolomita tipo I e quartzo microcristalino foram observadas (**Figura 10D**). Por vezes, o quartzo microcristalino pode estar associado a uma geração de calcedônia com extinção radial paralelas formando esferulitos (**Figura 10F**). Essas brechas podem ser afetadas por microfraturamento que pode estar preenchido por dolomitas não planares, em mosaico xenotópico, com contatos serrados, que pode estar associado a quartzo microcristalino. Além disso, fraturas ocorrem preenchidas por dolomita de tipo II (**Figura 10G**). Uma geração de piritas euédricas, em formatos de cubos, ocorre associada ao quartzo (**Figura 10H**).

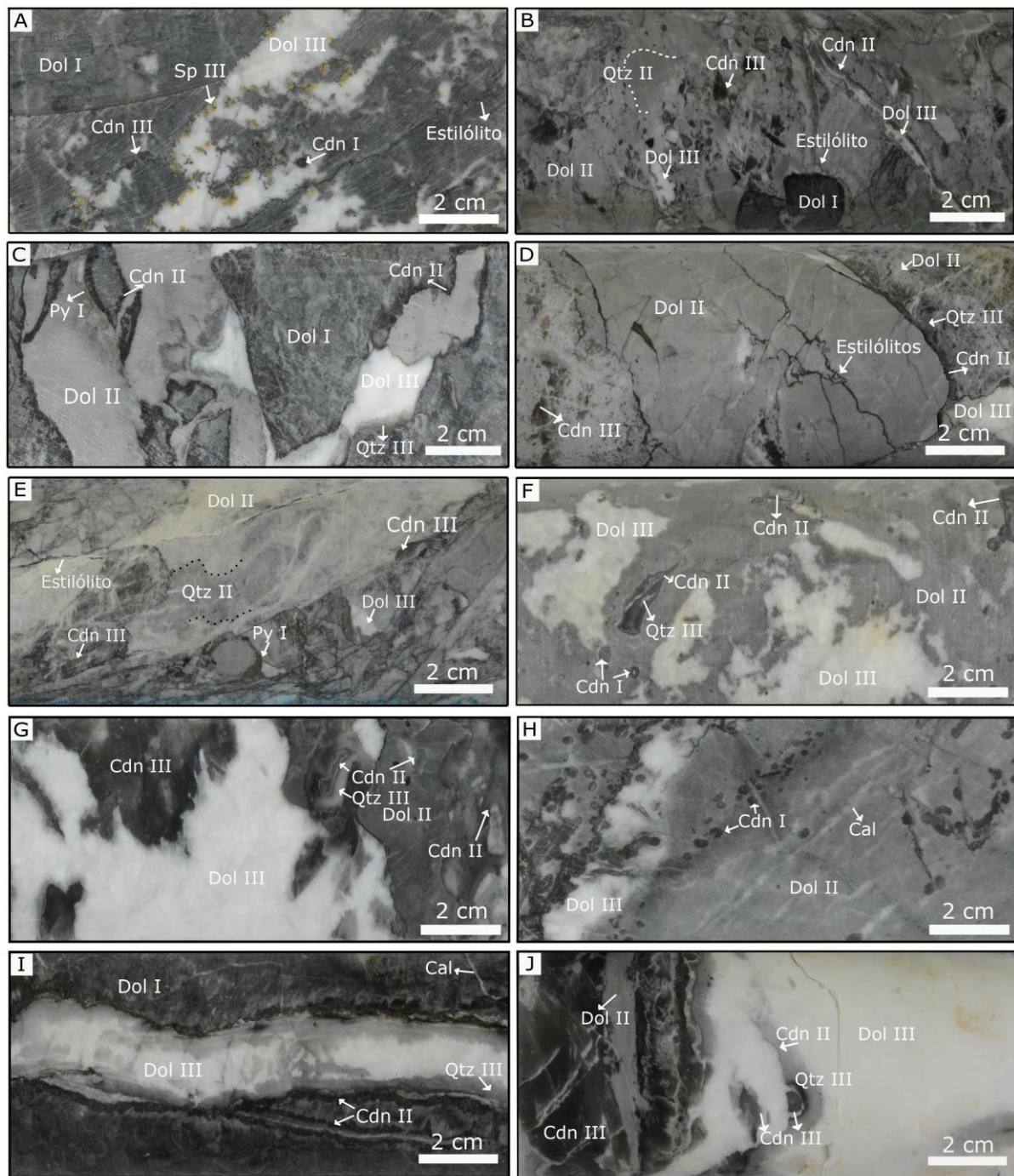


Figura 9. Feições epigenéticas em rochas dolomíticas do depósito Fagundes: A) Preenchimento de cavidade por dolomita branca grossa em dolomito cristalino com dolomita fina de cor cinza, presença de estilólitos, calcedônia esférica e esfalerita granular associada a dolomita branca (profundidade: 258,79 a 258,93 m). B) *Cemented rubble floatbreccia* com dolomita fina cinza, com algumas cavidades e veio de 2 mm de espessura preenchidos por dolomita branca, com fragmentos milimétricos de rocha hospedeira de cor cinza escuro, com calcedônia maciça, coloforme e quartzo (profundidade: 207,65 a 207,84 m). C) *Cemented rubble floatbreccia* com fragmentos de rocha hospedeira de cor cinza escuro, preenchimento por dolomita cinza e branca, presença de pirita maciça e calcedônia coloforme na borda dos fragmentos (profundidade: 283,48 a 283,65 m). D) Dolomito

cristalino com dolomita fina de cor cinza claro, calcedônia maciça e coloforme, dolomita branca e quartzo grosso, com presença de estilólitos (profundidade: 278,83 a 278,96 m). E) *Cemented crackle packbreccia* com microbrecha em seu interior, ocorre dolomita cinza fina e branca grossa, calcedônia e pirita maciça, além de quartzo e estilólitos (profundidade: 206,24 a 206,36). F) Dolomito cristalino com dolomita fina de cor cinza, preenchimento de cavidades por dolomita branca grossa, calcedônia coloforme e esférica (profundidade: 288,05 a 288,20 m). G) Dolomito cristalino com dolomita grossa branca e borda de calcedônia coloforme e quartzo grosso (profundidade: 302,12 a 302,46 m). H) Dolomito cristalino com dolomita fina cinza, calcedônias esféricas, cavidades preenchidas por dolomita branca e vênulas de calcita de 1 a 2 mm de espessura (profundidade: 291,50 a 291,88 m). I) Boundstone com estromatólito, com laminação rugosa, composto por dolomita fina de cor cinza escuro e presença de veio de dolomita branca grossa com borda de quartzo grosso e calcedônia coloforme, com vênulas de calcita de cerca de 1 mm de espessura (profundidade: 293 a 293,26 m). J) Dolomito cristalino composto por dolomita branca grossa, além de dolomita fina de cor cinza claro e calcedônia maciça e coloforme e quartzo grosso (profundidade: 303,80 a 303,94 m).

