



Número: 427/2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

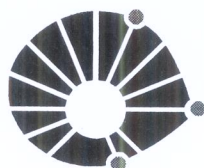
**Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do Extremo  
Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais**

**MARIANA GAZIRE LEMOS**

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dra. Lena Virgínia Soares Monteiro

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Campinas, como parte das exigências de Programa de Pós-Graduação em Geociências, Área de Geologia e Recursos Naturais, para obtenção do título de *Mestre*.

**Campinas, São Paulo  
Janeiro de 2011**



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**AUTORA:** Mariana Gazire Lemos

“Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do Extremo Norte da  
Mina de Vazante, Minas Gerais”

**ORIENTADORA:** Profa Dra Lena Virgínia Soares Monteiro

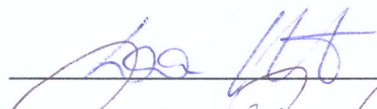
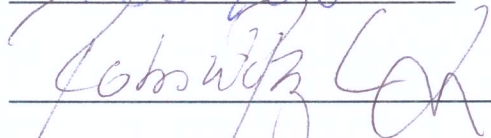
Aprovada em: 28 / 01 / 2011

**EXAMINADORES:**

Profa Dra Lena Virgínia Soares Monteiro

Prof. Dr. Roberto Perez Xavier

Dr. Adelson Dias de Souza

 - Presidente  
  


Campinas, 28 de janeiro de 2011

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca  
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

L544c Lemos, Mariana Gazire.  
Caracterização geológica e tecnológica do minério de zinco do extremo norte da Mina de Vazante, Minas Gerais / Mariana Gazire Lemos--  
Campinas,SP.: [s.n.], 2011.

Orientador: Lena Virgínia Soares Monteiro.  
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Zinco. 2. Zinco – Minas e mineração. 3. Paracatu (MG). I. Monteiro, Lena Virgínia Soares. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.

Título em inglês: Technological and geological characterization of zinc ore from extreme North of Vazante's mine.

Keywords: - Zinc;  
- Zinc – Mines and mining;  
- Paracatu (MG).

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências.

Banca examinadora: - Lena Virgínia Soares Monteiro;  
- Roberto Perez Xavier;  
- Adelson Dias de Souza.

Data da defesa: 28/01/2011

Programa de Pós-graduação em Geociências

## DEDICATÓRIA

*A minha querida mãe, Maria Cristiana Gazire lemos (in memoriam)*

*Aos meus avós, José, Amarildes, Iva e Virgílio (in memoriam)*

*A meu pai, Geraldo Majela Lemos*

*A meu esposo, Apolo Bhering*

*A toda minha família*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por proporcionar saúde e força em todos os momentos da minha vida.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Lena Monteiro pela orientação, amizade, ajuda e sugestões no desenvolvimento desta dissertação e durante todo curso de mestrado.

Aos Prof. Dr. Roberto Xavier e Prof. Dr. Ticiano José Saraiva dos Santos pelas dicas e sugestões para esta dissertação.

A toda equipe e colegas do programa de pós-graduação do Instituto de Geociências da UNICAMP.

Ao Prof. Dr. Aba Persiano e Luiz Garcia pela colaboração e apoio nas análises realizadas no laboratório de microanálise da UFMG.

A toda equipe do CETEC, em especial a geóloga Msc. Ieda Oliveira pelo auxílio na avaliação do grau de liberação do minério willemítico.

As empresas Msol e Vale por colaborarem com as liberações para finalização do estudo, as quais foram essenciais.

Ao colega, geólogo Msc. Samuel Nunes pelas discussões geológicas e inspiradores durante o início da dissertação. E aos colegas e queridos amigos Adriana Pinheiro e Lucas Fidelis que sempre estiverem acompanhando minha carreira e a incentivando. Sempre serei grata a vocês!

À Votorantim Metais, em especial a Unidade Vazante, que viabilizou esse projeto. Ao eng. Fernando Rezende pela confiança no meu trabalho. Aos amigos e colegas tecnólogo Euller Tavares e técnico Uarlem Gonçalves que apoiaram os trabalhos de mapeamento, ao Luís Flavio, responsável pelo banco de dados, à Cássia Mota, geólogo Msc. Cláudio Rosas, a geóloga Ana Flávia Ferreira e ao geólogo e gerente Vânio de Bessa. A toda equipe de beneficiamento e tecnologia, por também acreditarem no meu trabalho, em especial, aos engenheiros Msc. Lemyr Martins, Msc. Tiago Vitorino Silva e Dr. Adelson Souza pelos subsídios e apoio científico. À equipe de geologia de exploração, agradeço também, o apoio científico e bibliográfico, em especial aos geólogos Gustavo Diniz, Samuel Lago, Fernando Baia e Fernanda Cecília Barros. Para a querida equipe da planta piloto, meus sinceros agradecimentos pela amizade e colaboração na preparação das amostras e nos testes, em especial aos técnicos José Max e Maninho e a Eng. Juliana Siqueira. Agradeço também toda equipe do laboratório químico pelo considerável apoio as análises granulométricas. Muito obrigada!

Aos amigos que sempre estiveram presentes mesmo distantes: Joana Meira, Natália Blum, Carina Borgati, Ana Luiza Ladeira, Aline Maria, Aline Mariah, Antônio Caires, Eduardo Zenha, Marina Cordeiro, Josilene Aparecida, Humberto Rodrigues e toda turma do COREU.

Aos meus avôs e avós pelo exemplo, orações e oportunidades.

A meus padrinhos Jackson e Maria Lúcia por sempre acreditarem e apoiarem meus estudos. Aos queridos tio Maurício e tia Sônia pelas preocupações e incentivos.

Aos meus pais, Geraldo Majela Lemos e Maria Cristina Gazire (*in memoriam*), pelo exemplo e educação esplêndida concedida a mim e minha irmã cuja qualidade teve total influência sob o alcance desse objetivo.

A minha irmã Marina Gazire pela inspiração e exemplo e o seu namorado Felipe Gutierrez pelo apoio logístico.

Ao geólogo e esposo Msc. Apolo Bhering pelo apoio pessoal concedido em todas horas necessárias, além do apoio geológico.

## **BIOGRAFIA**

### **Dados Pessoais:**

Nome: Mariana Gazire Lemos

Nome em citações bibliográficas: Lemos, M.G

Sexo: Feminino

Endereço profissional: Diretoria de Tecnologia Mineral - GETEK/DIMT/Vale, Rodovia BR 381 Km 450 D. Industrial Simão da Cunha, 33040 900 Santa Luzia MG Brasil, T. (31)3691 4368/4348 F. (31)3691 4313

### **Formação acadêmica:**

2008-2011 –Mestrado em Geologia e Recursos Naturais pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil.

2001-2006 – Bacharelado em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Brasil.

### **Atuação Profissional:**

Vínculo institucional

2010 – Atual – Vale/Centro de Desenvolvimento Mineral

Atuação: Pesquisa e desenvolvimento

2009 – 2010 - Msol – Mineração Serras dos Oeste

2006 – 2009 – Votorantim Metais Zinco S/A – Unidade Vazante

### **Linha de Pesquisa:**

Caracterização tecnológica e mineralógica

### **Idiomas:**

Inglês - avançado

Espanhol - intermediário

## SÚMARIO

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.Introdução.....</b>                                                                         | <b>01</b> |
| 1.1. Importância da caracterização mineralógica e tecnológica para o tratamento de minérios..... | 03        |
| 1.2.Localização e vias de acesso.....                                                            | 06        |
| 1.3. Objetivo.....                                                                               | 06        |
| 1.4. Metodologia.....                                                                            | 08        |
| 1.4.1. Revisão bibliográfica.....                                                                | 08        |
| 1.4.2. Trabalhos de Campo e Amostragem.....                                                      | 09        |
| 1.4.3. Ensaio em laboratório.....                                                                | 12        |
| 1.4.3.1. Caracterização petrográfica.....                                                        | 13        |
| 1.4.3.2. Análise geoquímica.....                                                                 | 13        |
| 1.4.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura.....                                                | 15        |
| 1.4.3.4. Ensaio Tecnológicos.....                                                                | 16        |
| <b>2. Revisão bibliográfica.....</b>                                                             | <b>21</b> |
| 2.1. Revisão dos principais tipos de depósitos de Pb-Zn.....                                     | 21        |
| 2.2. Contexto Geológico Regional.....                                                            | 23        |
| 2.2.1. Contexto geotectônico.....                                                                | 25        |
| 2.2.2. Estratigrafia do Grupo Vazante.....                                                       | 26        |
| 2.2.3.Idade do Grupo Vazante.....                                                                | 29        |
| 2.2.4. Geologia Estrutural.....                                                                  | 31        |
| 2.2.5. Depósitos de Pb-Zn hospedadas no Grupo Vazante.....                                       | 32        |
| <b>3. Contexto Geológico Local.....</b>                                                          | <b>35</b> |
| 3.1. Estratigrafia.....                                                                          | 35        |
| 3.1.1. Formação Serra do Garrote.....                                                            | 36        |
| 3.1.2. Formação Serra do Poço Verde.....                                                         | 37        |
| 3.1.2.1. Membro Morro do Pinheiro Inferior.....                                                  | 37        |
| 3.1.2.2. Membro Morro do Pinheiro Superior.....                                                  | 37        |
| 3.1.2.3. Membro Pamplona Inferior.....                                                           | 40        |

|                                                                                                      |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 3.1.3. Metadolomitos Brechados e Brecha Hidrotermal.....                                             | 40            |
| 3.2. Geologia estrutural.....                                                                        | 42            |
| 3.2.1 Acamamento Sedimentar.....                                                                     | 43            |
| 3.2.2.Foliação Metamórfica.....                                                                      | 43            |
| 3.2.3. Estruturas relacionadas à Falha Vazante.....                                                  | 44            |
| 3.2.4. Falhas de baixo ângulo.....                                                                   | 46            |
| 3.2.5. Falhas NW.....                                                                                | 46            |
| 3.3. Caracterização dos estilos das mineralizações do Extremo Norte.....                             | 49            |
| 3.3.1. Mineralização de calamina.....                                                                | 49            |
| 3.3.2. Mineralização de willemita.....                                                               | 50            |
| 3.4.Relação das texturas e fluidos envolvidos.....                                                   | 53            |
| 3.5. Caracterização geoquímica do Extremo Norte.....                                                 | 61            |
| 3.5.1. Rocha Hospedeira.....                                                                         | 61            |
| 3.5.2. Mineralização.....                                                                            | 65            |
| <br><b>4. Caracterização tecnológica dos subtipos de minério com willemita do Extremo Norte.....</b> | <br><b>71</b> |
| 4.1. Caracterização do subtipo willemita rica em Fe.....                                             | 72            |
| 4.1.1. Distribuição dos teores por fração granulométrica.....                                        | 72            |
| 4.1.2. Separação dos minerais por líquido denso.....                                                 | 74            |
| 4.1.3. Estimativa da composição mineral, formas de ocorrência e liberação da willemita.....          | 76            |
| 4.2. Caracterização do subtipo de minério com willemita.....                                         | 80            |
| 4.2.1. Distribuição dos teores por fração granulométrica.....                                        | 80            |
| 4.2.2. Separação dos minerais por líquido denso.....                                                 | 82            |
| 4.2.3. Estimativa da composição mineral, formas de ocorrência e liberação da willemita.....          | 83            |
| 4.3. Comparação das características tecnológicas dos subtipos de minero willemítico.....             | 87            |
| 4.4. Resultados dos testes de densidade.....                                                         | 90            |

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Conclusão - Comparação entre a Mina de Vazante e Extremo Norte.....</b> | <b>91</b> |
| <b>6. Sugestões.....</b>                                                      | <b>95</b> |
| <b>Referência Bibliográficas.....</b>                                         | <b>97</b> |

## SUMÁRIO DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Desenho esquemático mostrando o fluxograma do processo de tratamento dos minério da Mina de Vazante (Souza, 2011).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 4  |
| Figura 1.2. Localização e via de acessos à cidade de Vazante e área de estudo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 7  |
| Figura 1.3. Imagem aérea (quickbird, 2004) com distribuição dos pontos levantados para caracterização geológica.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 10 |
| Figura 1.4. Imagem aérea (quickbird, 2004) com distribuição das amostras.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 11 |
| Figura 1.5. Fluxograma de trabalho em laboratório (modificado de Neumann et al. 2004).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 12 |
| Figura 1.6. Esquema da interação de feixe de elétrons na amostra (Goldstein et al., 1992).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 15 |
| Figura 1.7. Desenho esquemático que ilustra separação por líquidos densos (modificado de Jones, 1987).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 18 |
| Figura 1.8 Tipos de partículas mistas (modificado de Wills, 1988). I. Espécies mineralógicas justapostas; II. Inclusão de uma fase mineral em outra; III. Envolvimento de uma fase mineral por outra; IV. Fase mineral disseminada em outra.....                                                                                                                                                                                                                       | 19 |
| Figura 1.9. Etapas do teste de densidade. A) Abastecimento do tubo de PVC com água. B) Pesagem da amostras. C) Leitura do volume deslocado pelo testemunho. (Votorantim Metais, 2009).....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 20 |
| Figura 2.1. Mapa geológico simplificado da Bacia do São Francisco, mostrando a área de ocorrência do Grupo Vazante, hospedeiro das mineralizações de zinco (modificado de Alkmim & Marshak, 1998 e Misi, 2001.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 24 |
| Figura 2.2 Representação esquemática da Província Tocantins com suas respectivas faixas móveis e crátons (Valeriano et al. 2004).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 25 |
| Figura 2.3: Seção esquemática do Grupo Vazante mostrando as relações de contato com Grupo Canastra e Bambuí (Dardenne et al.2008) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 26 |
| Figura 2.4. Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (Dardenne, 2000).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 28 |
| Figura 2.5. Seção esquemática representando a estruturação da área (A. Zona de Falha; B. Zona de Falha da Serra do Garrote; 1. Metapelitos da Formação Serra do Garrote; 2. Unidade filítica quartzosa milonitizada; 3. Metadolomito do Morro do Pinheiro Inferior; 4. Filitos carbonosos do Morro do Pinheiro Inferior; 5. Metadolomito cinza com bird eye's do Morro do Pinheiro Superior; 6. Metadolomito com intercalações de metapelitos do Pamplona Inferior; 7. |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Metadolomito do Pamplona Médio a Superior; 8. Colúvio; 9. Alúvio. (Rostriolia et al. 2002).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 32 |
| Figura 2.6. Perfil do depósito de Vazante (Monteiro, 1997), confeccionado a partir do Perfil de Sondagens 11750E (Sucuri) da Votorantim Metais Zinco (1984).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 34 |
| Figura 3.1. Coluna estratigráfica do Grupo Vazante na área do Extremo Norte (modificado de Dardenne, 2000).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 35 |
| Figura 3.2. Contato entre a Formação Serra do Poço Verde e Formação Serra do Garrote – Porção Norte da área.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 36 |
| Figura 3.3. Estereogramas A) de contorno com atitude de todas as famílias de descontinuidades encontradas no Extremo Norte (N=79) B) roseta de frequência das estruturas.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 43 |
| Figura 3.4. Imagem de satélite <i>Quickbird</i> (2004) mostrando inflexão da Zona da Falha de Vazante (destaque em vermelho).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 44 |
| Figura 3.5. Esterograma de contorno das medidas contidas no plano de Falha de Vazante.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 45 |
| Figura 3.6. Diagrama mostrando solubilidade da esfalerita, willemita, smithsonita e zincita em função da temperatura e condições redox a) condições ácidas (pH = 5) e b) neutras (pH = 7). Escala redox é expressa em unidades de log (fCO <sub>2</sub> (g)/ fCH <sub>4</sub> (g)) (Brugger et al., 2003) e c) diagrama SiO <sub>2</sub> -ZnO-FeO (modificado de Monteiro, 1997).....                                                                                                                            | 60 |
| Figura 3.7. A Gráfico tipo spider mostrando enriquecimento de Pb da das rochas hospedeira pobre em Fe. B. Gráfico tipo spider mostrando enriquecimento de Fe nas rochas hospedeiras ricas em Fe. C. Gráfico tipo spider mostrando enriquecimento de Zn nas brechas. D. Gráfico tipo spider mostrando empobrecimento de Ca nas brechas. E. Gráfico tipo spider mostrando empobrecimento de Mg da das rochas hospedeira. F. D. Gráfico tipo spider mostrando leve empobrecimento de Al das rochas hospedeiras..... | 62 |
| Figura 3.8 Distribuição do Zn (A) e Fe (B) em relação à profundidade (Furo MASA82).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 63 |
| Figura 3.9. Correlação entre Al (ppm)e: A. Zr (ppm). B. Ti (ppm). C. K (ppm)D. La (ppm). E. Li (ppm). F. Rb (ppm) G. Sn (ppm).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 64 |
| Figura 3.10. Correlação entre SiO <sub>2</sub> (%) e: A. K <sub>2</sub> O (ppm). B. TiO <sub>2</sub> (ppm). C. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 65 |
| Figura 3.11. A. Histograma de Zn das amostras willemíticas ricas em Fe. B. Histograma de Zn das amostras willemíticas. C. Histograma de Fe das amostras willemíticas ricas em Fe. D. Histograma de Fe das amostras willemíticas.....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 66 |

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.12. Comparação entre as medianas dos elementos das brechas/ metadolomitos alterados e mineralização.....                                                                   | 66 |
| Figura 3.13. Comparação entre as medianas das amostras de minério ricas e pobres em Fe.....                                                                                         | 67 |
| Figura 3.14. Correlação entre: A. Fe vs Zn (%). B. ZnO vs SiO <sub>2</sub> (%). C. Zn (%) vs Cr (ppm). D. Ca vs Zn (ppm).....                                                       | 68 |
| Figura 3.15. Correlação entre A. Ca vs Mg (ppm). B. As vs Pb (ppm). C. As vs Ca (ppm) D. Pb vs Cu (ppm).....                                                                        | 69 |
| Figura 3.16. Diagrama ternário Fe vs Zn vs Cr mostrando diferenciação entre os tipos de minério (ppm).....                                                                          | 69 |
| Figura 3.17. Variação da razão Zn e Fe de acordo com a profundidade. A e B) minério rico em Fe e C e D) minério pobre em Fe. ....                                                   | 70 |
| Figura 4.1. Comparação das análises granulométricas dos subtipos de minério com willemita.....                                                                                      | 72 |
| Figura 4.2. Produto afundado da separação mineral da amostra do minério rico em Fe –Fração - 0,15+0,11mm.....                                                                       | 76 |
| Figura 4.3. Distribuição das formas de willemita para o minério rico em Fe.....                                                                                                     | 78 |
| Figura 4.4. Produto da separação mineral da amostra do minério com willemita A)flutuado B) afundado – Fração -0,074+0,044mm.....                                                    | 83 |
| Figura 4.5. Distribuição das formas de willemita para o minério com willemita.....                                                                                                  | 85 |
| Figura 4.6 Variação de acordo com a distribuição granulométrica dos subtipos com willemita e rico em Fe A. Zn (%). B. Fe (%). C. CaO (%). D. MgO (%). E. Pb (ppm). F. Ag (ppm)..... | 89 |
| Figura 4.7. Correlação da densidade (g/m <sup>3</sup> ) vs Fe+Zn (%).....                                                                                                           | 90 |

## SUMÁRIO DE TABELAS

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1.1. Distância do município de Vazante dos centros regionais.....                            | 7  |
| Tabela 1.2. Elementos analisados em ICP-MS/ICP-ES e limite de detecção.....                         | 14 |
| Tabela 1.3. Elementos analisados por fire assay, e ICP-ES e limite de detecção.....                 | 14 |
| Tabela 1.4. Variação com número de abertura da peneira em mesh, in natura e mm (Silva, 1989).....   | 17 |
| Tabela 4.1. Composição química das amostras.....                                                    | 71 |
| Tabela 4.2. Distribuição granuloquímica da amostra Masa115.....                                     | 73 |
| Tabela 4.3. Resultados dos ensaios da separação mineral para amostra Masa115.....                   | 75 |
| Tabela 4.4. Estimativa da composição mineralógica para amostra Masa115.....                         | 76 |
| Tabela 4.5. Sumário da distribuição da willemita relativa a liberação no minério rico em Fe.....    | 77 |
| Tabela 4.6. Distribuição por fração granuloquímica da amostra Masa124.....                          | 81 |
| Tabela 4.7. Resultados dos ensaios da separação mineral para amostra Masa124.....                   | 82 |
| Tabela 4.8. Estimativa da composição mineralógica para amostra Masa124.....                         | 83 |
| Tabela 4.9. Sumário da distribuição da willemita relativa a liberação no minério com willemita..... | 84 |