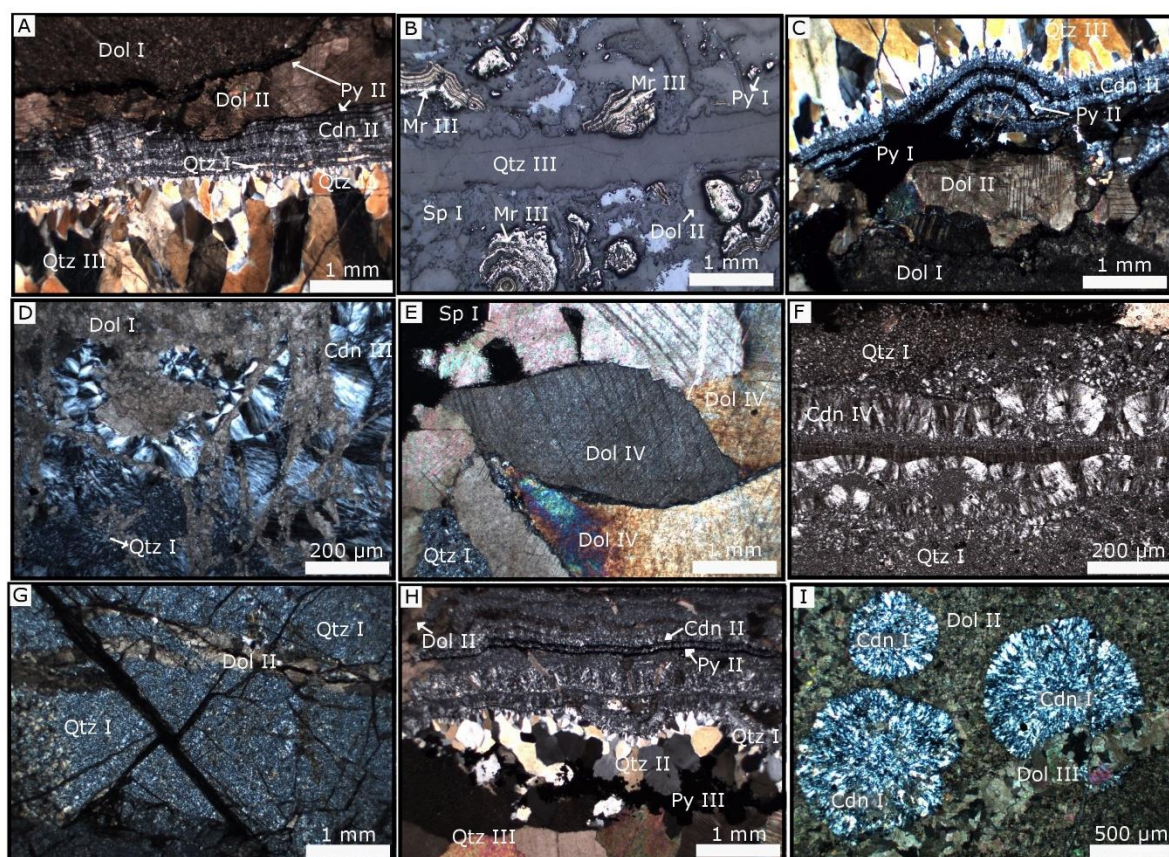


Figura 10. Fotomicrografias em luz polarizada transmitida e refletida, com feições epigenéticas: A) *Cemented rubble floatbreccia* com dolomita fina tipo I anédrica à tipo II subédrica, com borda de preenchimento por calcedônia e pirita coloformes e quartzo fino

até grosso (profundidade: 221,49 a 221,63 m, PX, aumento de 2,5x). B) *Cemented crackle packbreccia* com marcassita coloforme preenchendo cavidades, veio de quartzo grosso, além de dolomita e esfalerita (profundidade: 235,10 a 235,22 m, RR, aumento de 2,5x). C) *Cemented rubble floatbreccia*, com dolomita fina tipo I anédrica à tipo II subédrica, com preenchimento na borda por pirita maciça e calcedônia e pirita coloformes, além de quartzo grosso na porção superior (profundidade: 221,49 a 221,63 m, PX, aumento de 2,5x). D) *Cemented rubble floatbreccia*, com calcedônia maciça preenchendo cavidades, dolomita fina tipo I anédrica e quartzo microcristalino (profundidade: 230,50 a 230,73 m, PX, aumento de 10x). E) *Cemented crackle packbreccia*, com dolomitas em sela grossas, além de esfalerita maciça (profundidade: 235,10 a 235,22 m, PX, aumento de 2,5x). F) *Cemented rubble floatbreccia*, com preenchimento de quartzo microcristalino em borda de calcedônia com camadas dispostas paralelamente formando esferulitos (profundidade: 241,68 a 241,82 m, PX, aumento de 10x). G) Microfraturamento em *cemented rubble floatbreccia*, com quartzo microcristalino e veio de dolomita tipo II subédrica (profundidade: 230,50 a 230,73 m, PX, aumento de 2,5x). H) Borda de preenchimento por calcedônia e pirita coloformes em *cemented rubble floatbreccia*, com associação de quartzo fino à grosso e pirita III euédrica, em cubos (profundidade: 237,24 a 237,32 m, PX, aumento de 2,5x). I) Dolomito cristalino com dolomita fina tipo II subédrica e calcedônias esféricas, além de veio de dolomitas grossa tipo III, que corta a calcedônia esférica (profundidade: 291,50 a 291,88 m, PX, aumento de 2,5x). Abreviações: Mr – Marcassita, PP - luz polarizada transmitida com polarizadores em paralelo; PX - luz polarizada transmitida com polarizadores cruzados; RR - luz polarizada refletida com polarizadores em paralelo; RX - luz polarizada transmitida com polarizadores cruzados.

5.4. Zona mineralizada

O intervalo de ocorrência da zona mineralizada se estende de 199,21 m de profundidade até cerca de 242 m, nas amostras do furo de sondagem FAD3 (**Figura 5**). Nesta zona, as rochas apresentam abundante quantidade de esfalerita maciça ou em textura coloforme, em tons amarelados, e, em menor quantidade, galena, de cor cinza chumbo, e pirita, de cor amarelo-dourado. Esfalerita, galena e pirita ocorrem associados a dolomita de tipo III de granulação grossa e de cor branca em preenchimento de espaços abertos e em veios, também associados a dolomita de tipo III, na rocha hospedeira composta por dolomita de coloração acinzentada de tipo I e II. Estilólitos de cor preta ocorrem com menos de 1 mm de espessura e apresentam-se ramificados ao longo da zona mineralizada.

O minério nesta zona é hospedado principalmente por *cemented crackle packbreccias* e *cemented rubble floatbreccias*. A zona mineralizada apresenta 2 formas principais de ocorrência de minério:

- a) Mineralização associada ao brechamento: a esfalerita, pirita coloforme depositada ritmicamente e marcassita ocorrem associadas a dolomita branca de granulação grossa (**Figuras 11A e 11H**). Na borda da esfalerita associada a marcassita pode ocorrer substituição por calcedônia (**Figuras 11B e 11G**). O minério de esfalerita maciça pode ocorrer na borda da dolomita branca, associada a marcassita coloforme além de galena. Esta última, apresenta texturas predominantemente de preenchimento ou substituição, e, esfalerita pode estar associada, ou ser substituída, por galena (**Figura 11E**). O minério também pode estar em porções granulares incluso em dolomita branca (**Figura 11F**). A pirita ocorre disseminada ou preenchendo espaços abertos e estilólitos (**Figura 11H**). Marcassita e pirita coloformes ocorrem substituindo a dolomita na superfície de estromatólito colunar (**Figura 11I**).
- b) Mineralização associada aos veios: veios e concentrações irregulares de pirita e esfalerita cortam, localmente, bolsões de dolomita (**Figuras 11C e 11D**). Localmente, ocorrem fraturas e veios preenchidos por dolomita branca que cortam o minério, como ocorre um veio de dolomita branca fraturado associado a esfalerita e pirita coloformes, com borda de calcedônia e quartzo (**Figura 11J**).

Sob luz transmitida, a esfalerita exibe cor marrom-clara, enquanto as bordas, em geral, têm cor marrom escura (**Figura 12A**). A galena mostra texturas predominantemente de preenchimento ou substituição por esfalerita (**Figura 12B**). As texturas de sulfeto indicam principalmente deposição da esfalerita e pirita em espaços abertos dentro das rochas hospedeiras, possivelmente relacionadas ao fraturamento e dissolução (**Figura 12C**). Por vezes, a esfalerita ocorre associada a dolomita de tipo III e pirita anédrica (**Figuras 12E, 12F e 12G**).

A pirita pode ocorrer como cristais euédricos que podem estar associados a dolomita subédrica (**Figura 12D**). Pode ocorrer em concentrações irregulares associada a dolomita tipo III e esfalerita com bordas corroídas, evidenciando dissolução parcial (**Figuras 12H e 12I**).

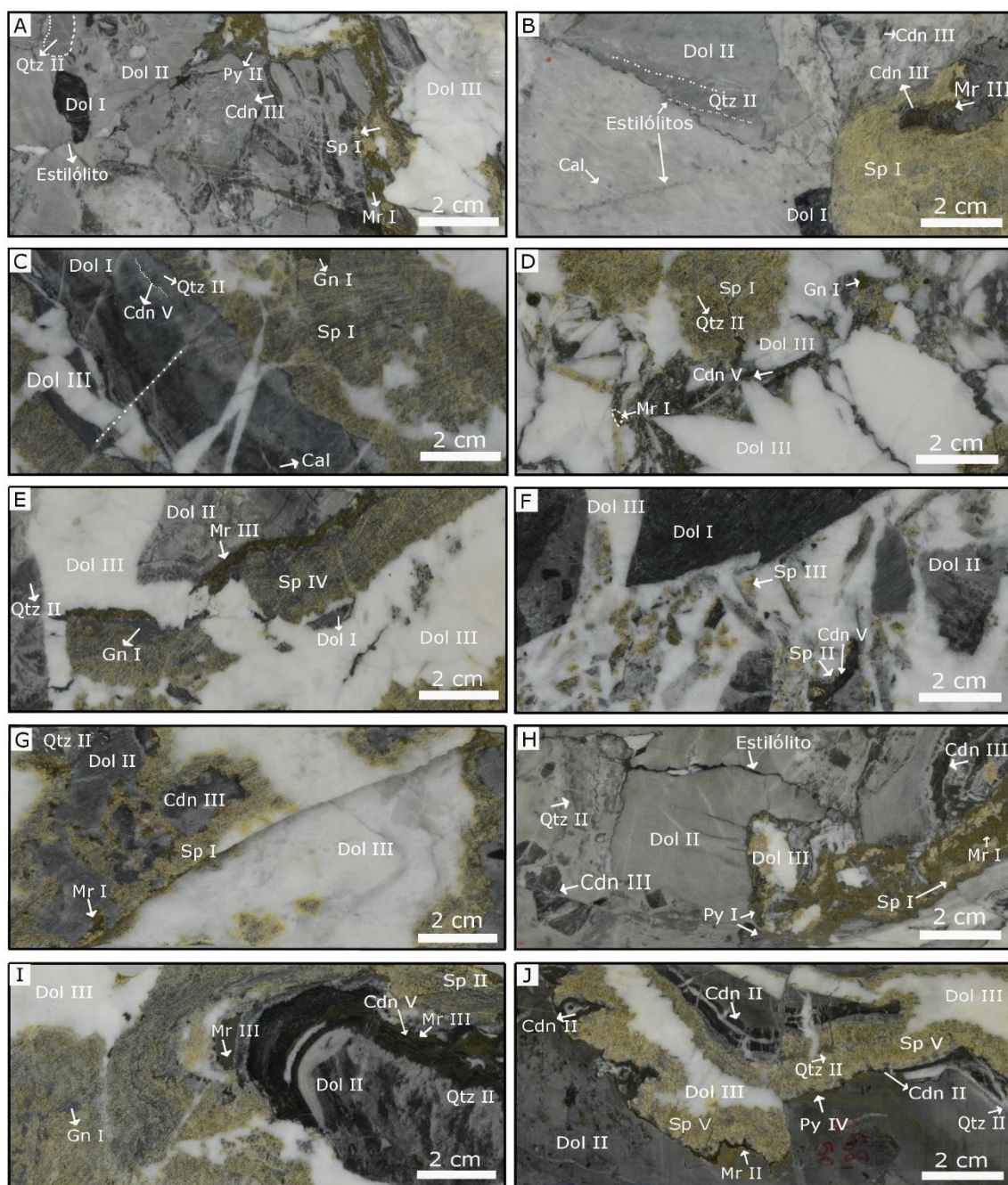


Figura 11. Brechas e veios da zona mineralizada do depósito Fagundes: A) *Cemented rubble floatbreccia*, com fragmento de dolomita tipo I de cor cinza escuro, dolomita fina cinza claro e dolomita branca de preenchimento de espaços vazios, com borda de esfalerita, pirita coloforme e marcassita (profundidade: 209,35 m). B) *Cemented rubble floatbreccia*, com dolomita fina de cor cinza claro, fragmento de dolomita tipo I de cor cinza escuro e esfalerita maciça, calcedônia e marcassita coloforme, com presença de estilólitos e vênulas de calcita com menos de 1 mm de espessura (profundidade: 232,48 a 232,61 m). C) *Cemented rubble floatbreccia*, com esfalerita e galena maciças, dolomita fina de coloração cinza escuro e dolomita branca grossa com microfalha de 3 mm de rejeito, além de quartzo fino associado a calcedônia coloforme (profundidade: 232,87 a 233,05 m). D) *Cemented crackle packbreccia*, com preenchimento de dolomita