## SUMÁRIO DE PRANCHAS

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Prancha 3.1. Representação das litotipos da Formação Serra do Garrote e Formação Serra do Poço Verde.....                   | 39 |
| Prancha 3.2. Representação das litotipos da Formação Serra do Poço Verde, Metadolomitos brechados e Brecha Hidrotermal..... | 41 |
| Prancha 3.3. Representação das estruturas do Extremo Norte de Vazante.....                                                  | 47 |
| Prancha 3.4. Representação das estruturas encontradas no Extremo norte de Vazante.....                                      | 48 |
| Prancha 3.5. Tipo de minérios com calamina.....                                                                             | 52 |
| Prancha 3.6. Minério com willemita e rica em ferro.....                                                                     | 54 |
| Prancha 3.7. Minério com willemita e rica em ferro.....                                                                     | 55 |
| Prancha 3.8. Minério com willemita.....                                                                                     | 56 |
| Prancha 3.9. Minério com willemita.....                                                                                     | 57 |
| Prancha 3.10. Minério com willemita.....                                                                                    | 58 |
| Prancha 4.1. Associações dos grãos que contem willemita do subtipo rico em Fe.....                                          | 79 |
| Prancha 4.2. Associações dos grãos do subtipo de minério com willemita.....                                                 | 86 |

## **LISTA DE ANEXOS**

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo 1. Mapa e perfil do Extremo Norte da Mina de Vazante..... | 105 |
| Anexo 2. Fichas de Campo.....                                   | 111 |
| Anexo 3. Análise química.....                                   | 135 |
| Anexo 4. Manuscrito I.....                                      | 139 |
| Anexo 5. Manuscrito II.....                                     | 167 |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$z$  = profundidade em relação à cota da superfície

N = norte

S = sul

NE= nordeste

Ma= milhões de anos

Top size = Granulometria inicial da amostra

EDS = Análise por dispersão de energia

WDS = Análise por dispersão de comprimento de onda

SEDEX = Depósitos de sulfetos maciços sedimentar exalativo

Zn = zinco

Fe = ferro

Mg = magnésio

Si = silício

Ca = cálcio

O = oxigênio

H = hidrogênio

C = carbono

Pb = chumbo

Ag = prata

Cd = cádmio

Cu = cobre

PM = família de descontinuidades de direção paralela aos corpos de minério

BA = família de descontinuidades de baixo ângulo

S0 = acamamento sedimentar preservado

PC = família de descontinuidades de direção contrária à direção do minério

NW = direção noroeste e família de descontinuidades de direção noroeste

Sn = foliação da rocha

km = kilometros

m = metros

mm = milímetros

cm = centímetros

l = litros

kg = quilogramas

g = gramas

WI= *work index*



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE ZINCO DO EXTREMO NORTE  
DA MINA DE VAZANTE, MINAS GERAIS**

**MARIANA GAZIRE LEMOS**

**RESUMO**

A Faixa Vazante-Paracatu, localizada na porção noroeste de Minas Gerais, representa o mais importante distrito zincífero do país. Nos últimos anos, os depósitos de zinco não-sulfetados, como o de Vazante localizado nessa faixa, vem se destacando no cenário internacional devido aos teores de zinco mais elevados em relação aos de minérios sulfetados e aos avanços nas tecnologias de processamento mineral.

Estudos de caracterização mineralógica e geoquímica do corpo de minério da Mina Extremo Norte (Antiga Mineração Aeirense S/A), que representa uma continuidade do *trend* de mineralização de Vazante, visam à identificação da forma de ocorrência e distribuição de elementos úteis que poderão vir a ser aproveitados, tais como Zn e seus possíveis subprodutos.

As etapas realizadas nesse estudo incluíram trabalhos de campo, análises químicas de rocha total, petrografia, análises com uso de microscopia eletrônica de varredura e ensaios tecnológicos nos tipos de minérios identificados.

Os dados levantados mostram diferenças entre o minério do Extremo Norte e da Mina de Vazante. Os corpos de minério no Extremo Norte são hospedados por unidades dolomíticas do Membro Morro do Pinheiro Inferior (Formação Serra do Poço Verde), próximo ao contato com rochas metapelíticas da Formação Serra do Garrote, ambas do Grupo Vazante. O controle da mineralização é estrutural, assim como na Mina de Vazante, mas a zona de falha que controla a distribuição dos corpos de minério apresenta traço curvo e direção N-S. A mineralização supérgena é representada pela calamina (hemimorfita), enquanto a hipógena, apresenta predominância de willemita. Altos conteúdos de ferro nas zonas mineralizadas, também uma particularidade da área, foram usados na classificação de subtipos de minérios de calamina e willemita.

A partir das relações mineralógicas, químicas e texturais, pode-se sugerir que a participação de fluidos metalíferos e meteóricos seria provável para a formação da mineralização hipógena do Extremo Norte. Neste contexto, as condições físico-químicas resultantes da mistura de fluidos para a formação do minério willemítico seriam aquelas de pH neutro a básico, resultante da maior participação de fluidos meteóricos já aquecidos ou do tamponamento devido às reações com as rochas carbonáticas, sem decréscimo acentuado de temperatura.

As análises químicas mostraram que os teores de ferro do minério da antiga Mina da Masa podem ser relacionados à profundidade e ao fechamento de lentes de willemita mais profundas. Além disso, o minério da antiga Mina da Masa é mais empobrecido em elementos traços como Ag, Cd, Ge e Pb em relação ao minério de Vazante. Tal fato pode estar relacionado ao conteúdo mais baixo de sulfetos no minério do Extremo Norte.

De acordo com a caracterização tecnológica, observa-se que os subtipos de minério com willemita com menores (Fe < 20%) e maiores teores de Fe (Fe > 20%), mostram tendências semelhantes em relação a sua distribuição granulométrica. O conteúdo de Zn é significativo entre as faixas granulométricas -0,15+0,11 e -0,044+0,038mm. Os teores de Fe encontram-se maiores na fração grossa, principalmente para as amostras ricas em Fe, onde os grãos de hematita estão associados à willemita ou liberados. Ao relacionar tal fato com a petrografia, pode-se concluir que isso deve-se à substituição da fase willemítica pela hematítica.

Os teores de CaO e MgO apresentaram-se maiores nas frações mais finas para os dois subtipos de minério, principalmente para o subtipo rico em Fe e contribuem para fenômeno *slime coating*, que é resultante tanto dos maiores conteúdos de dolomita, como quantidades elevadas de hematita, que representa um corpo moedor devido à diferença em sua dureza em relação aos minerais carbonáticos.

Em geral, o aproveitamento dos sulfetos do minério da Mina Extremo Norte é dificultado por sua forma de ocorrência, em inclusões muito finas na willemita, que não são liberadas mesmo em frações granulométricas finas (-0,038 mm).

Espera-se que esta dissertação possa fornecer subsídios para futuros estudos geometalúrgicos, auxiliando na previsibilidade do comportamento do minério na Usina e na otimização do rendimento da planta metalúrgica.

Palavras chaves: Depósito de zinco, Faixa Paracatu Vazante, Caracterização Tecnológica.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

## TECHNOLOGICAL AND GEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF ZINC ORE FROM EXTREME NORTH OF VAZANTE'S MINE.

MARIANA GAZIRE LEMOS

### ABSTRACT

*The Vazante-Paracatu Belt, located in the northwest portion of the Minas Gerais state, is the most important Brazilian Zn district. In recent years, non-sulphide zinc deposits, such as the Vazante mine, has been highlighted in the international zinc scenario due to its higher zinc grade than those of sulphide ores and mineral processing advances.*

*Mineralogy and geochemistry studies of the Extremo Norte orebody (former Mineração Azeiteiro S/A), which represents a continuing trend of mineralization in relation to that of Vazante, aim to identify the form of occurrence and distribution of useful elements, such as Zn and its byproducts.*

*The steps carried out were field work, whole rock chemical analysis, petrography including optical microscopy and scanning electron microscopy and technological tests.*

*The data collected showed differences between the Extremo Norte and Vazante ores. In the Extremo Norte deposit, the orebodies are hosted by dolomitic units of the Lower Morro do Pinheiro Member (Serra do Poço Verde Formation, Vazante Group), close to the contact with metapelitic rocks of the Serra do Garrote Formation (Vazante Group). The mineralization is structurally-controlled, as well as in the Vazante mine, but the fault zone in this area is a curved stroke with N-S trend. The supergene mineralization is represented by calamine (hemimorphite), while the hypogene ore comprises predominantly willemite. High contents of iron in the mineralized zones, also a main feature of the area, have been used to classify the ore subtypes.*

*From the relationships among mineralogy, chemistry and textures, it could be suggested that the involvement of meteoric and metalliferous fluids would also be likely in the Extremo Norte area. The physicochemical conditions, resulting from the ideal mixing process for the willemite formation ore would be those of the basic neutral pH, resulting from participation of heated meteoric fluids or plugging due to reactions with carbonate rocks, without rapid decrease in temperature.*

*The chemical analysis showed that levels of iron in the Extremo Norte ore may be related to depth and closing of deeper willemite lenses. In addition, the ore from Extremo Norte area is more depleted in minor elements, such as Ag, Cd, Pb and Ge than Vazante samples. This may be related to lower sulfide contents in the ore samples of the Extremo Norte than those typical of the Vazante ore.*

*According to the technological characterization, it is observed that the subtypes of willemite ore show similar trends in relation to their size distribution. The content of Zn is significant in particle sizes between  $-0.15 + 0.11$  and  $-0.044 + 0.038$  mm. Fe contents were higher in the coarse fraction, especially for Fe-enriched samples, where the grains of hematite are associated with willemite or represent released particles. By linking this fact with the petrography, it is possible to conclude that this is due to the presence of hematite mass, which commonly replaces willemite.*

*The contents of CaO and MgO was higher in finer fractions for the two subtypes of ore, especially for subtype rich in Fe and contribute to slime coating. This phenomenon is indeed related to higher contents of CaO and MgO and quantities of hematite, because it is a body grinder can be due to difference in their hardness.*

*In general, the potential for sulphide recovery is not high due to its occurrence mode. In the Extremo Norte Mine, isolated sulphide bodies have not been recognized and sulphide phases occur only as very thin inclusions in willemite. These inclusions were not released even in very fine granulometry.*

*This study may provide insights for future geometallurgical studies, assisting in the predictability of the ore behavior in the plant and optimizing the efficiency in metallurgical plant.*

*Key words: Zinc deposits, Paracatu Vazante belt, Technological Characterization*

## 1. Introdução

A Faixa Vazante-Paracatu, localizada na região noroeste de Minas Gerais, representa o mais importante distrito zincífero do país. Os depósitos de Vazante e Morro Agudo são responsáveis por toda a produção de concentrado de zinco brasileira, ostentando recursos estimados em 7,9 milhões de toneladas medidas com teor médio de 23,4% de zinco (minério willemítico de Vazante); 328 mil toneladas medidas com 15,04% de zinco (minério supérgeno de Vazante, com predominância de hemimorfita) e 2,25 milhões de toneladas medidas com 4,55% de zinco (minério sulfetado de Morro Agudo; Votorantim Metais Zinco, 2008).

A jazida de Vazante foi descoberta por um raizeiro de ervas chamado Ângelo Solis em 1951, que achou interessante o brilho metálico da hematita, mineral associado ao minério zincífero. As atividades mineiras a céu aberto tiveram início em 1969 e a lavra subterrânea em 1980, sob a direção da Companhia Mineira de Metais (CMM), atualmente Votorantim Metais.

Próximo à Mina de Vazante, a noroeste, o depósito de zinco da antiga Mineração Areiense S/A (MASA) começou a ser explorado em 1960 pelo Grupo Ingá. Todavia, em 1997 a mineradora entrou em processo de falência e a massa falida, sindicada pelo Banco de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais, foi leiloada no ano de 2007, sendo a posse da área da MASA destinada à Votorantim Metais. No início de 2008 a área foi renomeada pela Votorantim Metais de Extremo Norte, em referência à sua localização em relação à Mina de Vazante.

Os depósitos minerais do distrito zincífero de Vazante-Paracatu são hospedados em rochas do Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998), constituído, em geral, por metarritmitos, metapelitos e metadolomitais, e que representa uma das unidades metassedimentares do segmento sul da Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967).

O minério mais importante da Mina de Vazante é predominantemente silicático, sendo constituído por willemita ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ), dolomita, siderita, quartzo e hematita com clorita, franklinita, zincita, magnetita, smithsonita, gahnita, barita e apatita subordinados. Corpos de minério sulfetado, menores, cisalhados, constituídos por esfalerita, e galena, com calcocita, covellita e greenockita associados, são também reconhecidos ao longo da Falha de Vazante (Monteiro, 1997; Monteiro *et al.*, 1999). Esta zona possui traço curvo, com direção N50E e mergulho 50-70 NW na Mina de Vazante e se estende por 10 km até o contato da Formação Serra do Poço Verde com a Formação Serra do Garrote na Mina Extremo Norte, assumindo direção N-S.

Até a década de 90, a origem do minério willemítico foi considerada supérgena (Amaral, 1968; Rigobello *et al.*, 1988). Estudos sobre a evolução estrutural (Pinho *et al.*, 1989; Pinho, 1990), e

características petrológicas, geoquímicas e isotópicas do depósito (Monteiro, 1997; Monteiro *et al.*, 1998a; 1998b; 1999; 2007) confirmam a origem hidrotermal para o minério willemítico, sincrônica ao desenvolvimento da Zona de Falha de Vazante.

Nos últimos anos, depósitos de zinco não-sulfetados vêm-se destacando no cenário internacional (Sangster, 2003; Brugger *et al.*, 2003; Hitzman *et al.*, 2003) devido aos teores de zinco mais elevados desse tipo de minério e aos avanços nas tecnologias de processamento mineral, que permitem a produção de concentrados de zinco de alta pureza com menor consumo de energia nos processos de beneficiamento. Tal mudança no cenário internacional justifica estudos detalhados nos distritos zincíferos brasileiros, em especial na Faixa Vazante-Paracatu, uma vez que o depósito de Vazante é considerado o maior exemplo mundialmente conhecido de depósito de zinco não-sulfetado de origem hipógena (Hitzman *et al.* 2003). Além disso, no Brasil, a empresa Votorantim Metais - Unidade Três Marias, é única no mundo a tratar minérios silicatos, sendo a etapa de lixiviação destes concentrados silicatos patente da empresa.

Os trabalhos realizados por Amaral (1968), Monteiro (1997; 2002) e Monteiro *et al.*, (1999, 2006; 2007) na Mina de Vazante indicaram a presença de múltiplas fases minerais portadores de zinco, incluindo, além de willemita (mineral de minério), a hemimorfita, smithsonita, esfalerita, clorita (até 13% de Zn), hematita (até 6% de Zn), franklinita, zincita, gahnita e dolomita. Associados ao zinco foram identificados chumbo, cádmio, prata, cobalto, antimônio, cobre, níquel, arsênio, mercúrio, vanádio, urânio e elementos terras raras leves. A presença de ouro associada ao minério também foi sugerida pelas poucas análises químicas de rocha total realizadas no âmbito desses estudos.

Esta dissertação objetiva à caracterização mineralógica e geoquímica do minério zincífero, bem como a contextualização geológica da extensão norte do depósito de Vazante (antiga Mineração Areiense S/A – MASA), para a qual ainda não são disponíveis estudos na literatura. A caracterização realizada qualifica e quantifica as fases minerais existentes nos corpos de minério da Mina Extremo Norte, que serão lavrados e beneficiados, permitindo a identificação da forma de ocorrência de minerais industriais que contém zinco e possíveis subprodutos associados. Além disso, o estudo também possibilita um melhor ajuste entre geologia, planejamento, lavra e metalurgia, resultando na diminuição dos custos de operação da planta metalúrgica.

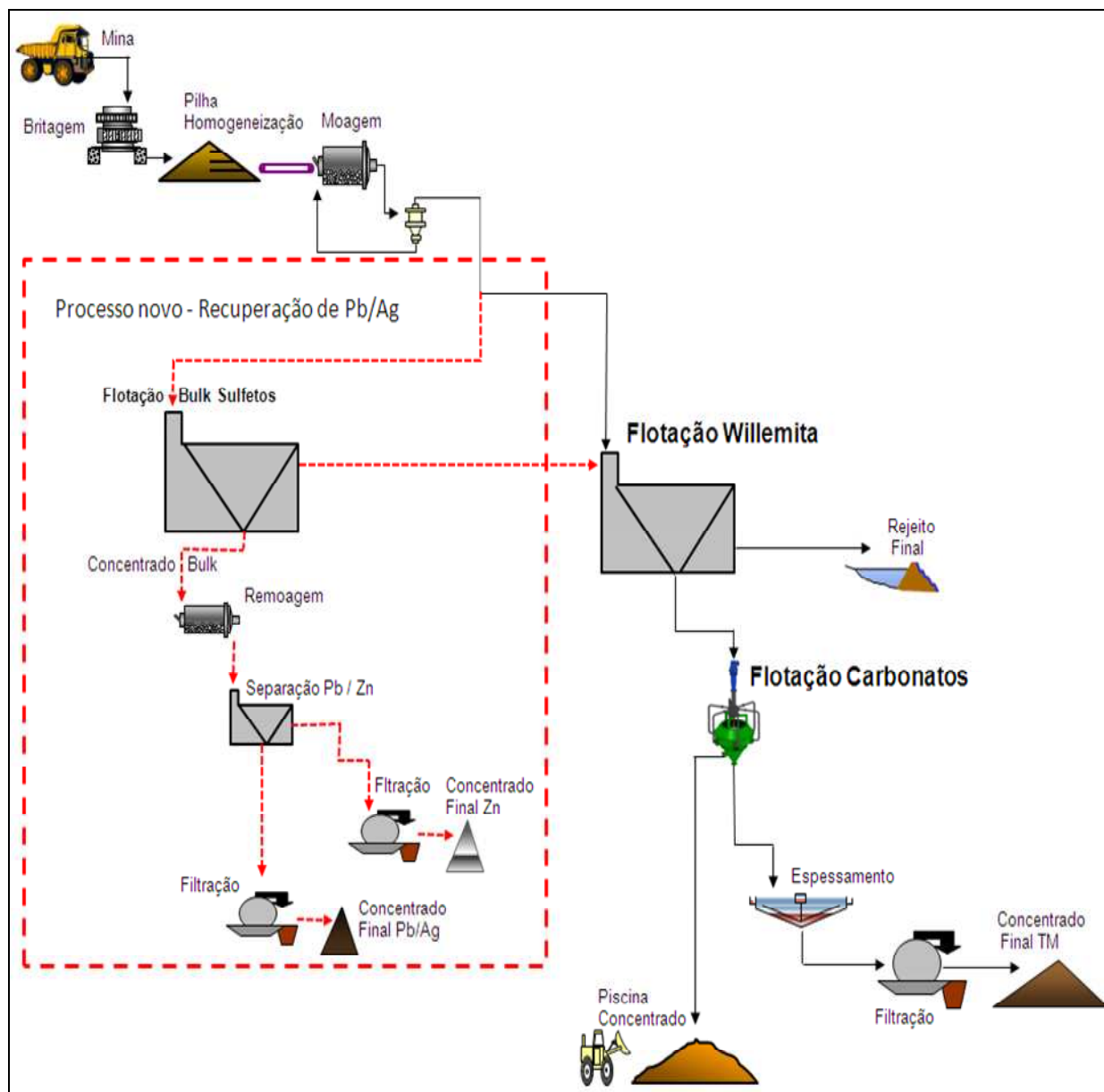
## **1.1 Importância da caracterização mineralógica e tecnológica para o tratamento de minérios**

A caracterização tecnológica de minérios é uma ferramenta de alta importância no aproveitamento de um recurso mineral. Em sua conceituação ampla, engloba a mineralogia aplicada e técnicas de caracterização que permitam a definição da associação mineral do minério, composição mineralógica quantitativa, formas de associações minerais, partição do elemento útil em suas várias fases minerais portadoras, granulometria de liberação dos minerais úteis, estado de alteração/substituição das espécies componentes e recobrimento superficial dos minerais úteis por variedades neoformadas (*e.g.* óxidos e hidróxidos de ferro), dentre outros. Todos esses fatores são de fundamental importância por terem influência diretamente no tratamento e beneficiamento do mineral industrial de interesse.