branca grossa, fragmentos de dolomita branca com contatos angulares, esfalerita e galena maciças (profundidade: 235,10 a 235,22 m). E) *Cemented rubble floatbreccia*, com dolomita fina de cor cinza claro e dolomita branca grossa de preenchimento de cavidades, esfalerita em bandas e galena maciça com borda de marcassita coloforme (profundidade: 235,52 a 235,75 m). F) *Cemented rubble floatbreccia*, com dolomita fina tipo I, de cor cinza escuro e preenchimento por dolomita branca grossa, com fragmentos de dolomita fina tipo II de cor cinza claro e esfalerita granular, além de calcedônia e esfalerita coloformes na porção inferior direita da amostra (profundidade: 237,24 a 237,32 m). G) *Cemented rubble floatbreccia* com dolomita fina tipo II de cor cinza claro e preenchimento de dolomita branca grossa, com borda de esfalerita maciça, presença de quartzo fino e marcassita, além de calcedônia (profundidade: 262,66 a 262,78 m). H) *Cemented rubble floatbreccia*, com dolomita fina tipo I de cor cinza claro, esfalerita, pirita e marcassita maciças, dolomita branca grossa em preenchimento de cavidades, além de calcedônia, quartzo fino e presença de estilólitos (profundidade: 209,35 m). I) *Cemented rubble floatbreccia*, com fragmento de estromatólito colunar substituído por dolomita tipo II, calcedônia coloforme, com borda com marcassita e esfalerita coloformes, além de galena maciça e dolomita branca grossa em preenchimento de cavidade (profundidade: 241,68 a 241,82 m). J) *Cemented rubble floatbreccia* dolomita tipo II cortada por veio com microfalha composto por dolomita branca grossa, esfalerita maciça, quartzo fino e borda de calcedônia e pirita coloformes (profundidade: 255,87 a 256,01 m).

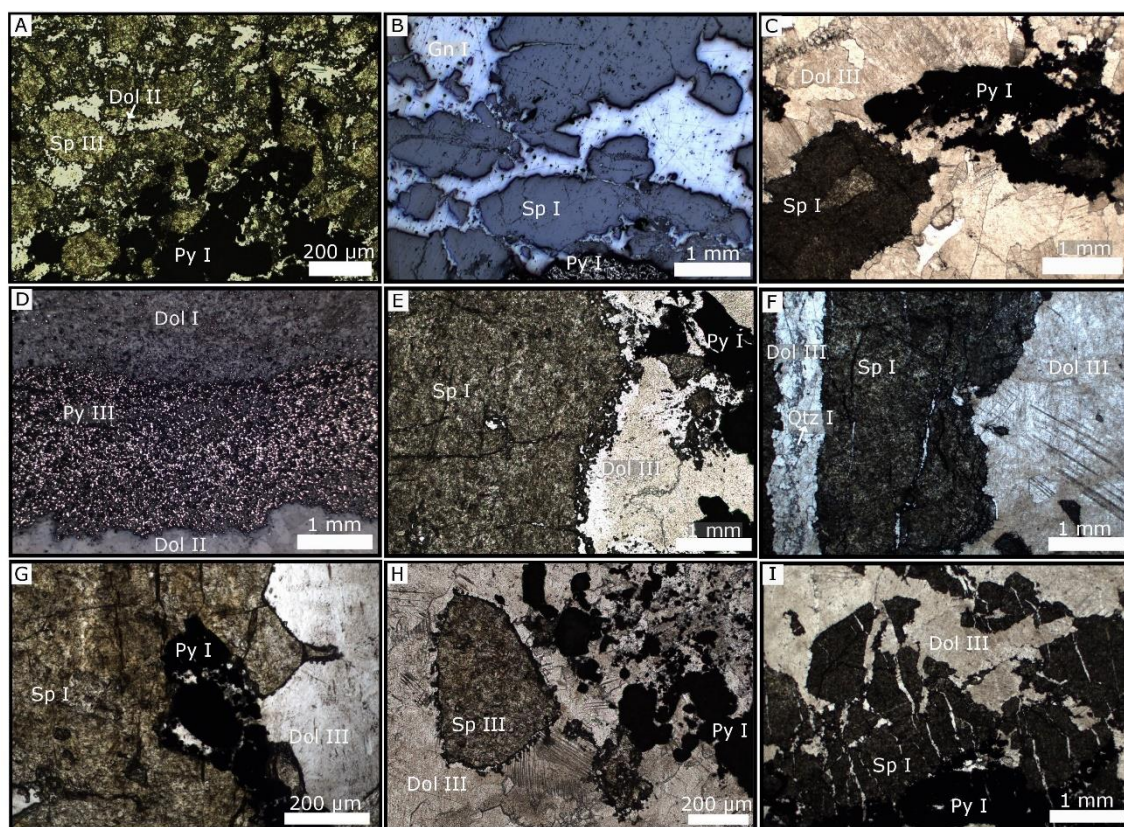


Figura 12. Fotomicrografias das brechas com mineralização de esfalerita, pirita e galena: A) *Cemented rubble floatbreccia*, com pirita fina subédrica à euédrica, esfalerita e dolomita fina tipo II associada a esfalerita (profundidade: 209,35 m, PP, aumento de 10x). B) *Cemented rubble floatbreccia*, associação de esfalerita, galena e preenchimento de pirita xenomórfica (profundidade: 235,52 a 235,75 m, RR, aumento de 2,5x). C) *Cemented rubble floatbreccia*, com associação de dolomita grossa xenomórfica tipo III, esfalerita e pirita (profundidade: 237,24 a 237,32 m, PP, aumento de 2,5x). D) *Cemented rubble floatbreccia*, em porção superior de fragmento de estromatólito, com pirita fina euédrica e dolomitas tipo I, fina e anédrica e II, subédrica (profundidade: 241,68 a 241,82 m, RR, aumento de 2,5x). E) *Cemented rubble floatbreccia*, com esfalerita associada a dolomita grossa xenomórfica e pirita fina (profundidade: 241,68 a 241,82 m, PP, aumento de 10x). F) *Cemented crackle packbreccia*, com esfalerita associada a dolomita grossa xenomórfica e quartzo microcristalino (profundidade: 235,1 a 235,22 m, PP, aumento de 2,5x). G) *Cemented rubble floatbreccia*, com associação de esfalerita, com preenchimento de pirita anédrica, além de dolomita grossa com contatos retos (profundidade: 262,66 a 262,78 m, PP, aumento de 10x). H) *Cemented rubble floatbreccia*, com dolomita grossa, xenomórfica, esfalerita e pirita (profundidade: 237,24 a 237,32 m, PP, aumento de 10x). I) *Cemented rubble floatbreccia*, com dolomita grossa, esfalerita e pirita (profundidade: 255,87 a 256,01 m, PP, aumento de 2,5x).

Análises de microscopia eletrônica de varredura também foram realizadas na zona mineralizada em uma amostra de brecha classificada como *cemented crackle packbreccia*, de profundidade 235,1 a 235,22 m, com o objetivo de complementar a descrição petrográfica.

Na amostra da brecha, corroborou-se a presença de esfalerita associada a pirita e galena. Observou-se que a galena parece estar inclusa na esfalerita (**Figura 13A**). A partir dos espectros gerados das áreas na amostra, foi possível confirmar a presença de esfalerita, pirita e galena, além de marcassita, que é anisotrópica e coloforme na amostra analisada (**Figura 14A**).

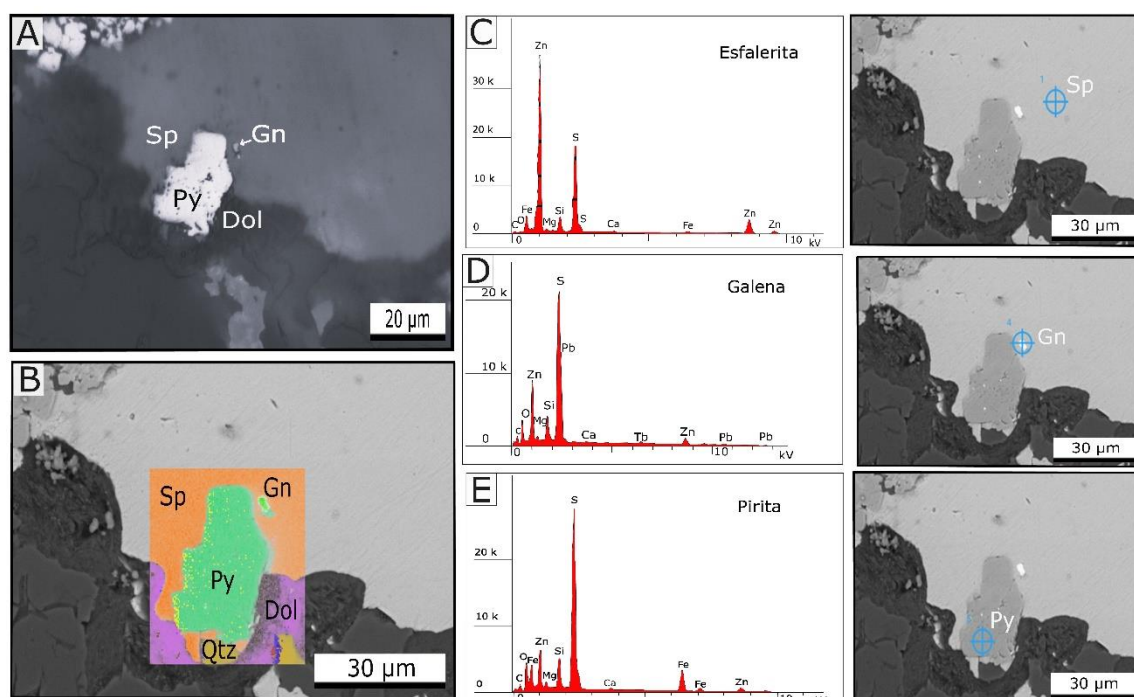


Figura 13. Amostra da zona mineralizada em análise por MEV: A. Fotomicrografia de feição de preenchimento; no centro da imagem, observa-se dolomita xenomórfica grossa associada a pirita subédrica, esfalerita e galena, que ocorrem na brecha mineralizada (profundidade 235,1 a 235,22 m, RX, aumento de 100x). B. Mapa de composição elemental obtido por análise de EDX, com os seguintes minerais identificados: Dol – dolomita em roxo, Gn – galena em verde claro, Py – pirita em verde escuro, Qtz – quartzo em amarelo. Sp – esfalerita em laranja. C. Espectro da esfalerita obtido em análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados. D. Espectro da galena obtido em análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados. E. Espectro da pirita obtido em análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados.