O consumo mundial de zinco vem se destacando de forma significativa, o que resultou em crescente produção na última década. Em termos de produção de zinco contido de concentrados, se todas as minas atuais estivessem operando em plena carga, o mundo estaria produzindo 13 milhões de toneladas. Mas o atual consumo em 2010 está em 11 milhões de toneladas de zinco contido (Deller, 2010). No Brasil, a Votorantim Metais S/A é responsável pela total produção de concentrados de silicato e em 2010 contabilizou uma produção de 165mil toneladas de zinco contido, sendo que existe uma previsão em aumentar a produção para 200 mil no ano de 2014 (Souza, 2011 – nota proveniente de Votorantim).

Em vista da importância da produção zincífera da região de Vazante para o cenário nacional, a aplicação das técnicas de caracterização tecnológica para o minério da Mina Extremo Norte, identificando as principais características dos minérios e gerando informações para previsibilidade e otimização dos processos da planta de beneficiamento e metalurgia torna-se de alta relevância.

Na Mina de Vazante, os principais tipos de minério apresentam predominância de willemita e de calamina (hemimorfita), sendo o último supérgeno. Os dois tipos de minério são extraídos e tratados em plantas de concentração por meio de processo de britagem, moagem e flotação, resultando em um concentrado silicatado com teores de zinco próximos a 45% com recuperação de 87% (Figura 1.1, Silva, 2006; Ferreira, 2008). Este último alimenta a planta hidrometalúrgica de Três Marias e juntamente com o concentrado sulfetado da Mina Morro Agudo, resultam na produção de lingote, ligas metálicas, óxido de zinco, ácido sulfúrico e matérias primas para a indústria de micronutrientes (Reis, 2001 *in* Silva, 2006).



**Figura 1.1. Fluxograma apresentando as etapas do processo de tratamento dos minérios da Mina de Vazante (Souza, 2011 – nota proveniente de Votorantim Metais)**

A concentração de minerais de zinco por meio de flotação basicamente envolve a afinidade ou não de determinados constituintes minerais pelos reagentes químicos adicionados durante o processo (Silva, 2006). Porém, é importante destacar que para um bom desempenho é necessário total controle de variáveis que podem interferir no processo, tais como, diversidade de minerais de ganga, teores do minério e presença de lama. Além disso, para uma operação eficiente, o mineral de minério deve apresentar-se liberado, ou seja, livre das partículas da ganga e para isso devem ser determinadas as frações granulométricas ótimas nas quais ocorre a liberação. A consequência de tal

fato é uma maior recuperação do elemento do mineral de interesse, no caso a willemita e/ou hemimorfita, sendo, portanto, importante a definição do grau de liberação do mineral de interesse e em quais frações granulométricas.

A quantidade elevada de hematita, argilominerais e dolomita em minérios de zinco podem prejudicar o processo devido à geração de finos (lama) e baixa liberação do mineral minério. Além disso, um dos maiores problemas relacionados ao tratamento de minério de zinco brasileiro é o fenômeno conhecido por *slime coating*, ou seja, recobrimento das partículas maiores pelos finos ou lamas, causados pela presença de lamas dolomíticas na polpa do minério (Silva, 2006). Esses finos alteram as características das superfícies das partículas causando elevação considerável no consumo de reagentes da flotação (Silva, 2006). Este efeito é bastante comum no minérios willemítico que ocorre próximo a zonas alteradas pela presença de água superficial que percola ao longo de fraturas de direção NW e em fendas na área da Mina de Vazante, assim como no minérios de calamina explorados em superfície.

A quantidade elevada de sulfetos, que ocorre em lentes associadas ao minério willemítico na mina subterrânea, também pode prejudicar a interação entre as partículas de silicato de zinco e reagentes, atingindo diretamente a recuperação do zinco a partir da willemita.

A dolomita, quando ocorre em excesso nos concentrados de zinco, pode ocasionar perdas nos processos de lixiviação ácida, realizada em Três Marias. Esta perda é decorrente da espumação excessiva ocasionada pela liberação de CO<sub>2</sub> de carbonatos, elevando o consumo de ácido, como também produção de solução com altos teores de magnésio, prejudiciais a eletrólise de zinco.

Adicionalmente, para alimentação da usina usa-se o *cut off* para zinco igual a 5%, ou seja, a partir deste teor de corte a operação da usina e lavra tornam-se economicamente viáveis. Portanto, a planta de beneficiamento deve apresentar teores limites e padrão granulométrico para alimentação. Em Vazante, em média, são usados os seguintes parâmetros químicos para alimentação da planta de tratamento do minério willemítico: 15% de Zn, até 10% de Fe, 0,40% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,20% de S, 15% de CaO e 17% de MgO. A granulometria utilizada para alimentação da flotação, na qual ocorre a liberação da willemita e/ou hemimorfita, concentra-se nas frações 150, 38 e -38mm (100#, retido em 400# e passante em -400#).

Com base nisso, esse estudo pretende caracterizar particularidades do minério de zinco da Mina Extremo Norte e compará-lo ao minério de Vazante visando à orientação do processo de beneficiamento.

## **1.2. Localização e vias de acesso**

A área de pesquisa localiza-se no município de Vazante, na porção noroeste do Estado de Minas Gerais, entre as cidades de Paracatu e Patos de Minas.

A área possui 187,97 ha e encontra-se localizada na fazenda denominada de Fazenda Reunidas Salobo. Situa-se a cerca de 9 km a nordeste do município de Vazante tendo como acesso principal a rodovia LMG-706 de interligação desta cidade com a BR-040.

Partindo de Campinas, a via de acesso utilizada é a Rodovia Anhanguera com sentido para Uberlândia. Até a cidade de Vazante, utilizam-se as rodovias MG-427, MG-199 e MG-188, respectivamente. O caminho usualmente realizado a partir de Belo Horizonte, da qual dista 500 km (Tabela 1), é feita pela BR-262 e rodovia estadual MG-050 (conhecida por Rodovia do Milho) em direção a Patos de Minas. A partir de Brasília o acesso é feito pela rodovia federal BR-040 em direção a Paracatu até o entroncamento com a rodovia estadual MG-188. Seguindo-se para sul até a cidade de Guarda Mor tem-se acesso à Vazante (Figura 1.2 e Tabela 1.1).

Paracatu, Vazante e Patos de Minas contam com aeroportos pavimentados, permitindo acesso por via aérea a aeronaves de pequeno a médio porte. Uberlândia conta com rotas das principais companhias aéreas nacionais, com conexões para a cidade de Patos de Minas e para as principais cidades do país.

## **1.3. Objetivos**

Esse estudo tem por objetivo contribuir para o detalhamento e caracterização do minério e tipo de mineralização da Mina Extremo Norte de Vazante. Tal caracterização poderá apoiar o planejamento da retirada e beneficiamento do minério de zinco e suas associações; a partir da:

- Contextualização geológica da área de estudo;
- Caracterização petrográfica/mineralógica e geoquímica do minério, bem como de suas rochas hospedeiras e identificação de fases minerais que contêm zinco e suas associações;
- Determinação das tipologias e estilos da mineralização e suas características tecnológicas.

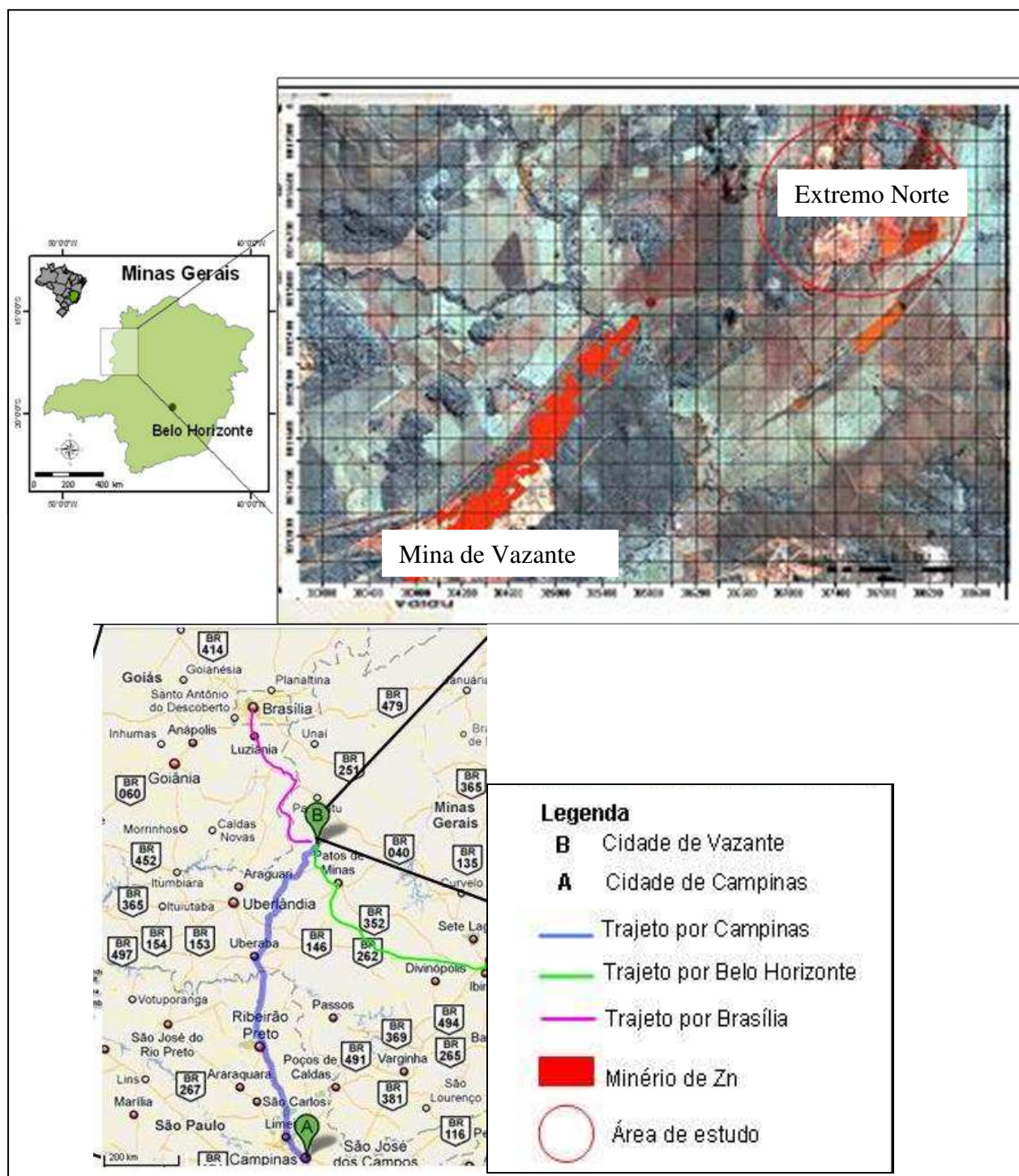


Figura 1.2. Localização e via de acessos à cidade de Vazante e à área de estudo.

Tabela 1.1. Distância do município de Vazante dos centros regionais

| Município      | Rodovia       | Distância de Vazante (km) |
|----------------|---------------|---------------------------|
| Brasília       | BR-040        | 355                       |
| Belo Horizonte | BR-262/MG-050 | 500                       |
| Paracatu       | MG-188        | 110                       |
| Patos de Minas | MG-354        | 110                       |
| Uberlândia     | MG-188        | 295                       |

## **1.4. Métodos**

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, o estudo foi iniciado com trabalhos de campo, com ênfase na análise estrutural da jazida do Extremo Norte, onde foram levantadas medidas de estruturas e identificados os tipos litológicos hospedeiros das mineralizações, além de amostragens precedidas da redescrição de testemunhos de sondagem. As etapas seguintes consistiram em levantamento de dados em laboratório, incluindo petrografia, litoquímica e caracterização tecnológica do minério. A revisão bibliográfica foi realizada durante a execução de todo trabalho. A seguir serão descrito detalhadamente os métodos utilizados

### ***1.4.1. Revisão bibliográfica***

A revisão da literatura realizada durante a execução de todo o estudo teve ênfase em artigos científicos e teses, bem como relatórios técnicos, seções e mapas geológicos da Votorantim Metais Zinco S.A.. Estes tratam de textos sobre contextualização geológica regional e técnicas de caracterização tecnológica de minérios, incluindo etapas analíticas e análise de imagens.

Adicionalmente, foram compilados estudos de caracterização mineralógica, anteriormente realizados para o minério de Vazante, visando à obtenção de informações que permitam melhor representatividade na escolha das amostras para caracterização mineralógica e tecnológica.

#### ***1.4.2. Trabalhos de Campo e Amostragem***

Os trabalhos de campo foram realizados em duas etapas: uma no início do estudo para reconhecimento da área e outra, de maior duração, para detalhamento do contexto geológico, com levantamento de medidas estruturais e amostragem.

No trabalho de detalhamento, foram levantados 21 pontos, os quais se encontram distribuídos por toda área, representada por 187,88 ha. A partir das descrições destes pontos foi possível a correlação com a estratigrafia e geologia estrutural da região, identificando as particularidades do local de estudo.

A amostragem do minério e das rochas hospedeiras, principalmente próximas ao contato com a mineralização, foi realizada durante o trabalho de campo e redescrição dos testemunhos de sondagem da região. Esta última foi muito importante para o estudo, pois são raros os afloramentos dos corpos mineralizados.

Ao todo foram coletadas 44 amostras representativas, englobando amostras de afloramento e testemunhos de sondagem. Essas amostras foram descritas macroscopicamente e encaminhadas para lâminação, ensaios de tecnologia e litoquímica. A distribuição destas amostras e os pontos levantados na área de trabalho podem ser visualizados nas figuras 1.3 e 1.4, respectivamente.

As medidas adquiridas em campo foram analisadas no *software* Dip v.5.1 e StereoNet v.3.03.

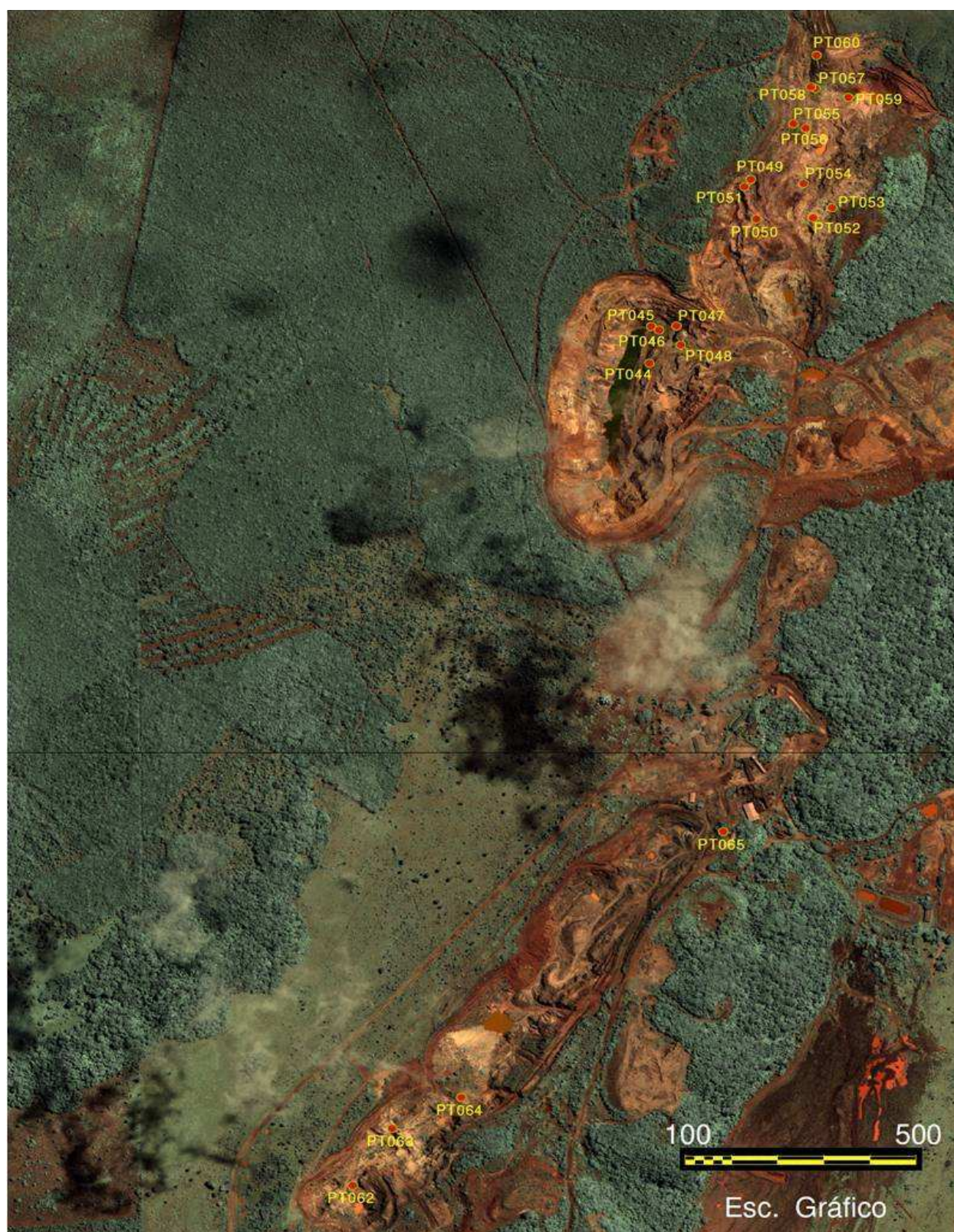


Figura 1.3. Imagem aérea (*Quickbird*, 2004) com distribuição dos pontos levantados na área da Mina Extremo Norte para caracterização geológica.



Figura 1.4. Imagem aérea (*Quickbird*, 2004) com distribuição das amostras da Mina Extremo Norte selecionadas para as etapas analíticas.

### 1.4.3. Ensaios em laboratório

A etapa laboratorial incluiu descrição petrográfica das amostras, análises químicas, avaliação em microscópio eletrônico de varredura e ensaios tecnológicos. A sequência das etapas em laboratório pode ser verificada no fluxograma (Figura 1.5).

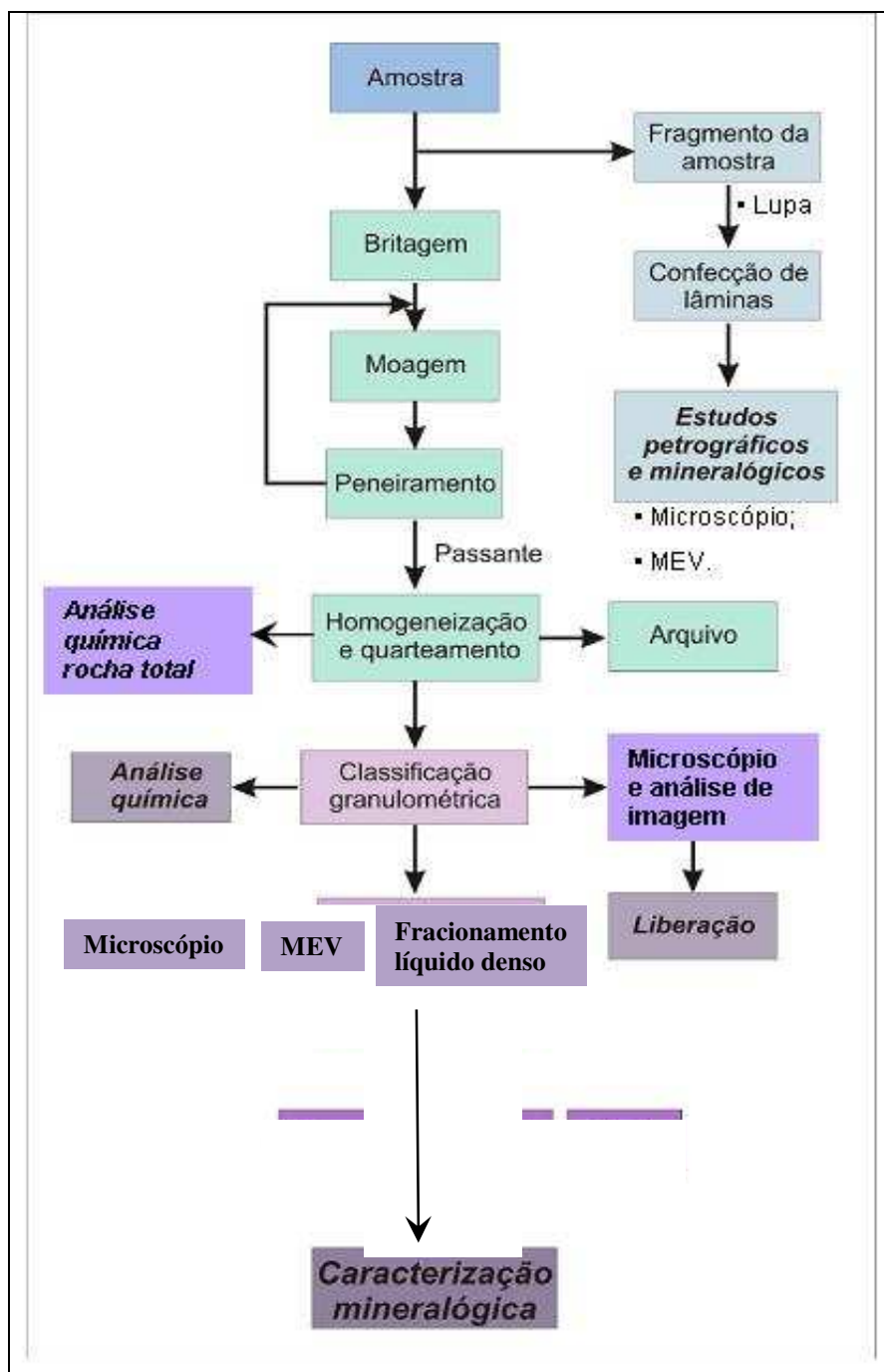


Figura 1.5. Fluxograma de trabalho em laboratório (modificado de Neuman *et al.* 2004)

#### **1.4.3.1. Caracterização petrográfica**

Para análise petrográfica, foram realizadas 44 lâminas delgadas-polidas das unidades hospedeiras e rochas mineralizadas, no laboratório de laminação do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE - UNESP - Rio Claro.

Para caracterização das amostras, utilizou-se microscópio Leica DM EP com câmera digital acoplada a computador com *software* de aquisição e análise de imagem Leica QWin, do Laboratório de Microtermometria da UNICAMP. As lâminas foram descritas detalhadamente em luz transmitida e refletida visando à identificação dos minerais transparentes e opacos, suas relações texturais e microestruturais e consequente classificação da rocha. Além disso, para determinação da quantificação das fases minerais nas amostras foi realizada análise modal.

A análise petrográfica resultou na classificação dos tipos de minérios distintos textural e mineralogicamente presentes no depósito. A partir desta, identificou-se as amostras que melhor representavam cada tipo, que foram encaminhadas para testes tecnológicos (teste granulométrico, químicos e de liberação do mineral de interesse).

#### **1.4.3.2. Análise geoquímica**

Alíquotas de amostras que também foram enviadas para análise petrográfica foram encaminhadas para análise química.

Os fragmentos de testemunho de sondagem e amostras de afloramento provenientes do trabalho de campo foram preparados no laboratório de preparação da Votorantim Metais Zinco. As amostras foram britadas com britador de mandíbulas a *top size* de 48 mm, quarteadas, sendo uma alíquota arquivada e novamente britada a 1.8mm e em seguida pulverizada em moinhos de panelas a uma fração passante em 200#. Essas amostras foram encaminhadas para o laboratório ACME Labs, em Goiânia - GO, onde foram reclassificadas, reembaladas e enviadas para análise na unidade do ACME Labs. em Vancouver, Canadá.

Para determinação dos elementos maiores e traços, utilizou-se a abertura das amostras com digestão a quente em solução aquosa contendo HF, HCL04 e HNO3, pois trata-se de material silicatado. A leitura foi realizada através da combinação entre ICP-MS – *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* e ICP-ES – *Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry*, que representam técnicas analíticas multielementares, pelas quais podem ser determinadas entre 30-60 elementos, com limites de quantificação da ordem de ng g-1, com excelentes precisão e exatidão. Na

Tabela 1.2, podem ser verificados os elemento analisados e os limites de detecção fornecidos pelo laboratório.

**Tabela 1.2. Elementos analisados em ICP-MS/ICP-ES e limite de detecção**

| Elemento | Limite de Detecção | Elemento | Limite de Detecção | Elemento | Limite de Detecção |
|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|
| Ag (ppm) | 0,5                | U (ppm)  | 0,5                | Cu (ppm) | 0,5                |
| Al (%)   | 0,01               | V (ppm)  | 10                 | Na (%)   | 0,01               |
| As (ppm) | 5                  | W (ppm)  | 0,5                | Nb (ppm) | 0,5                |
| Ba (ppm) | 5                  | Y (ppm)  | 0,5                | Ni (ppm) | 0,5                |
| Be (ppm) | 5                  | Fe (%)   | 0,01               | P (%)    | 0,01               |
| S (%)    | 0,05               | Hf (ppm) | 0,5                | Pb (ppm) | 0,5                |
| Sb (ppm) | 0,5                | K (%)    | 0,01               | Ce (ppm) | 5                  |
| Sc (ppm) | 1                  | La (ppm) | 0,5                | Co (ppm) | 1                  |
| Sn (ppm) | 0,5                | Zn (ppm) | 5                  | Cr (ppm) | 1                  |
| Sr (ppm) | 5                  | Zr (ppm) | 0,5                | Th (ppm) | 0,5                |
| Ta (ppm) | 0,5                | Li (ppm) | 0,5                | Ti (%)   | 0,001              |
| Bi (ppm) | 0,5                | Mg (%)   | 0,01               | Mn (ppm) | 5                  |
| Ca (%)   | 0,01               | Cd (ppm) | 0,5                | Mo (ppm) | 0,5                |
| Rb (ppm) | 0,5                |          |                    |          |                    |

Além da análise por ICP, utilizou-se também a técnica *fire assay* para quantificação de Au e Ag, análises específicas para Ge. As amostras que apresentaram teores de Zn maiores que 400000 ppm foram submetidas a ICP-ES. Para abertura das amostras nos ensaios de *fire assay*, foi utilizado digestão de fluxos personalizados; enquanto que para os testes de Ge usou-se HF e Água Régia. Abaixo segue a Tabela 1.3, que apresenta o limite de detecção dos testes supracitados.

**Tabela 1.3. Elementos analisados por *fire assay*, e ICP-ES e limite de detecção**

| Elemento | Limite de Detecção | Elemento | Limite de Detecção |
|----------|--------------------|----------|--------------------|
| Au (g/t) | 0,01               | Ge (%)   | 0,01               |
| Ag (g/t) | 5                  | Zn (%)   | 0,01               |

As análises químicas dos testes granulométricos foram realizadas com a mesma metodologia descrita acima, porém por fração granulométrica das amostras selecionadas.

Os resultados das análises de rocha total foram analisados com o auxílio dos *softwares* Minpet v.2.02 e Minitab 14 para exame dos dados e entendimento do comportamento geoquímico da área em estudo.

#### 1.4.3.3. Microscópio eletrônico de varredura

Os elementos de interesse, componentes dos minerais determinados na petrografia e provenientes dos ensaios tecnológicos, foram também avaliados por microscopia eletrônica de varredura (MEV- LEO 430i) com microanálise por dispersão de energia (EDS) na UNICAMP e microsonda eletrônica (EDS e WDS – JEOL JXA 890RL) na UFMG. Os objetivos principais foram a definição de fases não identificadas com o uso de microscópio ótico e possível diferenciação química na estrutura dos minerais. As interações entre os elétrons e as amostras são divididas em duas classes: espalhamentos elásticos (geração dos elétrons retroespalhados - BSE) e não elásticos (geração de elétrons secundários, elétrons Auger, raios X e catodoluminescência) (Figura 1.6).

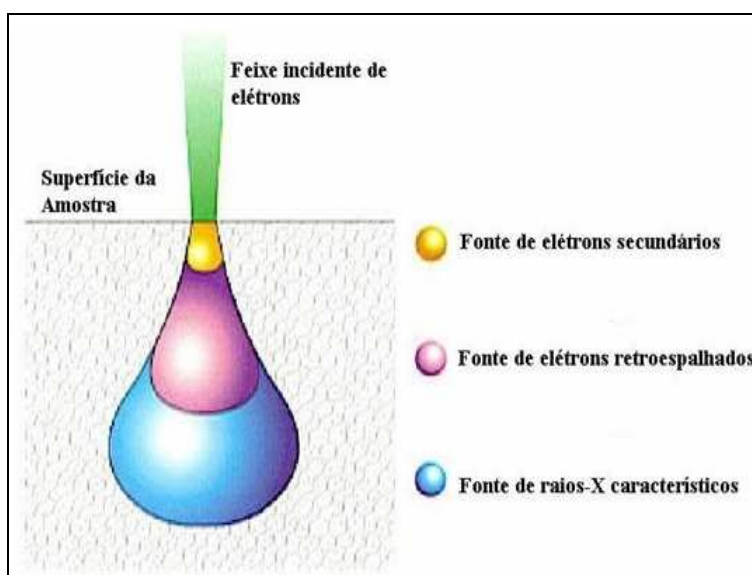


Figura 1.6. Esquema da interação de feixe de elétrons na amostra (modificado de Goldstein *et al.*, 1992)

O elevado peso atômico médio dos metais e suas ligas contrastam com o de outras fases, permitindo sua localização em imagens de elétrons retroespalhados (BSE), mesmo quando presentes em teores reduzidos. A partir destas imagens, é possível a detecção de pontos de interesse através de métodos de microanálise como EDS, com o qual é possível discriminação de todo espectro de energia através de um detector de estado sólido de Si (Li) ou Ge; e por WDS, que contém cristais analisadores empregados para discriminação de raios X segundo o comprimento de onda da radiação.

Seis lâminas delgadas-polidas que representam os diferentes tipos de minério com variações nos teores de Zn (baixo, médio e alto), foram avaliadas no Laboratório de Microanálise do

Departamento de Física da UFMG; enquanto as lâminas de grão foram analisadas no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Geociências da UNICAMP. Para realização do procedimento de aquisição de imagem e microanálise, as lâminas foram recobertas com camada de carbono.

#### **1.4.3.4. Ensaios tecnológicos**

Partindo dos tipos de minérios encontrados na Mina Extremo Norte de Vazante, definidos principalmente pelos aspectos petrográficos e químicos, foi possível realização dos testes tecnológicos. Estes se dividiram em classificação granulométrica, fracionamento da amostra, lâminação das frações, determinação do grau de liberação do mineral de interesse e caracterização granoloquímico-mineralógica das frações.

As amostras analisadas se referem ao arquivo britado descrito no item 1.4.3.2 (análise geoquímica) sendo representadas pelas seguintes amostras selecionadas: MASA115 e MASA124, sendo que a primeira representa amostras de minério willemítico com maior teor de Fe e a segunda com teores mais baixos de Fe.

##### **A) Classificação granulométrica**

Os ensaios de classificação foram realizados no laboratório de preparação de amostras da planta piloto da Votorantim Metais Zinco – Unidade Vazante. Para o teste, utilizadas as alíquotas britadas com britador de mandíbulas a *top size* de 48 mm, com peso em torno de 2 a 3 kg, referentes às amostras selecionadas para os ensaios.

O ensaio foi executado com peneiras, com abertura variando entre 100# a 400# (Tabela 1.4). Além disso, utilizou-se balança de precisão, quarteador *Jonis* e estufa.

O peneiramento foi realizado a úmido, sendo que em seguida, as frações foram secadas na estufa a até 100°C e pesadas. Estas alíquotas foram divididas em três e encaminhadas para o fracionamento por líquido denso e laminação no Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE - UNESP – Rio Claro e análise química no Acme Labs.

As análises químicas por fração foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos em 1.5.3.2, porém os elementos analisados foram apenas Zn, Ag, Cd, Cu, Pb, Ca, Fe e Mg. Tal decisão se deve ao fato de que estes elementos são os que mais influenciam os processos de beneficiamento e lavra como descrita no item 1.1. A caracterização mineralógica foi feita de acordo com o item 1.3.1, visando à relação de contato entre o mineral minério e ganga nos grãos.

A visualização dos resultados provenientes da classificação granulométrica foi disponibilizada em tabelas e em curvas acumuladas de distribuição e frequência definida por *Gaudin-Schuhmann* (1939).

**Tabela 1.4. Variação com número de abertura da peneira em *mesh*, *in natura* e mm (Silva, 1989)**

| Mesh (peneira) | Abertura in | Abertura mm | Mesh (peneira) | Abertura in | Abertura mm |
|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| 1              | 1,00        | 25,4        | 18             | 0,0394      | 1,00        |
| 7/8            | 0,875       | 22,6        | 20             | 0,0331      | 0,841       |
| 3/4            | 0,750       | 19,0        | 25             | 0,0278      | 0,707       |
| 5/8            | 0,625       | 16,0        | 30             | 0,0234      | 0,595       |
| 0,530          | 0,530       | 13,5        | 35             | 0,0197      | 0,500       |
| 1/2            | 0,500       | 12,7        | 40             | 0,0165      | 0,420       |
| 7/16           | 0,438       | 11,2        | 45             | 0,0139      | 0,354       |
| 3/8            | 0,375       | 9,51        | 50             | 0,0117      | 0,297       |
| 5/16           | 0,312       | 8,00        | 60             | 0,0098      | 0,250       |
| 0,265          | 0,265       | 6,73        | 70             | 0,0083      | 0,210       |
| 1/4            | 0,250       | 6,35        | 80             | 0,0070      | 0,177       |
| 3 1/2          | 0,223       | 5,66        | 100            | 0,0059      | 0,149       |
| 4              | 0,187       | 4,76        | 120            | 0,0049      | 0,125       |
| 5              | 0,157       | 4,00        | 140            | 0,0041      | 0,105       |
| 6              | 0,132       | 3,36        | 170            | 0,0035      | 0,088       |
| 7              | 0,111       | 2,83        | 200            | 0,0029      | 0,074       |
| 8              | 0,0937      | 2,38        | 230            | 0,0025      | 0,063       |
| 10             | 0,0787      | 2,00        | 270            | 0,0021      | 0,053       |
| 12             | 0,0661      | 1,68        | 325            | 0,0017      | 0,044       |
| 14             | 0,0555      | 1,41        | 400            | 0,0015      | 0,037       |
| 16             | 0,0469      | 1,19        |                |             |             |

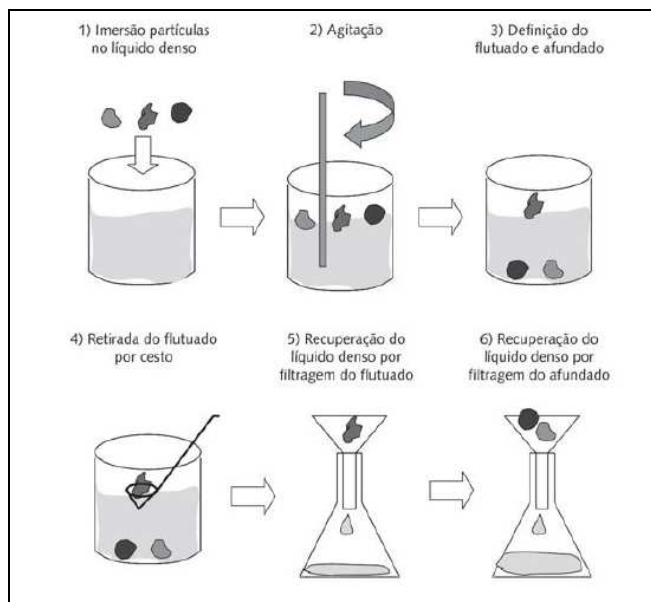
## B) Fracionamento

O fracionamento foi realizado com bromofórmio líquido ( $\text{CHBr}_3$ ) que apresenta densidade igual a  $2,89 \text{ g/cm}^3$ , a  $25^\circ\text{C}$ . A partir deste teste, foi possível fazer a separação dos minerais da ganga daqueles de interesse econômico, verificando a partição destes em líquido denso.

A separação foi realizada no laboratório químico da Votorantim Metais – Unidade Vazante e para tal utilizou-se béquer de 250 ml, balança de precisão, estufa, álcool etílico, filtro de papel e agitador.

As partículas, quando imersas em béquer, na solução com densidade conhecida (bromofórmio) são agitadas levemente com bastão, definindo o flutuado e o afundado (Figura 1.7). Após essa definição visual, o flutuado é retirado e filtrado em filtro de papel. Para o afundado, o líquido denso

é separado em outro béquer, sendo a fração de líquido remanescente filtrada, seguindo o mesmo procedimento. Após a remoção do excesso de líquido denso, o flutuado e o afundado são lavados com solventes (álcool etílico para solução de bromofórmio), para evitar a contaminação das amostras pelos líquidos densos e secos em estufa a 100 °C.



**Figura 1.7. Desenho esquemático que ilustra separação por líquidos densos (modificado de Silva, 1989)**

Após separação as frações afundadas e flutuadas foram pesadas.

Os resultados foram inseridos em tabelas e em gráficos definidos por curvas de separabilidade do flutuado e afundado.

#### **D) Grau de liberação**

O grau de liberação pode ser definido como a proporção de mineral útil em partículas individualizadas, susceptíveis à concentração por processos de separação física.

Reconhece-se, de maneira geral, a existência de quatro tipos básicos de partículas mistas (*Wills*, 1988). O tipo I mostra espécies mineralógicas justapostas havendo uma superfície de contato entre as mesmas. Sua forma indica que o material pode ter uma textura granular em que o tamanho dos grãos é maior que o desta partícula. A inclusão de uma espécie em outra, através de uma estrutura vesicular, é vista no tipo II. A liberação dos constituintes é mais fácil neste caso quando comparada ao tipo I. No tipo III, há o envolvimento de umas das espécies sobre outra. A fragmentação posterior da partícula pode aumentar o grau de liberação, mas haverá um número significativo de partículas que exigirão uma redução em seu tamanho. A disseminação de uma espécie na outra é a principal

característica do tipo IV (Figura 1.8). A liberação destas partículas é normalmente inviável já que seria necessário fragmentar excessivamente o material, impossibilitando sua concentração por métodos físicos ou físico-químicos.

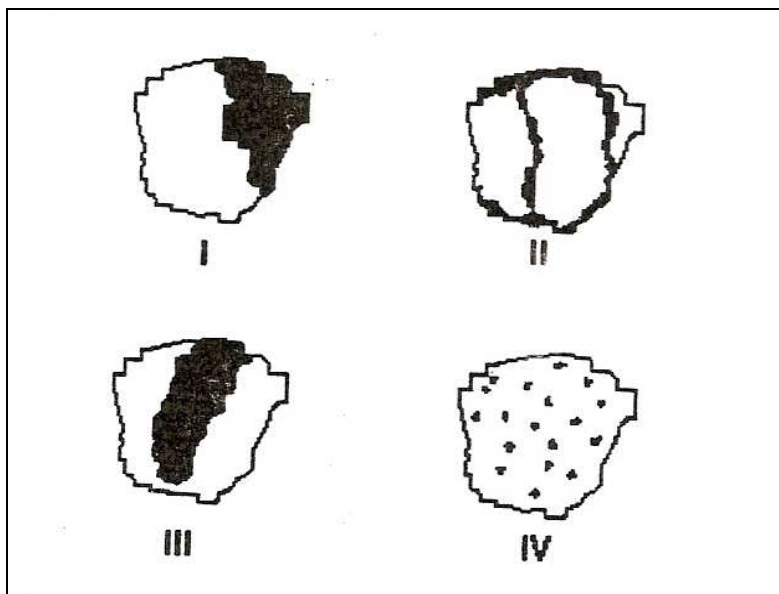


Figura 1.8. Tipos de partículas mistas: I. Espécies mineralógicas justapostas; II. Inclusão de uma fase mineral em outra; III. Envolvimento de uma fase mineral por outra; IV. Fase mineral disseminada em outra (modificado de Wills, 1988).

A equação que quantifica o grau de liberação (Gaudin, 1939) pode ser definida por:

$$GL = \frac{\text{mineral útil livre}}{\text{total de mineral útil}} \times 100\%$$

A definição da liberação da willemita (mineral útil), foi realizada a partir de observações sistemáticas ao microscópio ótico Leica DM EP com câmera digital acoplada a computador com *software* de aquisição e análise de imagem Leica QWin, do Laboratório de Microtermometria da UNICAMP e ao microscópio Leica com câmera digital acoplada a computador com *software* Leica QWin do laboratório de caracterização mineralógica do CETEC –MG. O estudo foi realizado a partir de contagem de classes de grãos livres e mistos por fração granulométrica das lâminas das amostras ensaiadas. Os grãos mistos, por sua vez, foram subdivididos em subclasses, em função das proporções relativas do mineral útil presente.

Os resultados foram disponibilizados em gráficos e tabelas mostrando curvas de liberação do mineral de interesse.

### E) Teste de Densidade

Análises de densidade nos testemunhos de sondagem foram realizados antes destes serem encaminhados para lâminação, análise química e tecnológica. Os ensaios foram realizados no galpão de sondagem da Votorantim Metais – Unidade Vazante.