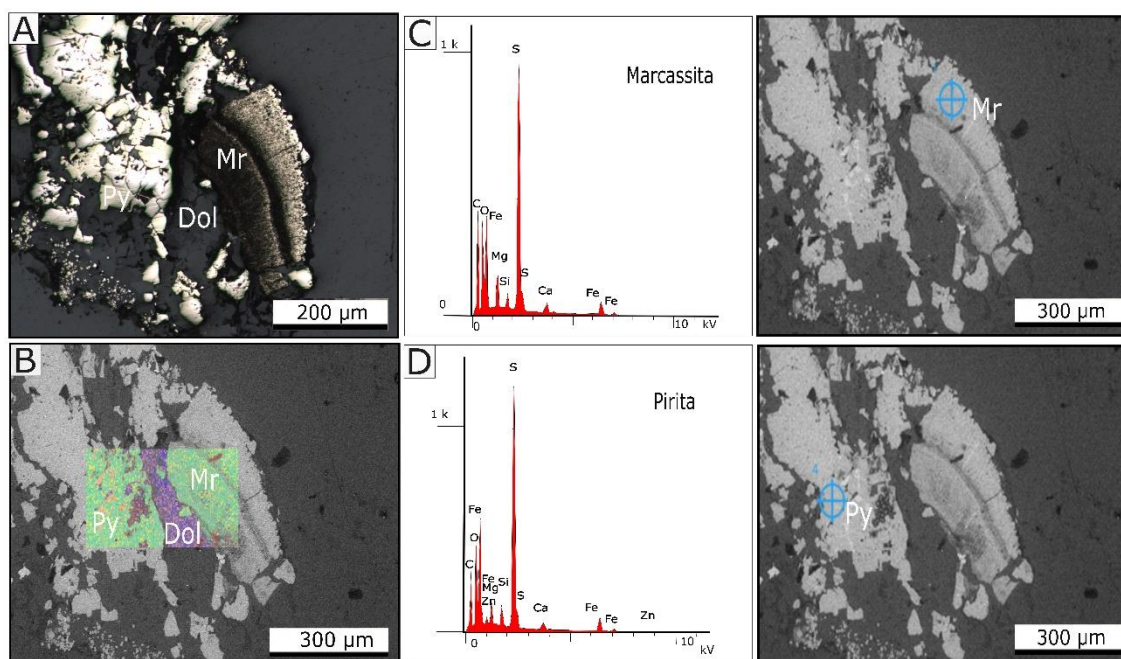


Figura 14. Amostra da zona mineralizada em análise por MEV: A. Fotomicrografia de feição de preenchimento, com dolomita subédrica, pirita anédrica e marcassita coloforme (profundidade: 235,1 a 235,22 m, RR, aumento de 10x). B. Mapa de composição elemental obtido por análise de EDX, com os seguintes minerais identificados: Dol – dolomita em roxo, Py e Mr – pirita anédrica e marcassita coloforme em verde. C. Espectro da marcassita obtido em análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados. D. Espectro da pirita obtido em análise MEV e respectiva imagem de elétrons retroespalhados.

5.5. Dados geoquímicos

Os gráficos de barras da **Figura 15** mostram os teores de Ag, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Pb, S e Zn em função da profundidade do furo de sondagem estudado. Teores mais elevados de Ag, Cu, Fe, Pb, S e Zn ocorrem no intervalo da zona de maior ocorrência do minério, especificamente no intervalo de 230 a 243 m de profundidade, relacionados principalmente a presença de esfalerita (ZnS), galena (PbS), pirita (FeS_2) e marcassita (FeS_2). O teor mais elevado de Ag poderia estar relacionado a sua presença em inclusões nos minerais. Os teores médios de zinco e chumbo na zona mineralizada são de 3,63 e 0,26 %, respectivamente. O teor médio de prata é de 0,58 ppm.

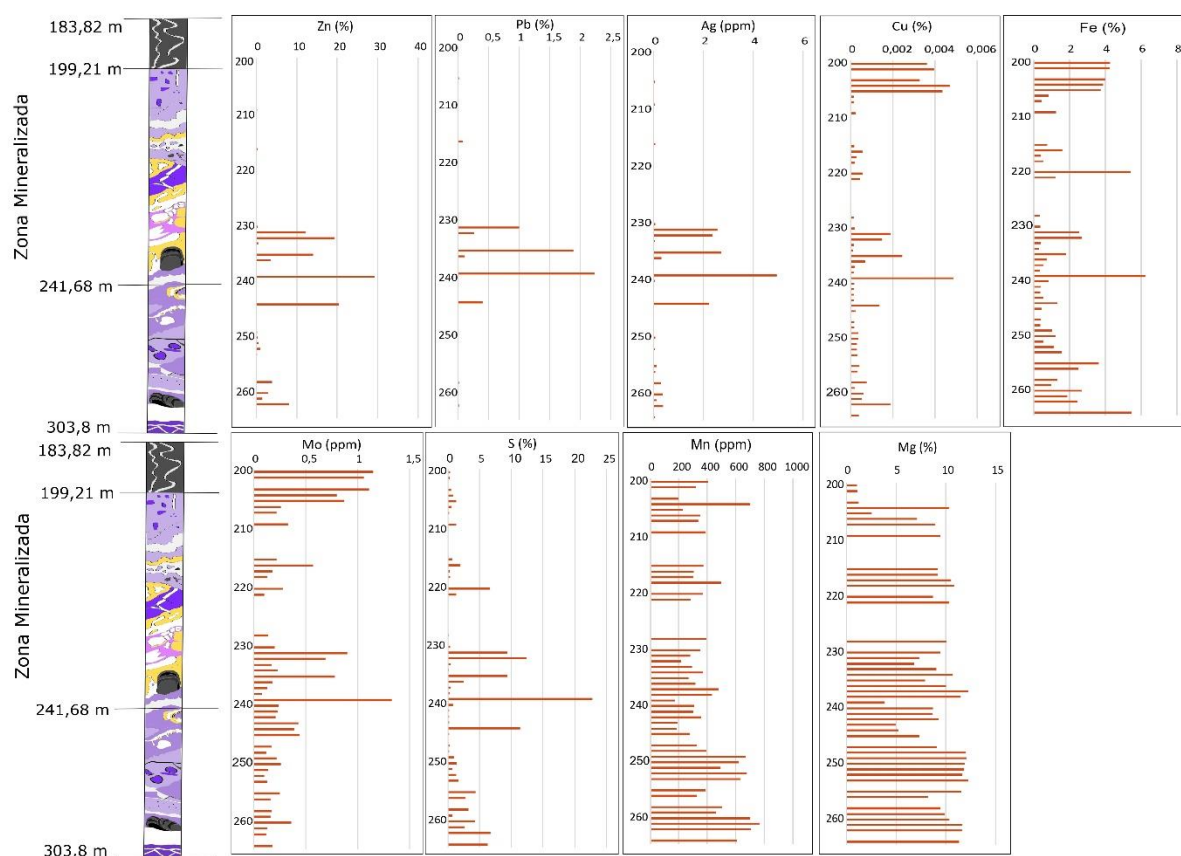


Figura 15. Gráficos de barras dos teores de Zn, Pb, Ag, Cu, Fe, Mo, S, Mn e Mg para as amostras do furo de sondagem FAD3 do depósito Fagundes, Paracatu-MG.

6. Discussão

6.1. Evolução temporal da zona mineralizada

As rochas analisadas provenientes do furo FAD3 do depósito Fagundes, são caracterizados por dolomitos com estruturas estromatolíticas e mineralização de esfalerita, galena e pirita, com características semelhantes aos depósitos do tipo Mississippi Valley (MVT), com feições epigenéticas, que incluem brechamento, dissolução, preenchimento de espaços abertos com dolomita e sílica, fraturamento e preenchimento de veios, dolomitização e silicificação. Monteiro *et al.* (2006) interpretaram a evolução temporal associada a gênese do depósito de Fagundes, e consideraram que a mineralização primária é posterior à formação de dolomita em sela. No entanto, é localmente sobreposta por características de compactação química, como estilólitos. Isso poderia sugerir uma ordem diagenética tardia a epigenética para a mineralização no depósito de Fagundes (Monteiro *et al.* 2006). O estudo dos testemunhos do furo FAD3 revelou uma evolução temporal similar àquela previamente definida para o depósito Fagundes, mas que é marcada por uma

diferença do estilo das feições epigenéticas relacionadas à mineralização associada a presença de brechas.