Para medição da densidade foram utilizados 3 provetas de 2 litros cada (marca NALGON), com graduação de 20 ml; 1 balança de precisão (marca TOLEDO) com precisão de 0,001 kg; 2 tubos de PVC, um com capacidade total de 4 litros (2 litros até a torneira) e outro com capacidade total de 6 litros (4 litros até a torneira) e balde plástico;

O procedimento para o cálculo de densidade feita pela técnica do volume deslocado consistiu de três etapas (Figura 1.9):

- Pesagem da amostra de testemunho (obtenção da massa);
- Verificação e obtenção do volume de água deslocado;
- Cálculo de densidade relativa através da seguinte fórmula:

$$d = m/v$$

Onde  $m$  é a massa da amostra obtida e  $v$  é o volume deslocado pela amostra.

Após a coleta das amostras, estas foram pesadas na balança eletrônica de precisão, e suas respectivas massas foram anotadas em uma planilha.



**Figura 1.9. Etapas do teste de densidade. A) Abastecimento do tubo de PVC com água. B) Pesagem da amostras. C) Leitura do volume deslocado pelo testemunho (Votorantim Metais, 2008).**

Para determinação do volume correspondente, encheu-se o tubo com água até um pouco acima do nível da torneira; colocou-se um balde embaixo da torneira para tirar o excesso de água e foi aberta a torneira para a água ficar no nível. Foi colocada a amostra no tubo, e foi verificado se a mesma ficou abaixo da torneira, pois a amostra deve ficar toda submersa na água, aguardando um período de 2 min para a estabilização do nível, sendo feito posteriormente a leitura do volume de água da proveta, e anotada em planilha.

## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Principais classes de depósitos de Pb-Zn**

#### **Depósitos do tipo Mississippi Valley – MVT**

Os depósitos do tipo *Mississippi Valley* (MVT) são caracterizados por corpos mineralizados de pequenas dimensões, com teores combinados de Zn+Pb que raramente ultrapassam 10%, hospedados em rochas dolomíticas, de idade preferencialmente Cambriana a Triássica (Leach & Sangster, 1993).

A mineralogia é simples sendo definida basicamente por galena, esfalerita, marcassita, pirita, dolomita, calcita e quartzo.

O controle estrutural geralmente associa-se com falhas que promovem a circulação de fluidos hidrotermais, ricos em enxofre e metais, com temperatura estimada a partir de inclusões fluidas de 70 °C a 200 °C (Leach & Sangster, 1993). A água do mar e a maturação de matéria orgânica representam para essa classe de depósitos a principal fonte de enxofre presente nesses fluidos.

O processo mineralizante consiste principalmente no preenchimento de espaços vazios em brechas carbonáticas, produzidas por dissolução e colapso (Ohle, 1959; 1980; 1985; Rouvier; 1971; Sangster, 1988; Lazinicka; 1988; Tschauder *et al.*, 1990a, b; Qing & Moutnjoy, 1994; Leach & Sangster, 1993; Martin *et al.*, 1995).

#### **Depósitos de Pb-Zn do tipo SEDEX**

Os depósitos SEDEX são caracterizados por corpos estratiformes e maciços constituídos por sulfeto de zinco e chumbo, com formas lenticulares a tabulares, e com pouca continuidade lateral, originados por fontes exalativas submarinas (Sato, 1977; Hodgson & Lydon, 1977; Klaus & Large, 1980, Large, 1980; Russell *et al.*, 1981). Estão associados exclusivamente a rochas sedimentares, com alta concentração de matéria orgânica e pirita, o que evidencia deposição em ambiente de baixa energia.

Os depósitos SEDEX datam preferencialmente do Proterozóico e do Paleozóico inferior, e estão associados ao rifteamento de bacias com passagem de fluidos metalíferos, em condições euxínicas (Goodfellow, 1993). A formação deste tipo de depósito exige uma grande descarga de fluidos

hidrotermais metalíferos, que de acordo com as informações obtidas através dos isótopos de Pb, Sr, H e O, possuem origem crustal siálica.

### **Depósitos do tipo IRISH**

Os depósitos do tipo IRISH são definidos por corpos mineralizados *stratabound*, na forma de lentes e/ou *pod*s, alojados em sequências carbonáticas transgressivas carboníferas, que ocorrem na Irlanda. São associados à falhas normais, fraturas de extensão, falhas secundária, e zonas de brecha, que controlam a distribuição dos sulfetos.

Os minerais de minério são essencialmente representados por esfalerita e galena, porém em alguns depósitos é possível a ocorrência de sulfetos de ferro em quantidades expressivas. A ganga é constituída por carbonatos e quartzo.

A origem destes depósitos não é consensual. Alguns autores defendem uma origem singenética a sin-diagenética para a mineralização (Coomer & Robinson, 1976, Taylor, 1984; Samson & Ridell, 1987), enquanto outros consideram que estes depósitos são epigenéticos, devido à falta de oxidação de sulfetos e ausência de mudanças ambientais, que deveriam ser esperada se os fluidos quentes e mineralizante chegassem ao assoalho oceânico (Hitzman, 1995).

Os estudos das inclusões fluidas sugerem que estes depósitos resultam da mistura de dois fluidos com temperaturas de aproximadamente 250 °C, sendo um proveniente da circulação profunda da água do mar, possibilitando a extração de metais base do embasamento e outro altamente salino, originado em pequenas bacias fechadas com presença de evaporitos controladas por falha (Samson & Russell, 1987; Banks & Russell, 1992).

### **Depósitos de Zinco Não-Sulfetado**

Os depósitos de zinco não-sulfetados foram definidos por Hitzman *et al.* (2003), como supérgenos e hipógenos. O modelo genético para os depósitos supérgenos propõe que a oxidação dos minerais sulfetados primários (*e.g.* esfalerita, pirita, galena) e consequente formação de águas ácidas, levaria o zinco a se estabilizar na forma de silicatos, carbonatos ou óxidos na mesma posição do minério primário, ou sofrer transporte químico pela percolação do fluido ácido. Em contrapartida, os depósitos hipógenos seriam hidrotermais, constituídos essencialmente por silicatos de zinco e óxidos, com forte controle estrutural.

Em Vazante, porém, a associação sulfetada na zona mineralizada (esfalerita + galena) é irregular e subordinada, bem como a presença de folhelhos carbonosos. Existem registros, todavia, da presença de águas levemente ácidas ou até ácidas, em profundidade.

Autores como Hitzman (2003) e Silva *et al.* (2006) consideram que o complexo sistema de alteração supergênica, transporte e deposição em uma dinâmica cárstica teriam sido os responsáveis pela ocorrência da mineralização supergênica de calamina na área de Vazante. Estes depósitos são irregulares e apresentam diversas geometrias, mineralogias e teores distintos.

### **Depósito tipo Vazante**

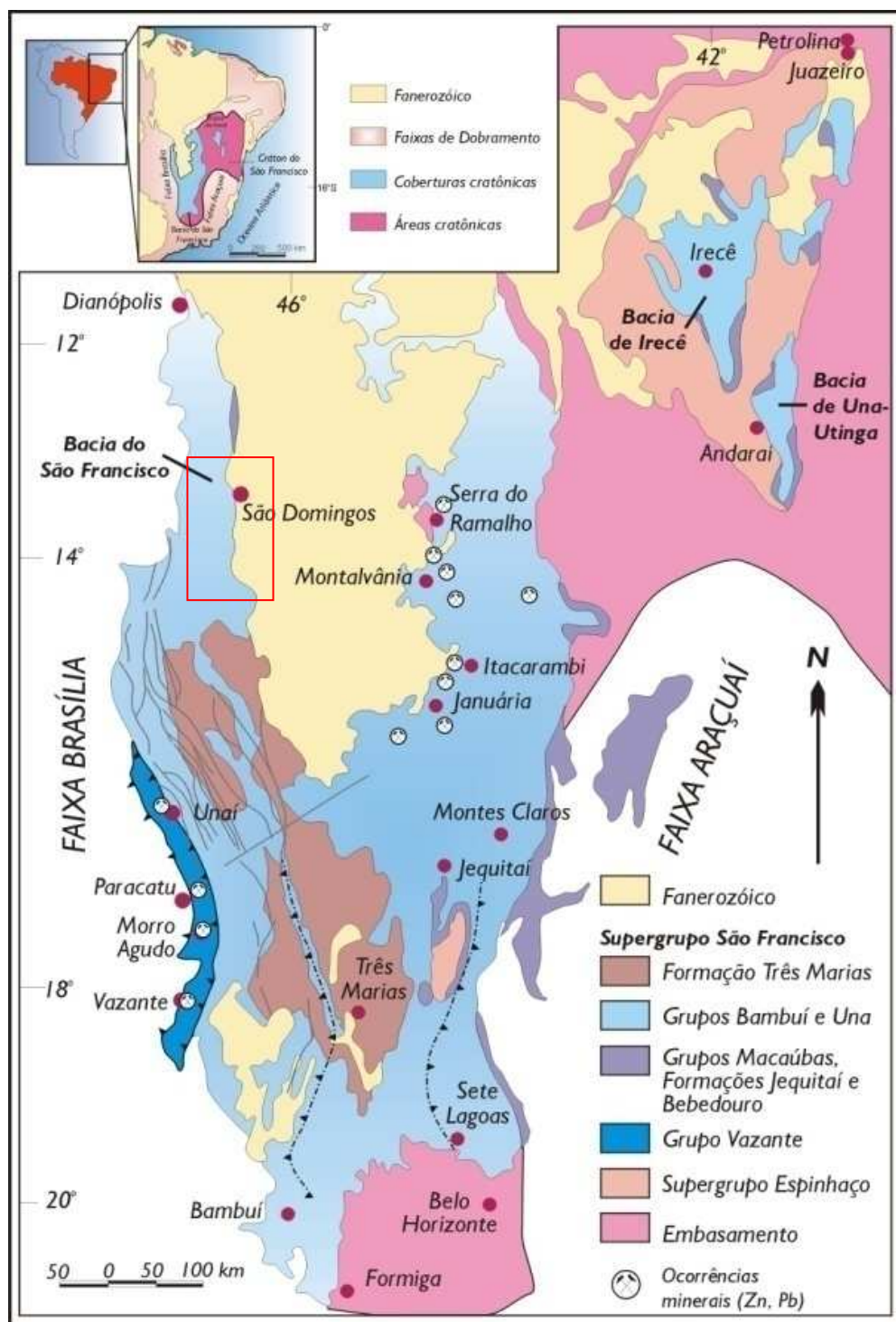
Este tipo de depósito foi definido por Monteiro (2002) para caracterizar o depósito de zinco da região de Vazante devido às peculiaridades encontradas neste depósito. Segundo Hitzman *et al.* (2003) seria Vazante o principal exemplo de depósito de zinco não sulfetado hipógeno conhecido. Monteiro (2002) faz uma ressalva de que o depósito de Vazante possui várias características que se encaixam nos modelos já existentes, como por exemplo, o fato da mineralização estar hospedada em rochas carbonáticas, principalmente metadolomíticas, controle estrutural, deposição do minério associada à mistura de fluidos e a temperatura dos fluidos mineralizantes que seria compatível com a temperatura dos modelos de depósitos de zinco hidrotermais já existentes.

A partir do estudo, a autora demonstra que a mineralização willemítica da Mina de Vazante foi gerada pela mistura de fluidos, envolvendo fluidos metalíferos quentes com baixo conteúdo de enxofre reduzido e com temperatura em torno de 250°C com fluidos meteóricos ao longo da Zona de Falha de Vazante.

## **2.2. Contexto Geológico Regional**

Os depósitos minerais do distrito zincífero de Vazante-Paracatu (Figura 2.1) são hospedados pelo Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998), que representa uma das unidades metassedimentares do segmento sul da Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967) inseridas em um complexo sistema de *nappes* e falhas de empurrão com vergência para o Cráton do São Francisco.

O Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998) é constituído por uma espessa sequência marinha pelítico-carbonática aflorante em uma faixa N-S de aproximadamente 200 km, em contato tectônico com os grupos Canastra, a oeste, e Bambuí, a leste (Figura 10).



A seguir serão discutidos o contexto geotectônico ao qual o Grupo Vazante está inserido, bem como, sua estratigrafia, evolução estrutural e depósitos de Pb-Zn hospedadas neste grupo.

### 2.2.1. Contexto geotectônico

A Província Tocantins (Almeida *et al.*, 1977) representa um sistema orogênico situado entre o Cráton do São Francisco, o Cráton Amazônico e um possível terceiro bloco coberto pela Bacia do Paraná e amalgamados por três grandes faixas orogênicas de evolução diacrônica: as faixas Paraguaia e Araguaia, que bordejam o Cráton Amazônico, e a Faixa Brasília que bordeja o Cráton do São Francisco (Figura 2.2). As faixas apresentam vergências opostas e transporte tectônico em direção aos seus respectivos crátons.

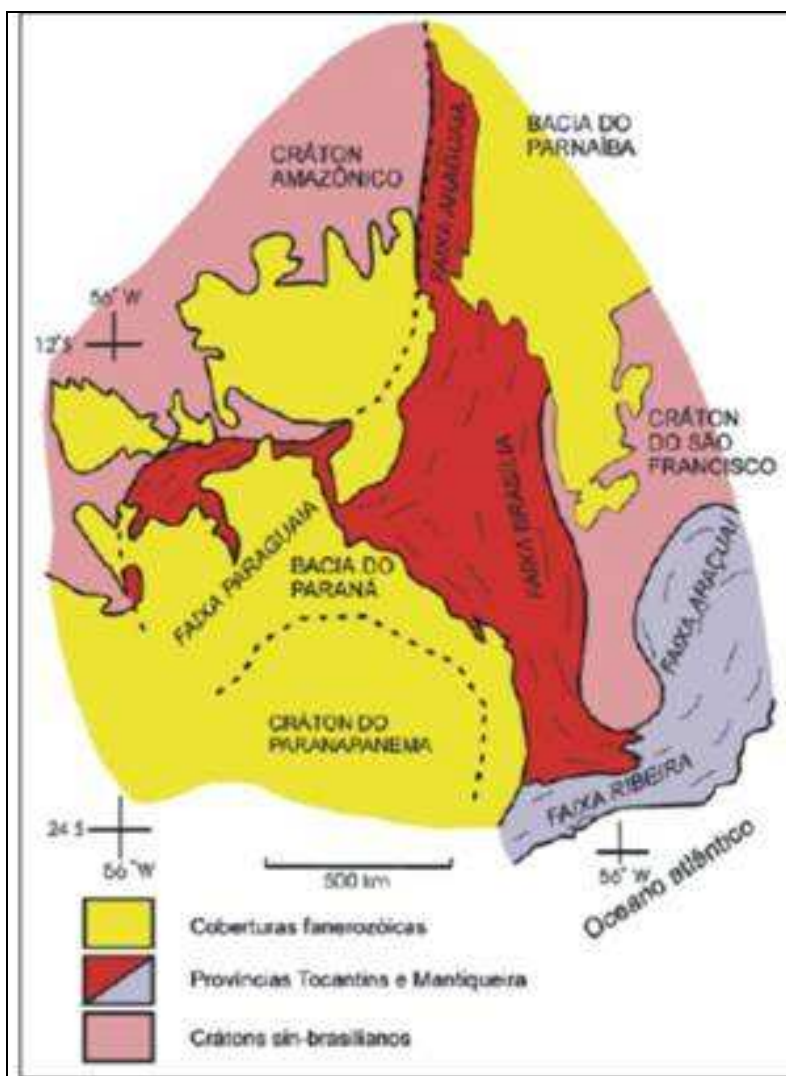


Figura 2.2: Representação esquemática da Província Tocantins com suas respectivas fixas móveis e crátons (Valeriano *et al.* 2004)

Dentre as faixas marginais ao Cráton do São Francisco, destaca-se a Faixa Brasília que se estende desde o sul do Estado de Minas Gerais até o norte do Estado do Tocantins (Figura 2.2). Esta

faixa é segmentada em duas porções: uma ao norte com direção NE-SW (Faixa Brasília Setentrional) e outra a sul, estruturada com direção NW-SE (Faixa Brasília Meridional). Esses dois ramos se encontram próximo ao paralelo de Brasília formando a megaflexura dos Pirineus (Costa & Angeiras, 1971 *in* Valeriano et al. 2004), marcada por lineamentos de orientação E-W.

A reconstituição paleogeográfica da Faixa Brasília indica uma evolução complexa de uma bacia de margem passiva com geração de crosta oceânica e, posteriormente, subducção da placa oceânica e formação de arco magmático (Arco Magmático de Goiás). Após o fechamento da bacia, formaram-se os terrenos acrescionários devido à colisão desses com a margem passiva sanfranciscana.

O segmento meridional da Faixa Brasília é marcado por estilos estruturais definidos pelo empilhamento de extensas *nappes* e cavalgamentos subhorizontais com direção ao Cráton do São Francisco e seu gradiente metamórfico preferencial decresce em direção ao Cráton.

A região abordada nesta dissertação é composta por um conjunto de rochas supracrustais (Figura 2.3) relacionadas aos ciclos Paranoá-Canastra-Vazante (Meso-Neoproterozóico) respectivamente de oeste para leste.

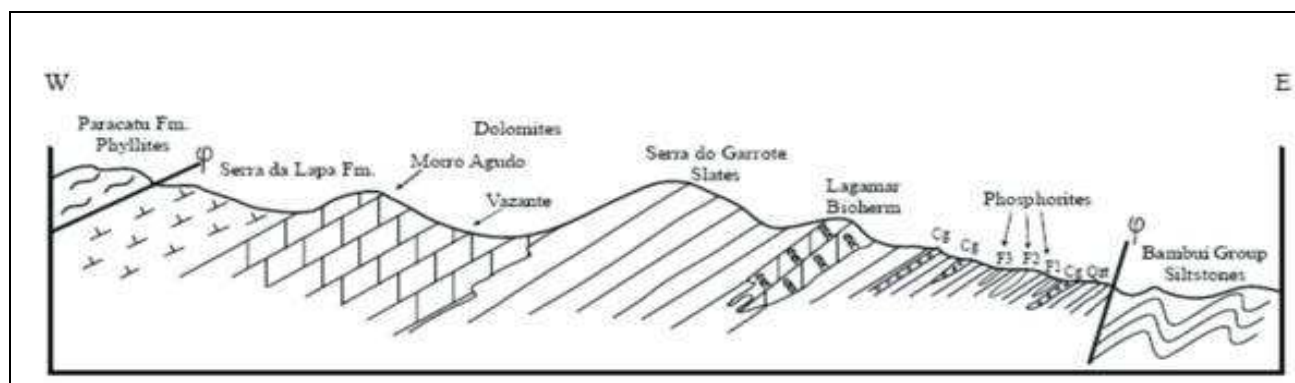


Figura 2.3: Seção esquemática do Grupo Vazante mostrando as relações de contato com Grupo Canastra e Bambuí (Dardenne *et al.* 2008)

### 2.2.2. Estratigrafia do Grupo Vazante

A denominação Formação Vazante foi proposta por Dardenne (1979) para designar um conjunto de unidades pelito-carbonatadas tradicionalmente atribuídas ao Grupo Bambuí. A Formação Vazante foi dividida em três seções: basal, intermediária e de topo. Em função da possibilidade de mapeamento dos diversos fácies que compõem a formação, Dardenne *et al.* (1998) elevou esta unidade à categoria de grupo, designando de Grupo Vazante, dividindo-o, da base para o

topo, nas seguintes formações: Santo Antônio do Bonito, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Serra da Lapa (Figura 2.3).

A seção basal, de composição argilo-carbonática, inclui as formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha e Lagamar.

A Formação Santo Antônio do Bonito é constituída por bancos métricos de quartzitos brancos, ora microconglomeráticos, intercalados com níveis ardosianos e diamictitos com clastos variados dispostos em matriz pelítica (Barbosa *et al.*, 1970; Tompkins e Gonzaga, 1989; Gonzaga e Tompkins, 1991), ligeiramente fosfatada.

A Formação Rocinha hospeda os principais depósitos e ocorrências de fosfatos do Grupo Vazante. É composta por metarritmitos com finas intercalações de quartzitos e ardósias e por um pacote espesso de ardósias e metassiltitos, regularmente intercalados a raras lentes de dolomitos rosados e paraconglomerados.

A Formação Lagamar engloba delgado pacote de metarritmitos contendo intercalações de conglomerados, dolomitos estromatolíticos e calcários.

A Formação Serra do Garrote é composta por ardósia carbonosa, tendo sido originalmente descrita sob a denominação de Membro/Fácies Serra do Garrote. Ocasionalmente, a monotonia da unidade é quebrada por intercalações de metassiltitos, quartzitos e dolomitos. Atribuiu-se uma espessura acima de 1.000 metros (Madalosso e Valle, 1978; Dardenne, 1979; Madalosso, 1979, 1980) para essa unidade. Na base a ardósia da Formação Serra do Garrote encontra-se interdigitada aos dolomitos e calcários, no topo, na região de Vazante, apresenta contato gradacional com dolomitos e ardósias da Formação Serra do Poço Verde, enquanto, na região de Paracatu, está em contato com a Formação Morro do Calcário

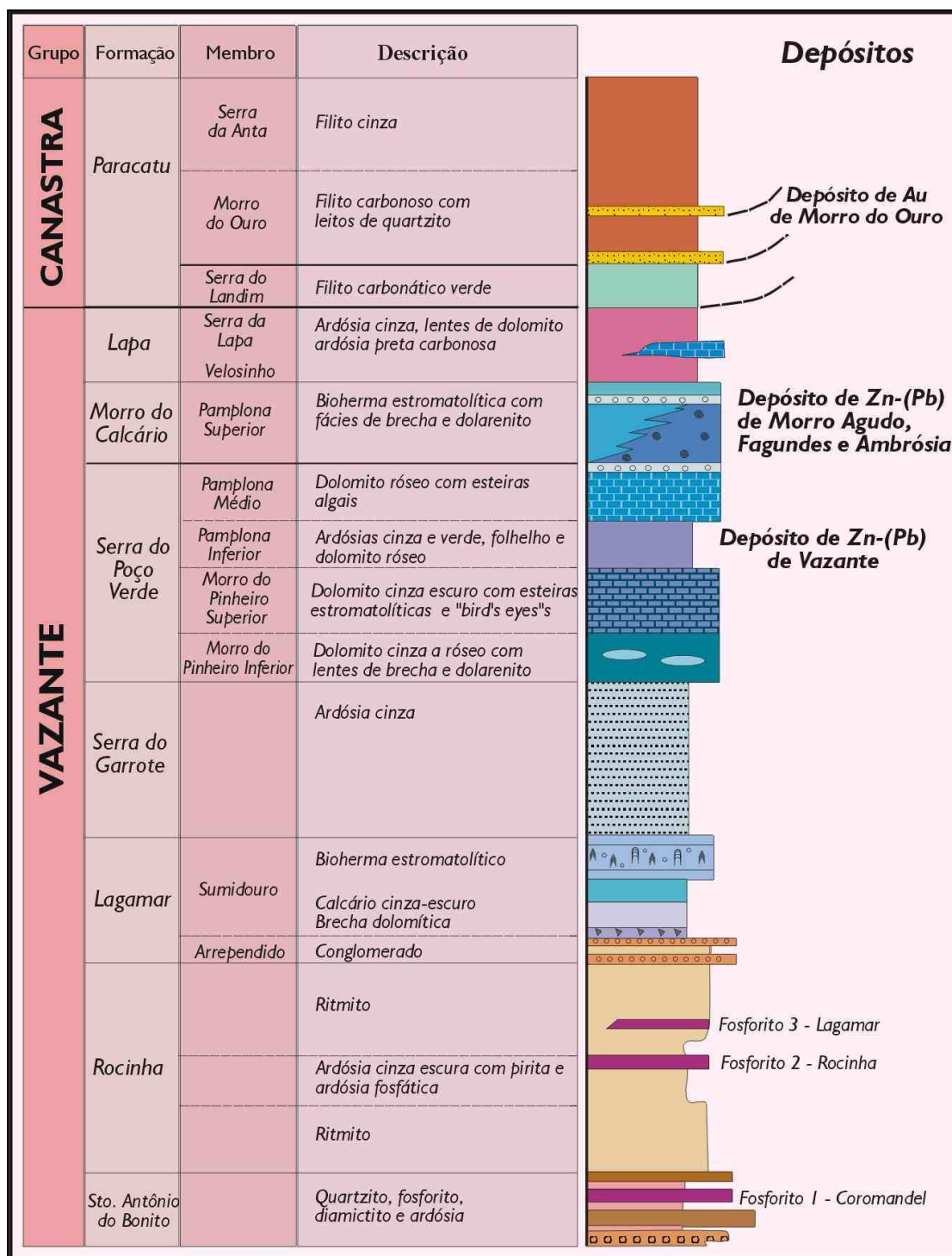


Figura 2.4. Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (Dardenne, 2000).

As unidades superiores do Grupo Vazante, descritas originalmente por Dardenne (1978, 1979), foram subdivididas em dois membros, Membro Serra do Poço Verde, na base e Membro Morro do Calcário, no topo, elevados à categoria de formação por Dardenne *et al.* (1998).

Madalosso & Valle (1978) e Madalosso (1979, 1980), consideraram que a seqüência dolomítica dos membros Morro do Calcário e Serra do Poço Verde corresponderiam a uma mesma unidade estratigráfica, situada imediatamente acima do Membro/Fácies Serra do Garrote, denominando este conjunto Fácies Morro do Calcário (dividido em 5 fácies, da base para o topo Serra do Velozinho Inferior, Serra do Velozinho Superior, Serra da Lapa, Morro Agudo e Serra do Landim).

A Formação Serra do Poço Verde, conforme definição de Dardenne *et al.* (1998) é composta por uma sucessão de dolomitos bandados rosados a cinza e metassiltitos com intercalação rítmica de dolomitos rosados/vermelhos com ardósias carbonáticas (este nível hospeda a mineralização de zinco de Vazante), metassiltitos e ardósias com lentes de dolomitos. Apresenta espessura bastante variável atingindo, na sua seção tipo, máximo de 2.000 metros.

A Formação Morro do Calcário (Dardenne 1978, 1979; Dardenne *et al.*, 1998), apresenta na base dolomitos, geralmente cinza, que representam construções estromatolíticas recifais contendo em seus flancos fácies de retrabalhamento compostas por dolarenitos e doloruditos. Os dolarenitos e doloruditos (brechas intraformacionais) são as hospedeiras do depósito de chumbo e zinco de Morro Agudo. A espessura desses depósitos de recifes é bastante variável podendo ter entre 100 a 200 metros, ou atingir mais de 650 metros.

A Formação Lapa é caracterizada por metapelitos carbonáticos/carbonosos, cinza-escuro, lâmiandos com algumas películas grafitosas. São frequentes nódulos geralmente milimétricos de dolomito micrítico impuro e de dolomita e/ou ankerita, lenticulares e alongadas paralelamente à lâmiação que podem ser de origem diagenética. Aparecem ainda camadas de filito ardosiano grafito-carbonoso, preto e rico em pirita, de metassiltito e filito cinza-escuro a esverdeado e de freqüentes lentes quartzíticas. Esta formação representa um ambiente de deposição lagunar com águas de profundidade moderada a rasa e calma, denotado pelo dolomito carbonoso e intercalações de filitos (Dardenne *et al.*, 1998).

### **2.2.3. Idade do Grupo Vazante**

A idade de deposição do Grupo Vazante é bastante polêmica. Inferências iniciais sobre a idade do Grupo Vazante basearam-se no reconhecimento da presença de estromatólitos colunares, que seriam característicos principalmente do Mesoproterozóico (*Conophyton cf. Cylindricus MASLOV*, 1650 a 950 Ma, Moeri, 1972; *Conophyton metula Kirichenko*, 1350 a 950 Ma, Cloud & Dardenne, 1973).

Datações Rb-Sr em filitos do Grupo Vazante indicaram idades de  $600 \pm 50$  Ma (Amaral & Kawashita, 1967) e  $680 \pm 10$  Ma (Couto *et al.*, 1981), que podem representar apenas o último fechamento do sistema isotópico, ou seja, a idade do evento metamórfico Brasileiro que afetou os grupo.

Idades Pb-Pb em galena dos depósitos de Vazante e Morro Agudo distribuem-se entre 780 e 600 Ma (Amaral, 1966, 1968c; Cassedanne & Lasserre, 1969; Cassedanne *et al.*, 1972; Iyer, 1984; Iyer *et al.*, 1992, 1993; Misi *et al.*, 1997; Cunha *et al.*, 2001). Contudo, tais idades não referem-se necessariamente à idade de sedimentação, mas à separação do chumbo de sua fonte. Freitas-Silva & Dardenne (1997) aplicando o modelo da plumbotectônica aos dados de isótopos de chumbo em galena dos depósitos da região Vazante-Paracatu obtiveram uma idade concordante de 1200 Ma, interpretada como o tempo de separação do chumbo do embasamento ou como a idade da mineralização de Morro Agudo, considerada diagenética (Dardenne & Freitas-Silva, 1998). Idades de 680 Ma foram estimadas, pelo mesmo método, para o minério de Vazante, relacionado à orogenia Brasileira (Dardenne & Freitas – Silva, 1998).

Devido à dificuldade de datação direta das rochas metassedimentares do Grupo Vazante, Babinski *et al.* (2005) e Rodrigues (2008) realizaram estudos geocronológicos em diques máficos que interceptam as rochas da Formação Serra do Poço Verde na área da Mina de Vazante. Contudo, as idades U-Pb em zircão obtidas (2,1 a 2,4 Ga) sugerem que os cristais de zircão analisados representam xenocristais herdados do embasamento, principalmente em vista das idades modelo Sm-Nd T<sub>DM</sub> em 1,0 Ga obtidas para rocha total.

Estudos de proveniência dos sedimentos do Grupo Vazante apontaram, segundo Pimentel *et al.* (2001), fontes com idades modelo Sm-Nd (T<sub>DM</sub>) entre 2,1 a 1,7 Ga, que são valores intermediários entre os obtidos para o Grupo Paranoá (2,3 a 2,0 Ga) e Grupo Bambuí (1,9 a 1,3 Ga), levando os autores a sugerirem uma idade também intermediária para a deposição das rochas do Grupo Vazante. Rodrigues (2008) ao analisar cristais de zircão detríticos de diferentes unidades do grupo constatou a contribuição de fontes diversas (935 a 3520 Ma), com predominância de fontes paleoproterozóicas (~2,1 Ga) para a Formação Serra do Garrote e mesoproterozóicas (1,1 a 1,2 Ga) para as formações Morro do Calcário e Lapa. A população mais jovem de zircão (~ 935 Ma), contudo, foi identificada apenas nas unidades basais do Grupo Vazante, representadas pelas formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha e Lagamar, sugerindo que esta fonte foi isolada ou recoberta durante a evolução da bacia (Rodrigues, 2008) ou, alternativamente, que seriam essas formações mais novas, como proposto por Misi (2010). Essa última hipótese implicaria na

colocação tectônica, a partir de cavalgamentos, de unidades mais antigas do Grupo Vazante sobre essas.

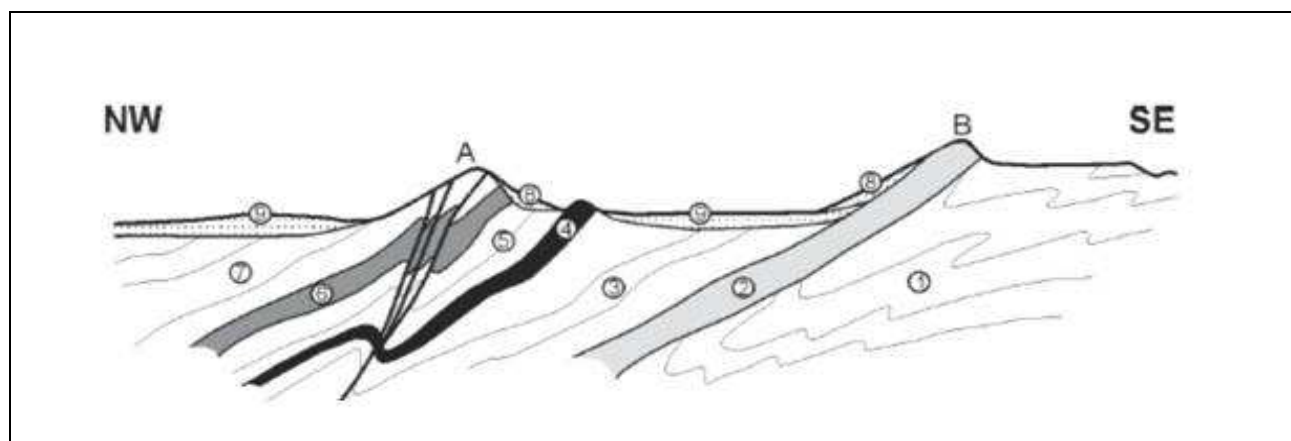
Datações Re–Os em folhelhos da base da Formação Lapa ( $993 \pm 46$  e  $1100 \pm 77$  Ma) realizadas por Azmy *et al.* (2008) resultaram em idades superiores às máximas ( $988 \pm 15$  Ma; U–Pb zircão detrítico) para essa unidade de acordo com os mesmos autores, mas que foram interpretadas como indicativas de idade mesoproterozóica (*ca.* 1000 Ma) para o Grupo Vazante.

#### **2.2.4. Geologia Estrutural**

De acordo com Freitas-Silva (1991), a evolução tectono-metamórfica da Faixa Paracatu-Vazante foi resultado de um Evento de Deformação Principal D<sub>1</sub> caracterizado como progressivo, heterogêneo, não coaxial, que apresenta estruturas que evoluíram do regime dúctil até o rúptil. Segundo o mesmo autor as estruturas geradas no evento D<sub>1</sub> podem ser agrupadas em fases (F1, F2, F3, F4, F5 e F6) e após este evento a região ainda sofreu reativações e gerações de estruturas rúpteis.

Para Rostirolla *et al.* (2002), na área estão registradas 5 fases deformacionais, denominadas D<sub>1</sub> a D<sub>5</sub>. As fases D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub> evidenciam deformação em regime dúctil, tendo sido responsáveis pela formação do arcabouço regional, com a geração de dobramentos holomórficos em larga escala e superfícies de foliação penetrativas, associados a uma tectônica convergente com formação de empurrões e dobramentos. A fase D<sub>3</sub>, em regime dúctil-rúptil, gerou um sistema de falhas direcionais sinistrais com direção predominante NE, dobramentos homoclinais descontínuos e basculamentos. As fases D<sub>4</sub> e D<sub>5</sub>, rúpteis, registram movimentos de blocos pouco significativos, porém compreendem deformações muito importantes do ponto de vista evolutivo. A fase D<sub>4</sub>, representada por um sistema extensional NE, modificou e remobilizou parte da mineralização de zinco da Mina de Vazante. A fase D<sub>5</sub> gerou um reticulado de falhas extensionais EW e NW, que controlam, em grande parte, o fluxo hidrogeológico na região.

A Figura 2.4 mostra exemplo da compartimentação regional, gerada pela deformação tangencial do ciclo de empurrões regionais, que colocou a unidade pelito-carbonática da Formação Morro do Pinheiro sobre a unidade pelítica da Formação Serra do Garrote.



**Figura 2.5.** Seção esquemática representando a estruturação da área A. Zona de Falha; B. Zona de Falha da Serra do Garrote; 1. Metapelitos da Formação Serra do Garrote; 2. Unidade filítica quartzosa milonitizada; 3. Metadolomito do Morro do Pinheiro Inferior; 4. Filitos carbonosos do Morro do Pinheiro Inferior; 5. Metadolomito cinza com bird eye's do Morro do Pinheiro Superior; 6. Metadolomito com intercalações de metapelitos do Pamplona Inferior; 7. Metadolomito do Pamplona Médio a Superior; 8. Colúvio; 9. Alúvio. (Rostriolla *et al.* 2002)

### 2.2.5. Depósitos de Pb-Zn hospedadas no Grupo Vazante

Os depósitos de Pb-Zn hospedados nas coberturas pelito-carbonáticas meso-neoproterozóicas da cobertura do Cráton do São Francisco e suas faixas dobradas marginais têm sido considerados como geneticamente ligados a um mesmo processo metalogenético de amplitude regional (Guimarães, 1962; Beurlen, 1974; Iyer *et al.* 1992; Iyer, 1984).

Na porção ocidental do estado de Minas Gerais, na zona de Unaí-Paracatu-Vazante-Coromandel (Dardenne, 1978, 1979), está impresso o início do desenvolvimento da fácies metamórfica xisto verde caracterizada pela predominância de ardósias da Zona Externa da Faixa Brasília (Freitas-Silva e Dardenne, 1997). Neste contexto está inserido o Grupo Vazante, no qual são encontradas numerosas ocorrências e depósitos de Pb-Zn-(P), destacando-se os depósitos de Morro Agudo (Pb-Zn), Vazante (Zn), Rocinha (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e Lagamar (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Os principais depósitos de Zn e Pb hospedados pelo Grupo Vazante apresentam predominantemente dois tipos principais de minérios. O primeiro tipo é representado pelo depósito sulfetado de Morro Agudo e o segundo pela jazida silicatada de Vazante. Além de apresentarem controles litoestratigráficos distintos, representam termos extremos dos depósitos sin-diagenéticos (Morro Agudo) e epigenéticos (Vazante), ambos hidrotermais.

O depósito sulfetado de Morro Agudo localiza-se a sudeste da Cidade de Paracatu. Está hospedado na Formação Morro do Calcário (topo), que representa uma grande construção recifal dolomítica. A zona mineralizada corresponde ao horizonte dos dolomitos portadores de

estromatólitos colunares condicionados a um forte controle litoestratigráfico que reflete seu posicionamento paleogeográfico e as condições sedimentológicas do ambiente.

A jazida de zinco de Vazante corresponde ao principal depósito em exploração deste metal no Brasil, sendo também um dos maiores depósitos mundiais. O minério primário (hidrotermal) é composto por silicatos, principalmente willemita. Calamina supergênica (composta principalmente por hemimorfita) constitui um segundo tipo de mineralização estando associados a processos de carstificação.

As mineralizações de zinco de Vazante associam-se à Zona de Falha de Vazante com atitude aproximada N50E/60NW. Esta tem sido interpretada como uma falha sin-sedimentar, reativada na fase compressional do Evento Brasileiro como uma falha transcorrente sinistrgira e inversa, e posteriormente, no final do Brasileiro, como uma falha normal lístrica (Dardenne, 1979; Pinho, 1990). O depósito de Vazante é hospedado por metadolomitos, ardósia e filito da Formação Serra do Poço Verde e por corpos subordinados de rochas metabásicas (diques de diabásio cisalhados; Figura 2.5).

Na Zona de Falha de Vazante, uma complexa zona de brechas hidráulicas e veios preenchidos por dolomita, ankerita, siderita, jaspe, hematita e clorita, ocorre espacialmente associada aos corpos de minério de zinco (Monteiro, 1997).

Até a década de 90, a origem do minério willemítico foi considerada supérgena (Amaral, 1968; Rigobello *et al.*, 1988). Estudos sobre a evolução estrutural (Pinho *et al.*, 1989; Pinho, 1990), e características petrológicas, geoquímicas e isotópicas do depósito (Monteiro, 1997; Monteiro *et al.*, 1998a; 1998b; 1999; 2007) confirmam a origem hidrotermal para o minério willemítico, sincrônica ao desenvolvimento da Zona de Falha de Vazante.