De modo geral, neste estudo, a evolução temporal pode ser subdividida em 3 estágios com relação a gênese do minério (**Figura 16**): (1) Pré-Mineralização; (2) Sin-Mineralização; (3) Pós-Mineralização.

O estágio Pré-Mineralização é caracterizado por minerais diagenéticos e feições epigenéticas. As feições diagenéticas observadas incluem fragmentos do que seria a rocha mais antiga, que apresenta dolomita muito fina, xenomórfica, além de uma segunda geração de dolomita muito fina e subédrica, que pode ter sido recristalizada. Feições epigenéticas pré-mineralização estariam relacionados aos eventos de brechamento e fraturamento da rocha, em que são observados fragmentos de dolomito, microbrechados e estromatólitos colunares fraturados. Este evento de fraturamento, que ocorre em *cemented rubble floatbreccias* com dolomita não-planar, é um fator que pode ter possibilitado o fluxo de fluidos e precipitação do minério, na interação do fluido com a rocha hospedeira.

Silicificação fissural, representada pelo preenchimento por calcedônia e quartzo de fraturas e espaços abertos resultantes de processos de dissolução dos carbonatos, além de substituição por dolomita em sela e pirita, são os principais processos que afetam os dolomitos previamente ao estágio de mineralização principal. Após a alteração fissural, a silicificação passa a ser pervasiva, com crescimento de calcedônia como concreções laminadas com textura de crescimento perpendicular a planos de fratura, quartzo microcristalino e em mosaico (Monteiro, 2002). Gerações de dolomita de granulação grossa em dolomitos fortemente silicificados, como descrito por Monteiro *et al.* (2007), também foram observadas nas amostras analisadas neste estudo.

O estágio sin-mineralização é caracterizado por dolomita branca grossa associada a esfalerita, galena e pirita em veios e brechas, com a formação de intervalos com teores de Zn, Pb e Ag médios de 3,63%, 0,26% e 0,58 ppm, respectivamente (**Figura 15**). Galena apresenta uma textura indicativa de preenchimento em uma fase posterior. Monteiro *et al.* (2007) observaram que a galena apresenta texturas predominantemente de preenchimento ou substituição, mas também ocorre em veios e vênulas associadas à dolomita, pirita e esfalerita

subordinada. Além disso, esfalerita e pirita apresentam dissolução parcial, sendo substituídas por dolomita euédrica.

As texturas de sulfeto do minério estratificado indicam principalmente deposição de sulfeto em espaços abertos dentro das rochas hospedeiras com dolomita, possivelmente relacionadas à fratura e dissolução durante o processo de mineralização, como sugere Monteiro *et al.* (2006).

O estágio Pós-Mineralização é marcado uma nova geração de dolomita branca em preenchimento de veios em que são observados fragmentos de dolomito e esfalerita, o que poderia indicar que este preenchimento por dolomita branca seria posterior ao estágio de mineralização. Esse minério tardio é evidenciado em veios de esfalerita tardios e pode ser sugerido pela distribuição heterogênea dos altos teores de metais (**Figura 15**). Outros indícios de deformação tardia são indicados pela remobilização de esfalerita, como indicado pela esfalerita III, além da deformação de marcassita coloforme (Mr III). Este tipo de marcassita coloforme de tipo III também foi observada em MEV.

É importante notar que estilos epigenéticos de mineralização e mobilização de minério pré-existente estão relacionados a estruturas quebradiço-dúcteis que foram relacionadas à tectônica compressiva no fechamento final da bacia oceânica durante a Orogenia Brasileira tardia (630-610 Ma; Dardenne, 2000).

Com relação aos dados geoquímicos (**Figura 15**), o magnésio apresenta teores altos e relativamente uniformes nas amostras do furo FAD3, isto poderia ser explicado pela rocha hospedeira ter sido intensamente dolomitizada e as brechas cimentadas por dolomita branca de granulação grossa. É possível observar que o ferro nem sempre varia junto com o enxofre. Isto pode ser devido à presença de sulfetos de ferro, no caso, pirita e marcassita. Molibdênio não é um elemento comum em depósitos de tipo MVT e ocorre em pequenas concentrações, que poderiam estar relacionadas à lixiviação de sequências clásticas (Sulu-Gambari *et al.*, 2017). Podem ocorrer minerais acessórios nos estilólitos que podem trazer uma concentração maior de molibdênio.

Em conclusão, as rochas analisadas neste estudo apresentam feições muito semelhantes às descritas para o depósito de Fagundes, como a presença de dolomita em sela como evento de alteração hidrotermal. Todavia, diferentemente do depósito de Fagundes descrito anteriormente (Monteiro *et al.*, 2006, 2007), este estudo

identificou a associação temporal de minerais relacionada à gênese do minério com a formação prévia de brechas.

Mineral		Características	Pré	Sin mineralização	Pós
Diagenética	Dol I	xenomórfica, contatos serrados, muito fina, com cristais de até 10 µm até 30 µm, em macro tem cor cinza escuro, em fragmentos da rocha hospedeira	—		
	Cdn I	agregados esféricos com extinção radial	—		
Epigenética	Brecha / Veio	Dol II			
		Dol III		-----	—
		Dol IV		————	—
		Cdn III		-----	—
	Brecha	Cdn IV		————	-----
		Cdn V		-----	-----
		Gn I		————	-----
		Mr I		-----	-----
		Mr III		-----	-----
		Py I		————	-----
		Py II		-----	-----
		Py III		-----	-----
		Qtz I	—	-----	-----
		Qtz II	—	-----	-----
		Qtz III	—	-----	-----
	Veio	Sp I		————	-----
		Sp II		-----	-----
		Sp III		-----	-----
		Sp IV		————	-----
		Cdn II		-----	-----
		Mr II		-----	-----
		Py IV		-----	-----
		Sp V		-----	-----

Figura 16. Relação temporal das associações diagenética e epigenética dos minerais do depósito Fagundes, considerando os estágios de pré, sin e pós-mineralização, em brechas e veios.

7. Conclusões

As rochas analisadas provenientes do furo FAD3 do depósito Fagundes, são caracterizados por dolomitos com estruturas estromatolíticas e mineralização de esfalerita, galena e pirita, com características semelhantes aos depósitos do tipo Mississippi Valley (MVT). São reconhecidas feições epigenéticas, que incluem brechamento, dissolução, preenchimento de espaços abertos com dolomita e sílica, fraturamento e preenchimento de veios, dolomitização e silicificação. As rochas hospedeiras analisadas neste trabalho, são representadas por dolomitos cristalinos, boundstones estromatolíticos laminares e colunares, e ocasionalmente rudstones intraclásticos ou brechas sindeposicionais, que são sobrepostos por filitos miloníticos.