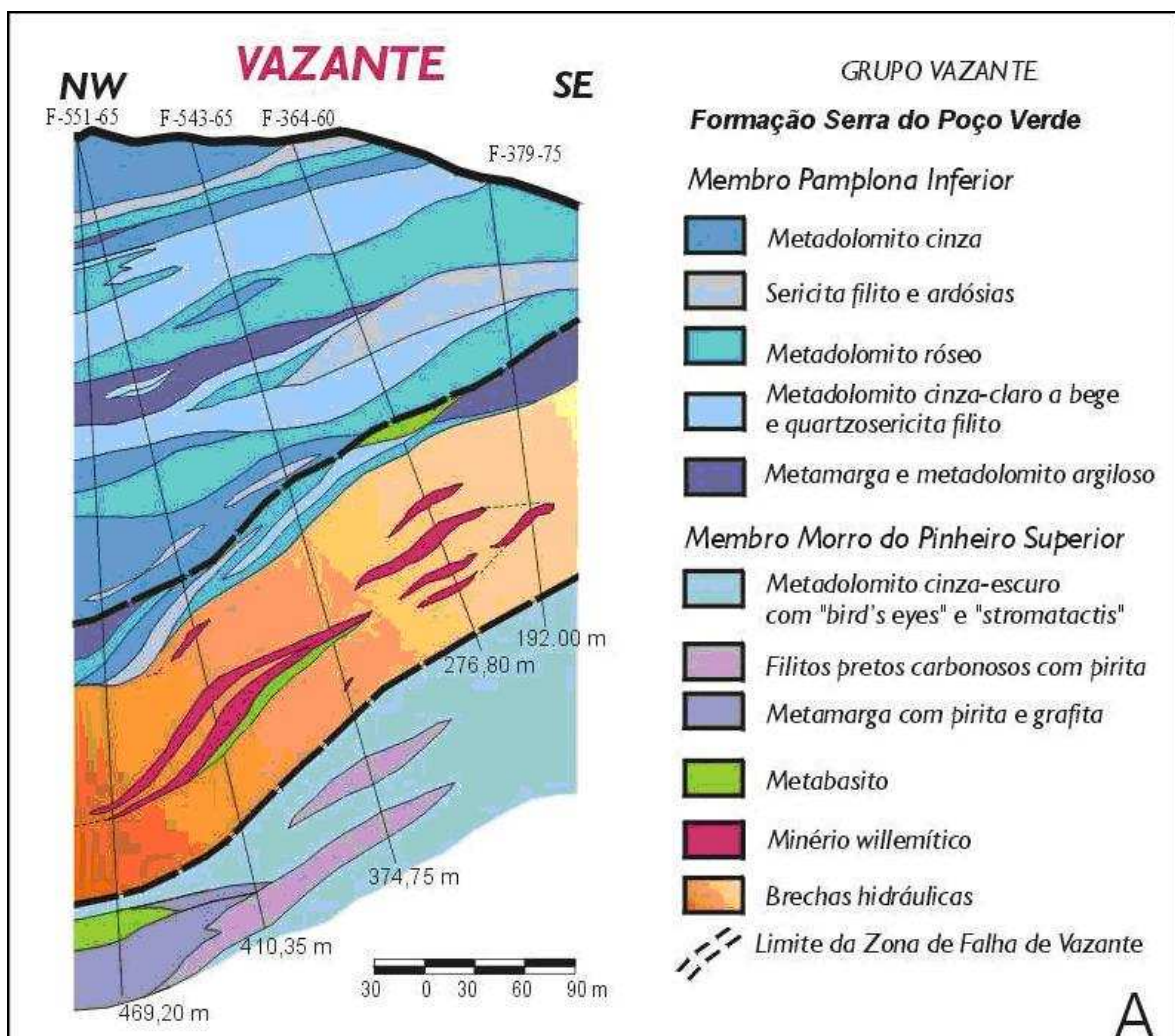


Figura 2.6. Perfil do depósito de Vazante (Monteiro, 1997), confeccionado a partir do Perfil de Sondagens 11750E (Sucuri) da Votorantim Metais Zinco (1984).

### 3. Contexto Geológico Local: Área da Mina Extremo Norte de Vazante

Neste item, serão discutidos os dados analisados e coletados nesse estudo, relacionando-os à estratigrafia, geoquímica e geologia estrutural da região.

#### 3.1. Estratigrafia

A área do depósito de zinco do Extremo Norte é caracterizada por rochas pertencentes às formações Serra de Garrote e Serra do Poço Verde do Grupo Vazante. A primeira é representada quase que exclusivamente por filitos, localmente associados a níveis de sílexito e de quartzitos e blocos de hematita, além de blocos com aspecto brechóide enriquecidos em sílica e ferro.

A Formação Serra do Poço Verde é composta por rochas dolomíticas, com intercalações de níveis metapelíticos e margosos (Figura 3.1).

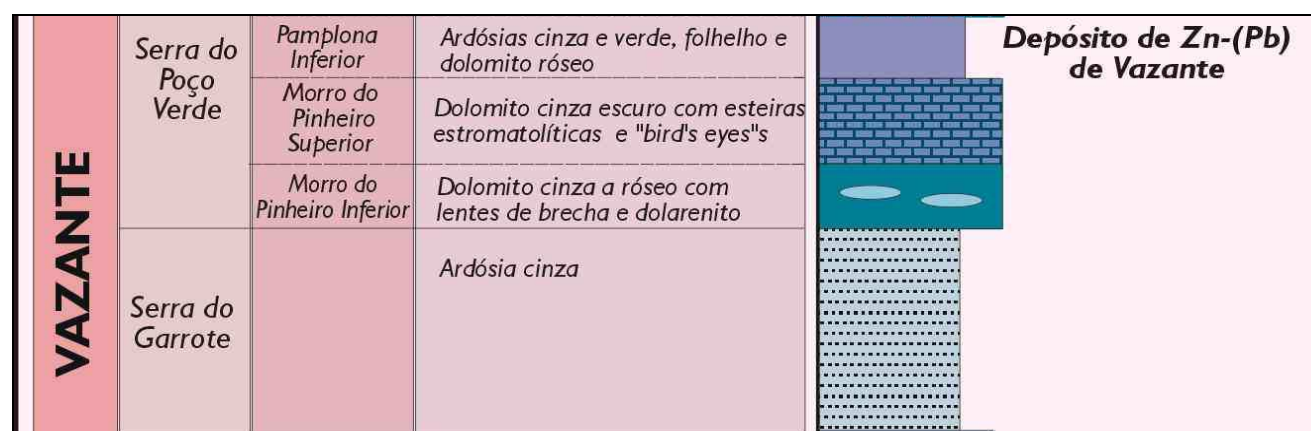


Figura 3.1. Coluna estratigráfica do Grupo Vazante na área do Extremo Norte. (modificado de Dardenne, 2000).

A disposição espacial destas litologias pode ser verificada no Anexo 1 – A e B, no mapa e perfis geológicos da antiga Mina Masa. Na figura 3.2 é apresentada a forma de ocorrência das duas formações na porção norte da área de estudo.



Figura 3.2. Contato entre a Formação Serra do Poço Verde, dolomítica, e a Formação Serra do Garrote, predominantemente metapelítica, na porção norte da área da Mina Extremo Norte de Vazante.

### 3.1.1. Formação Serra do Garrote

A Formação Serra do Garrote na área do Extremo Norte é constituída quase que exclusivamente por filitos carbonosos, que se associam com brechas ferruginosas e blocos de hematita.

Os filitos carbonosos apresentam cor preta a cinza-chumbo quando frescos, e são coloridos quando intemperizados, além de bastante homogêneos, apenas com diferenças pontuais sem distribuição espacial que possa influenciar em uma distinção litológica. Os afloramentos dessa unidade ocorrem a norte da área e aparecem na forma de grandes paredões, esculpidos na encosta dos taludes dentro da cava da mina.

Estes filitos são compostos basicamente por sericita, clorita e quartzo, podendo conter cristais detríticos ou autigênicos de feldspato, turmalina e estilpnomelano. Por vezes exibem cristais pseudomorfos de pirita substituída por hidróxido e óxido de ferro, dispostos intersticialmente entre as palhetas irregulares de sericita e cristais anédricos de quartzo. Possuem textura lepidoblástica e estrutura foliada, definida principalmente pela uma foliação filítica  $S_1$ .

Estes filitos ocorrem como rochas finamente foliadas, com alternância de leitos com diferentes cores e granulometria, apresentando espessuras milimétricas a centimétricas, evidenciando seu acamamento sedimentar, o qual se mantém paralelo a subparalelo a uma clivagem ardosiana ou foliação fílica ( $S_1$ ). Tanto o acamamento como a  $S_1$  são transpostas por uma foliação espaçada, com ângulo de mergulho mediano a alto ( $S_2$ ), bastante persistente e penetrativa. A rocha também se mostra afetada por “*kinks*” da fase  $D_1$ , e associadas ou não a uma foliação espaçada, geralmente caracterizada por uma clivagem de crenulação.

O levantamento de detalhe ao longo do contato entre a Formação Serra do Poço Verde e Formação Serra do Garrote comprovou que as fortes sinuosidades observadas estão associadas a um complicado padrão de dobras, que afetam o  $S_0$  e a foliação  $S_1$ , e estão associadas à inflexão,

implicando, desta forma, que estas estruturas estão geneticamente relacionadas a uma fase de deformação pós-D<sub>1</sub> (Rostriolli *et al.* 2002). Além disso, são também observadas falhas de empurrão nos dolomitos da Formação Serra do Poço Verde próximo a este contato, assim como estrias que evidenciam o empurrão da Formação Serra do Poço Verde sobre a Formação Serra do Garrote (Prancha 3.1). Estes padrões são ilustrados no mapa do anexo 1.

No contato com a Formação Serra do Poço Verde, observa-se também a presença de minério de calamina contendo hemimorfita, hidrozincolita e magnetita.

### **3.1.2. Formação Serra do Poço Verde**

Na área do Extremo Norte, a Formação Serra do Poço Verde é representada pelos membros Morro do Pinheiro Inferior, Morro do Pinheiro Superior e Pamplona Inferior. Os dois primeiros ocorrem a leste da Falha de Vazante, em contato de lapagem com a brecha dolomítica hidrotermal e o último a oeste da falha, em contato de capa com a brecha.

#### **3.1.2.1. Membro Morro do Pinheiro Inferior**

O Membro Morro do Pinheiro Inferior ocorre na base da sequência dolomítica da Formação Poço Verde, na área da antiga Mina da MASA. É formado por dolomitos cinza, por vezes rosados, com esteiras de cianobactérias e raros *bird's eyes* (que são estruturas formadas por escape de gás e foram posteriormente preenchidos por calcita e/ou dolomita). Ocorrem nesta unidade ainda, doloruditos, caracterizados por exibir clastos carbonáticos angulosos a subarredondados, de tamanhos variados, dispostos em uma matriz micrítica (Prancha 3.1).

Os dolomitos com esteiras e os doloruditos são compostos quase que exclusivamente por dolomita, e alguns raros cristais de opacos e quartzo. Mostram-se localmente silicificados, e apresentam vênulas de Fe-dolomita, quartzo e dolomita.

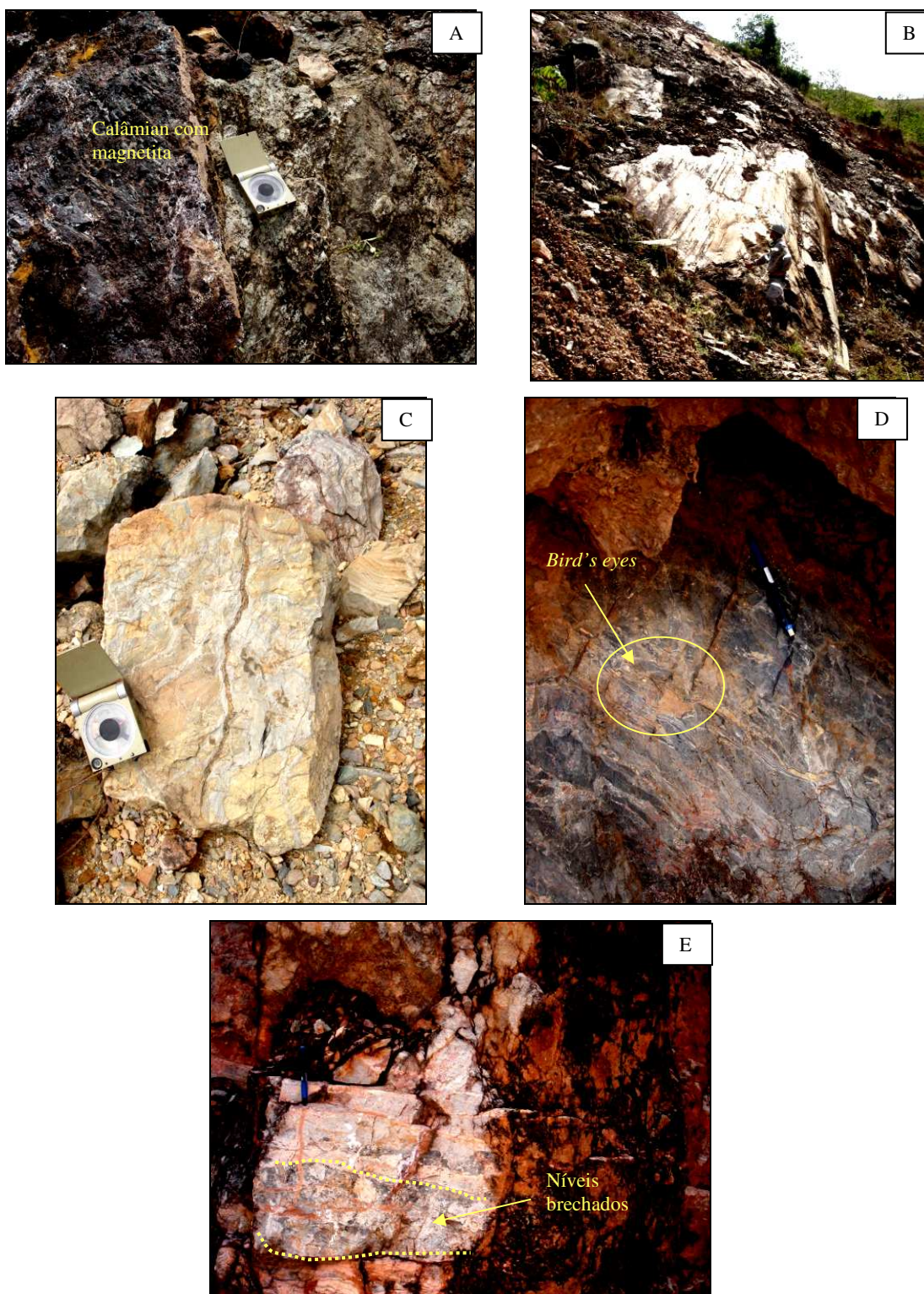
Estruturas de dissolução e preenchimento de cavidades, tais como os *stromatactis*, representados por cavidades preenchidas por cristais bem desenvolvidos de dolomita esparítica, com quartzo ao centro são frequentes neste membro.

#### **3.1.2.2. Membro Morro do Pinheiro Superior**

Este membro é representado por metadolomito fino, com granulação de fração argila a silte, micrítica a microesparítica, exibindo estrutura maciça a levemente lamiar. Mostra-se praticamente isento de influência de alteração hidrotermal, mantendo-se sempre com sua cor cinza claro e/ou

escura inalterada, e suas estruturas primárias preservadas, que são representadas por *bird's eyes* e esteiras estromatolíticas.

O metadolomito apresenta lentes de brechas intraclásticas, com clastos angulosos, de tamanhos variados (0,2-10cm), envoltos por matriz dolomítica micrítica, idêntica à descrita anteriormente (Prancha 3.1). Também se associa às camadas de metapelitos de cor cinza a esverdeada, com espessuras médias em torno de 2 a 3 m, onde é possível observar claramente duas foliações metamórficas, uma contínua, caracterizada por uma clivagem ardósiana ( $S_1$ ), e outra espaçada, por vezes gerando uma crenulação na rocha ( $S_2$ ).



**Prancha 3.1. Representação dos litotipos da Formação Serra do Garrote e Formação Serra do Poço Verde.**

**A.** Contato da Formação Serra do Garrote com a Formação Serra do Poço Verde. Destaque para mineralização de calamina. **B.** Estria de falha em filito da Formação Serra do Garrote. **C.** Brecha com clastos sub angulosos e matriz dolomítica da Formação Morro do Pinheiro Inferior. **D.** Metadolomito cinza fino, lâmiando e com *bird eye* 's. **E.** Níveis centimétricos de brechas com intraclastos da Formação Morro do Pinheiro Superior.

### **3.1.2.3. Membro Pamplona Inferior**

Situado a oeste da Falha de Vazante, o Membro Pamplona Inferior, está contido no bloco que foi rebaixado pela Falha de Vazante, ilustrado no perfil do Anexo 1.

É constituída por metadolomito que exhibe tonalidade rosada, granulação fina, e apresenta esteiras estromatolíticas, que definem seu acamamento sedimentar. Possui níveis margosos, de cor roxa a esverdeada, nos quais é possível identificar duas foliações metamórficas.

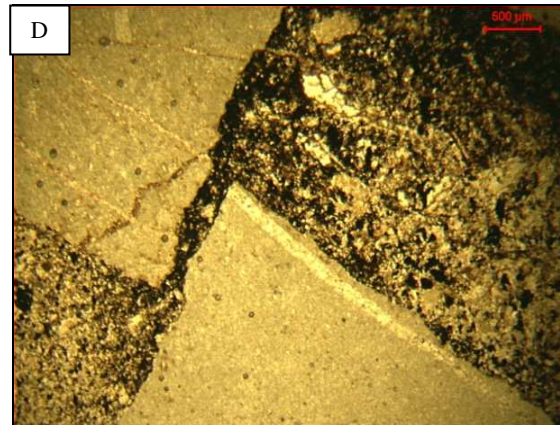
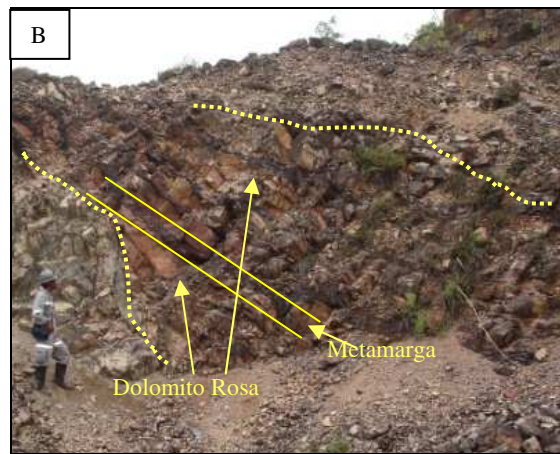
Esta rocha foi mais fortemente afetada pelo processo de alteração hidrotermal, fato comprovado pela modificação da cor mais clara da rocha e pela frequente ocorrência de vênulas de siderita, hematita e ankerita e brechações locais associadas. Por vezes, apresenta-se totalmente silicificada, exibindo, nestes casos, estrutura maciça.

Ao microscópio, é possível verificar que os cristais de dolomita apresentam textura micrítica, às vezes microesparítica. Em vênulas também pode ser observada uma geração bastante fina de dolomita. A dolomita esparítica pode ocorrer também em texturas de preenchimento de espaços abertos formando estruturas tipo pente, as quais demonstram que os cristais tiveram crescimento da borda para o centro da cavidade (Prancha 3.2 - C).

### **3.1.3. Metadolomitos Brechados e Brecha Hidrotermal**

Os metadolomitos desta unidade estão contidos em uma faixa de direção NS associada à Falha de Vazante, e cortam a área da Mina do Extremo Norte, exibindo um espessamento próximo ao contato com a Formação Serra de Garrote (mapa – Anexo 1). São caracterizados por uma intensa deformação rúptil - D<sub>3</sub> (Rostriolla *et al.*, 2002) e, possivelmente, evidenciam sobrepressão dos fluidos na zona de falha, que teria propiciado o desenvolvimento de sua estrutura brechada (Prancha 3.2 - D e E).

Essa porção de rocha exhibe cor rosa a avermelhada, que pode ser atribuída à interação com os fluidos hidrotermais, e não preserva estruturas primárias que possam evidenciar o acamamento sedimentar, além de mostrar-se intensamente venulada, com espessos veios de siderita, ankerita e dolomita. Os clastos na brecha são arredondados a subarredondados devido à assimilação parcial relacionada com a passagem dos fluidos hidrotermais aquecidos, e mostram-se dispostos caoticamente em matriz constituída por dolomita branca esparítica, totalmente recristalizada, exibindo estrutura em pente e preenchimento por carbonatos de ferro. A matriz é cortada por vênulas de hematita e apresentam clastos imersos de dolomito micrítico, raramente contendo recristalização.



**Prancha 3.2. Representação dos litotipos da Formação Serra do Poço Verde, Metadolomitos brechados e Brecha Hidrotermal**

**A.** Metadolomito cortado por veio de siderita e sulfeto do Membro Pamplona Inferior. **B.** Afloramento de dolomito rosa intercalado com metamarga (rocha de cor cinza escuro). **C.** Metadolomito micrítico com cavidades preenchidas por dolomita esparítica formando estrutura tipo pente – Escala 100 µm. **D.** Matriz com hematita e carbonatos de ferro em brecha hidrotermal – Escala 500 µm. **E.** Brecha hidrotermal com dolomita branca esparítica e carbonatos de ferro entre fragmentos de dolomito róseo.

### 3.2. Geologia estrutural

A área do depósito do Extremo Norte apresenta rochas extremamente fraturadas, incluindo as brechas hidrotermais e corpos de hematita maciça. Essa característica foi observada em mapeamentos e as estruturas foram separadas, medidas, descritas e analisadas.

As principais estruturas reconhecidas na área são representadas pelo o acamamento sedimentar e bandamento composicionais, planos relacionados à Falha Vazante, às falhas rúpteis de direção NW, assim como estruturas de baixo ângulo (Figura 3.3).