As rochas da zona mineralizada apresentam esfalerita, galena, pirita e marcassita associados a dolomita branca de granulação grossa. O minério apresenta texturas coloformes indicativas de preenchimento de espaços abertos. A alteração hidrotermal é representada por forte silicificação anterior à mineralização além de mobilização, marcada por recristalização e dissolução parcial.

As rochas do furo FAD3 apresentam feições semelhantes e processos similares aos descritos para o depósito de Fagundes, como sugerido pela ordem de formação de eventos e as associações minerais, porém registram significativa remobilização associado a formação de veios tardios. Distintivamente do depósito de Fagundes descrito anteriormente (Monteiro *et al.*, 2006, 2007), este estudo identificou a associação temporal de minerais relacionada à gênese do minério com a formação prévia de brechas.

8. Referências

- ALDIS, C.; OLIVO, G. R.; ARRUDA, J. A. A. C.; CEVIK, I. S. Proterozoic carbonate-hosted Morro Agudo sulfide Pb-Zn district, Brazil: Mineralogical and geochemical evidence of fluid mixing during the ore stage. **Ore Geology Reviews**, [s. l.], v. 141, p. 104592, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104592>.
- COX, D. P.; SINGER, D. A. **Mineral Deposit Models**. 1st. ed. Washington, USA: United States Government Printing Office, 1992. 1992.
- Companhia Mineira de Metais, 1982. Pesquisa de Zn-Pb-Ag na região de Vazante. Relatório Interno.
- DARDENNE, M. A. The Brasília fold belt. *In*: Tectonic evolution of south america. 31st International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2000. p. 231–263.
- EDWARDS, R.; ATKINSON, K. **Ore Deposit Geology and its Influence on Mineral Exploration**. Firsted. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986. 1986. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-8056-6>.
- EMBRY, A. e KLOVAN, J.E. 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bull. Can. Pet. Geol.*, 19: 730-781.
- FERNANDES, N. A., OLIVO, G. R., & LAYTON-MATTHEWS-Matthews, D. (2019a). Siliciclastic-hosted zinc mineralization in the Proterozoic Vazante – Paracatu District, Brazil: Implications for metallogeny and sources of metals in sediment-hosted base metal systems. **Ore Geology Reviews**, 114(August), 103139. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103139>.
- FERNANDES, N. A., OLIVO, G. R., LAYTON-MATTHEWS, D., VOINOT, A., CHIPLEY, D., & OLIVEIRA, G. D. (2019b). 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 Research**, 335(October), 105483. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105483>.
- GRAYBEAL, F. T. Aspects of Mineral Exploration Thinking. **SEG Discovery**, [s. l.], n. 128, p. 24–35, 2022. Disponível em:

<https://pubs.geoscienceworld.org/segdiscovery/article/doi/10.5382/Geo-and-Mining-14/610906/Aspects-of-Mineral-Exploration-Thinking>.

LEACH, D.L., TAYLOR, R.D., 2009, Mississippi Valley-type lead-zinc deposit model: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1213, 5 p.

MARTINS-NETO, M. A. (2009). Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, 26(2), 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.10.001>.

MISI, A. et al. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: Implications to metallogenic and phosphogenic models. **Ore Geology Reviews**, v. 63, p. 76-90, 2014.

MISI, A. Zinco no Brasil: tipos de depósitos, reservas e produção. *In*: A.J., Melfi; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U. (org.). **Recursos Minerais no Brasil. Problemas e Desafios**. Firsted. Rio de Janeiro, Brazil: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 156–164. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-7006.pdf>.

MONTEIRO, L. V. S. Contribuição à Gênese das Mineralizações de Zn da Mina de Vazante, MG. 1997. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. doi:10.11606/D.44.1997.tde-22082013-142638.

MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; SPIRO, B.; GRACA, R.; OLIVEIRA, T. F.de. The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil; constraints in willemitic mineralization and fluid evolution. **Exploration and Mining Geology**, [s. l.], v. 8,n. 1–2, p. 21–42, 1999.

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

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

MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; JULIANI, C.; DE OLIVEIRA, T. F. 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**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 201–234, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169136805000284>.
- MONTEIRO, L. V. S.; BETTENCOURT, J. S.; JULIANI, C.; DE OLIVEIRA, T. F. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, Minas Gerais, Brazil: Mass balance and stable isotope characteristics of the hydrothermal alterations. **Gondwana Research**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 362–381, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1342937X06001973>.
- MORROW, D. W. Descriptive field classification of sedimentary and diagenetic breccia fabrics in carbonate rocks. **Bulletin of Canadian Petroleum Geology**, v. 30, n. 3, p. 227-229, 1982.
- OLIVO, G.; MONTEIRO, L.; BAIA, F.; SLEZAK, P.; CARVALHO, I.; FERNANDES, N.; OLIVEIRA, G.; BOTURA NETO, B.; MCGLADREY, A.; SILVA, A.; MOURA, M.; LAYTON-MATTHEWS, D. The Proterozoic Vazante Hypogene Zinc Silicate District, Minas Gerais, Brazil: A Review of the Ore System Applied to Mineral Exploration. **Minerals**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 22, 2018. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2075-163X/8/1/22>.
- PIMENTEL, M. M., DARDENNE, M. A., FUCK, R. A., VIANA, M. G., JUNGES, S. L., FISCHER, D. P., SEER, H. J., & DANTAS, E. L. (2001). Nd isotopes and the provenance of detrital sediments of the neoproterozoic Brasília belt, central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 14(6), 571–585. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00041-4).
- 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>.
- SÁNCHEZ, F.; HARTLIEB, P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. **Mining, Metallurgy & Exploration**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 1385–1399, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s42461-020-00262-1>.

- SANGSTER, D. F. Breccia-Hosted Lead—Zinc Deposits in Carbonate Rocks. In: **Paleokarst**. New York, NY: Springer New York, 1988. p. 102-116.
- SULU-GAMBARI, F., ROEPERT, A., JILBERT, T., HAGENS, M., MEYSMAN, F. J., & SLOMP, C. P. (2017). Molybdenum dynamics in sediments of a seasonally-hypoxic coastal marine basin. *Chemical Geology*, 466, 627-640.
- 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 Special Publication**, 294, 197–210. <https://doi.org/10.1144/SP294.11>.
- WARREN, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth Science Reviews*, v. 52, p. 1 – 81.