O bandamento é de origem sedimentar e marcado, principalmente nos dolomitos (rosa e cinza), pela diferença composicional entre bandas margosas e metapelíticas e bandas dolomíticas (família  $S_0$ ). Já as foliações metamórficas apresentam-se mais desenvolvidas nessas rochas margosas e pelíticas e, em geral, ocorrem aproximadamente paralelas ao bandamento.

As estruturas relacionadas à Falha Vazante na área do Extremo Norte apresentam direção N-S, com atitude média 275/55, diferentemente das direções levantadas na Mina de Vazante, que apresentam direção NE-SW e atitudes médias iguais a 315/55 (Bhering, 2009). Além do plano de falha concordante com as estruturas que controlam os corpos de minérios, ocorrem outros planos com mesma direção da Falha Vazante, porém com caimento contrário, comportando-se como pares conjugados. Portanto, para definição em campo das estruturas relativas à Falha Vazante, foram denominadas famílias PM (plano do minério) e PC (plano contra a direção do minério, Bhering, 2009).

As principais descontinuidades condutoras de água, importantes para a compreensão da dinâmica hidrogeológica na área da mina, são pertencentes à família de fraturas NW. Estas se encontram frequentemente com feições de dissolução, carstificadas e muitas vezes representam controles estruturais para a mineralização de calamina, supérgena.

As estruturas de baixo ângulo (família BA – Bhering, 2009) ocorrem com grande frequência na mina e são relacionadas a empurrões (falhas inversas). Essas estruturas aproveitam a fraqueza da descontinuidade representada pelo bandamento e acamamento, sendo paralela a essas estruturas.

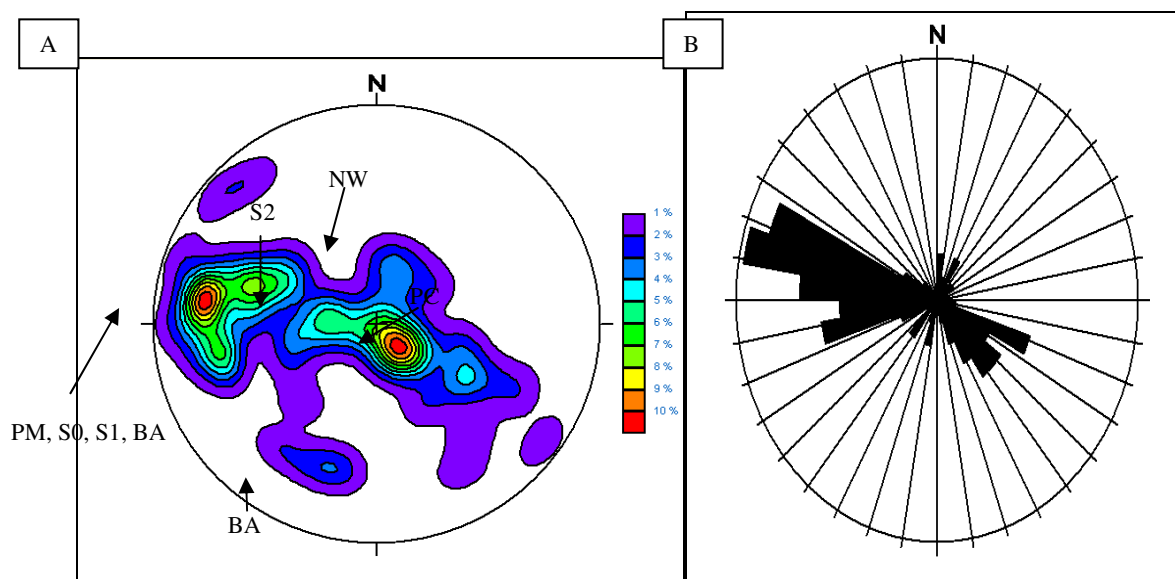


Figura 3.3. Estereogramas A) de contorno com atitude de todas as famílias de discontinuidades encontradas no Extremo Norte (N=79); B) roseta de frequência das estruturas.

### 3.2.1 Acamamento Sedimentar

O acamamento sedimentar (Família  $S_0$ ) é reconhecido com maior facilidade nos metadolomitos da Formação Serra do Poço Verde, sendo representadas por estruturas primárias preservadas, tais como lamiações, marcas de onda, e também pela alternância de camadas com diferenças estruturais, texturais e de cor (Prancha 3.3). Nos filitos este é marcado predominantemente pela alternância de leitos com diferentes cores e granulação, porém ocorre de forma mais discreta. Em geral, o acamamento sedimentar apresenta atitude média de 270/25 (Prancha 3.3), podendo variar, principalmente próximo ao contato da Formação Serra do Poço Verde com a Formação Serra do Garrote.

### 3.2.2. Foliação metamórfica

Esta estrutura é definida principalmente por duas feições planares penetrativas subparalelas, que caracterizam foliações metamórficas  $S_1$  e  $S_2$  na área de estudo, e são identificadas com maior facilidade nas litologias enriquecidas em minerais filossilicáticos, tais como os filitos da Formação Serra do Garrote e nos metapelitos e metamargas das Formações Serra do Poço Verde.

Essas foliações apresentam atitudes médias entre 270 – 240/30 -70 e sua distinção em campo é dificultada uma vez que os afloramentos são bastante intemperizados.

A partir dos estereogramas (Prancha 3.3) é possível distingui-las pelo caimento, visto que a direção é bastante próxima. A foliação  $S_1$  é definida pela recristalização de filossilicatos de baixo

grau metamórfico, tais como, sericita e clorita, enquanto a  $S_2$  é oblíqua a  $S_1$ , também gerada por recristalização de micas de baixo grau metamórfico. Tal fato pode demonstrar que as foliações foram formadas em fases distintas.

### 3.2.3. Estruturas relacionadas à Falha Vazante

As estruturas rúpteis-dúcteis a rúpteis relacionadas à Falha Vazante são identificadas principalmente nos corpos de minério com willemita/ hematita e na brecha hidrotermal. Os planos apresentam atitude 275/55 e nos afloramentos visitados, aparecem preenchidos por hematita e clorita, principalmente. A falha passa a ter direção praticamente N-S na área do Extremo Norte, diferentemente da Mina de Vazante que apresenta direção NE-SW. Tal fato se deve à proximidade do contato das formações Serra do Poço Verde e Serra do Garrote, que é marcado por um empurrão.

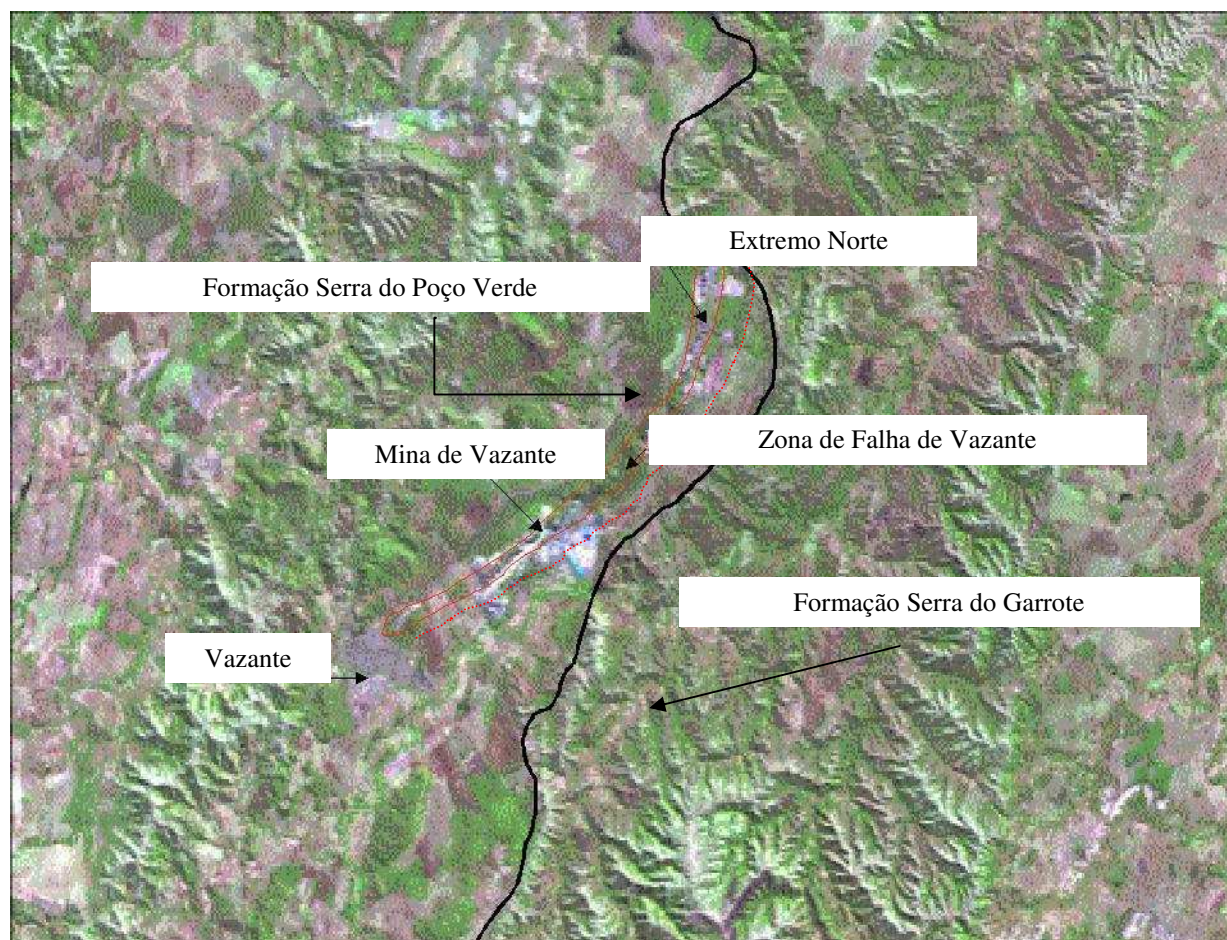


Figura 3.4. Imagem de satélite *Quickbird* (2004) mostrando inflexão da Zona da Falha de Vazante (destaque em vermelho).

As medidas de estrias coletadas no plano de falha (*down dip*) e a análise dos *steps* mostram que a Falha de Vazante teve um deslocamento preferencial na vertical, que indicam um padrão de falhamento normal (Votorantim Metais, 2008).

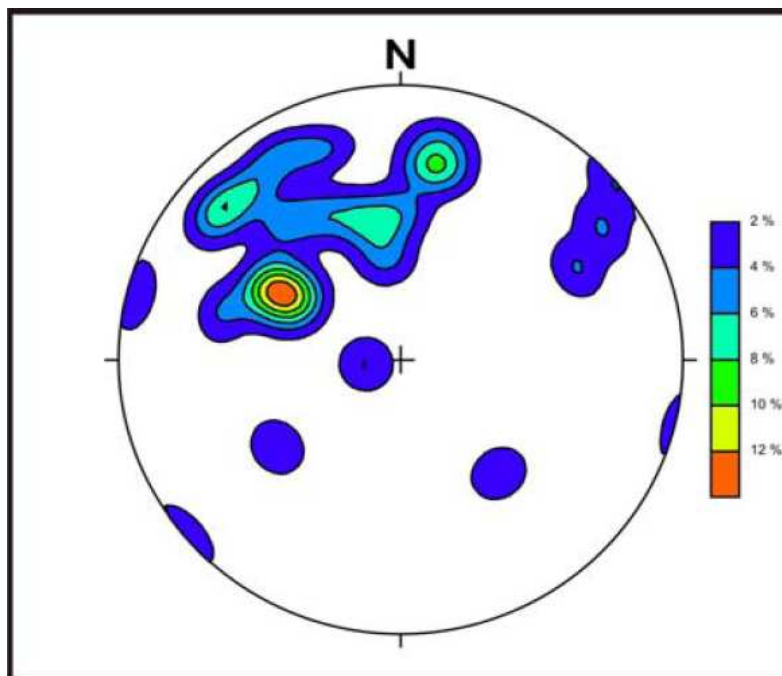


Figura 3.5. Estereograma de contorno das medidas contidas no plano de Falha de Vazante (Votorantim Metais, 2008)

Nas análises petrográficas foram verificadas amostras de minério do Extremo Norte mais deformadas em relação às aquelas da Mina de Vazante e com porcentagem maior de hematita. Isso também pode estar relacionado à proximidade da zona da falha do contato entre as formações supracitadas. Desta forma, uma possível interpretação seria que a Falha Vazante tornou-se mais rasa na área da antiga MASA e foi amortecida pelas rochas da Formação Serra do Garrote (Nunes, comunicação verbal). A grande frequência de hematita em superfície pode ser também uma indicação do fato.

Com caimento contrário aos planos mineralizados, ocorre a família denominada de PC (Bhering, 2009). Esses planos formam pares conjugados e na área do Extremo Norte estão preenchidas por hematita. Segundo Rostirolla *et al.* (2002), ambas estruturas seriam relacionadas à fase D<sub>3</sub>.

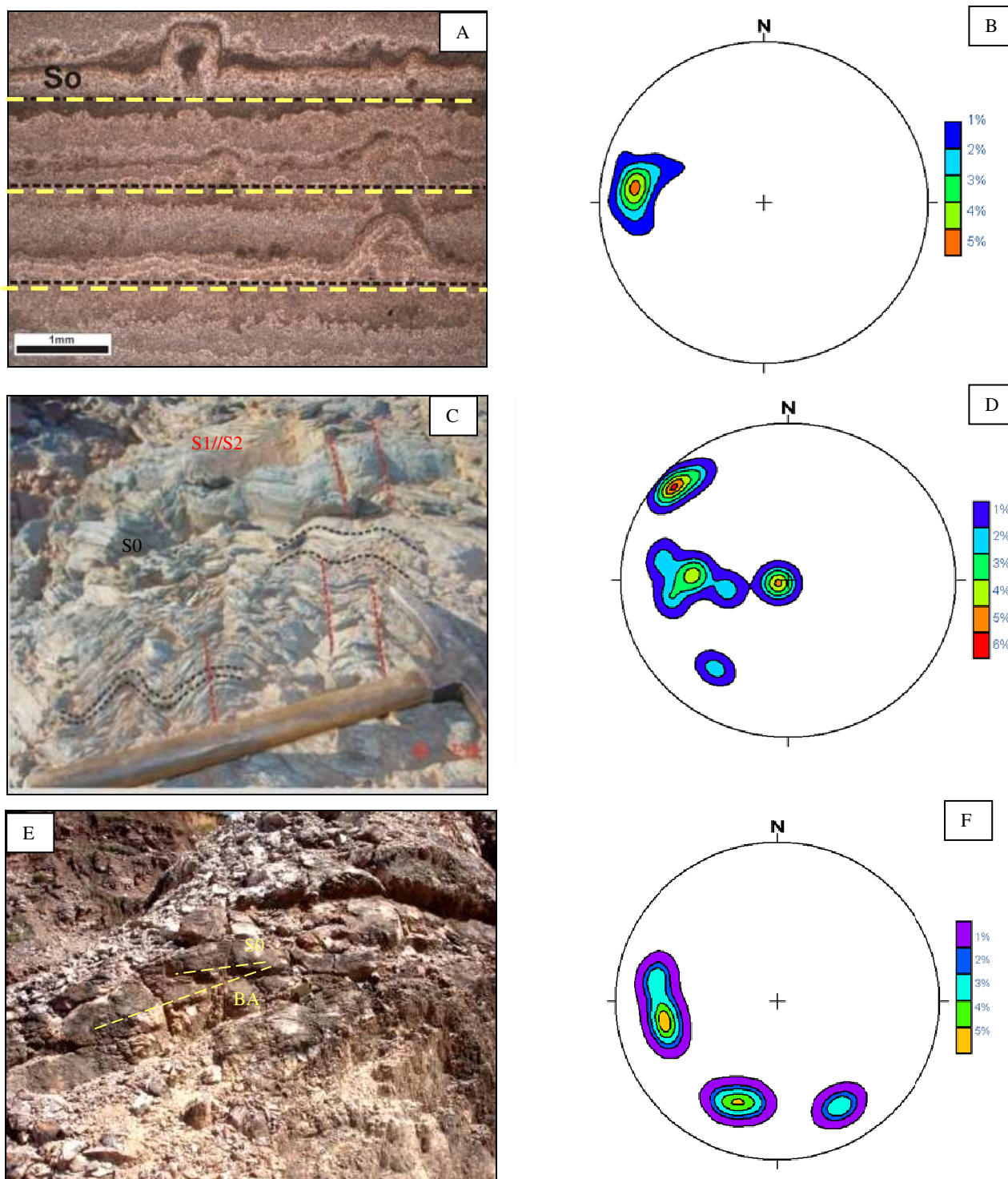
#### **3.2.4. Falhas de baixo ângulo**

As falhas de baixo ângulo ocorrem na área do Extremo Norte, principalmente nos dolomitos e, mais raramente, nos corpos de hematita e willemita. São responsáveis por deslocamentos do bandamento composicional, podendo formar rejeitos métricos. Esse deslocamento pode deslocar também os corpos mineralizados.

A atitude preferencial dessa estrutura é 225/30. Isso demonstra que ela foi desenvolvida em planos de fraqueza de outras descontinuidades, tais como bandamento e acamamento dos metadolomitos, por estar praticamente subparalela a essas estruturas. Relacionando esta estrutura às fases propostas por Rostirolla *et al.* (2002), pode-se concluir que esta é pertencente a fase onde se formaram falhas extensionais, D<sub>4</sub>.

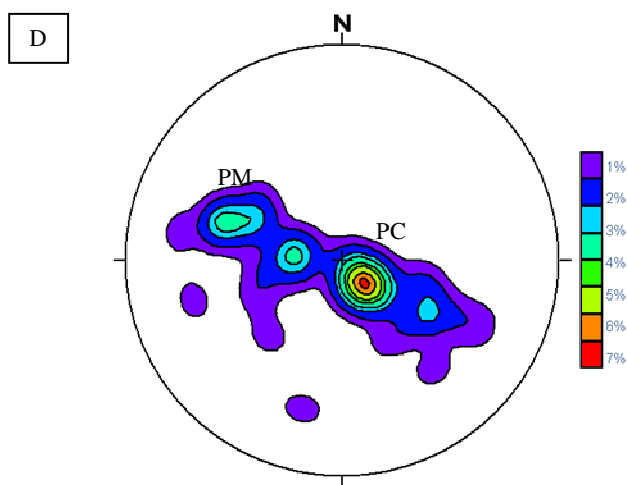
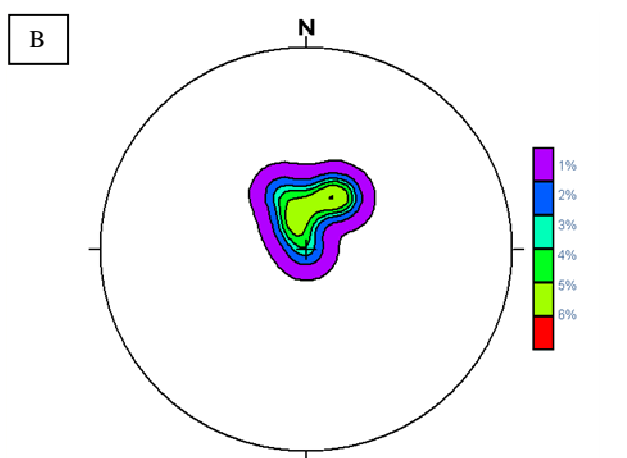
#### **3.2.5. Falhas NW**

As principais estruturas condutoras de água na Mina de Vazante são pertencentes à família NW (Bittencourt, 2008). Essas estruturas encontram-se frequentemente com feições de dissolução e carstificadas e apresentam orientação preferencial 030/70, em média (Prancha 3.4). No Extremo Norte, essa estrutura também é marcada por carstificação, além da presença de planos preenchidos pela mineralização de calamina. Segundo Rostirolla *et. al* (2002), essas estruturas seriam pertencentes à fase D<sub>5</sub>, essencialmente rúpteis.



**Prancha 3.3. Representação das estruturas do Extremo Norte de Vazante**

**A.** Fotomicrografia mostrando as esteiras de cianobactérias que representam a família  $S_0$  em metadolomito da Formação Serra do Poço Verde (Escala 1mm, Votorantim Metais, 2008). **B.** Estereograma de contorno com atitude do  $S_0$  da área do Extremo Norte (N=16). **C.** Relação entre  $S_0$  -  $S_1/S_2$  (acima – Votorantim Metais, 2008). **D.** Estereograma de contorno com atitude do  $S_1$  e  $S_2$  da área do Extremo Norte (N=18). **E.** Estruturas de baixo ângulo em metadolomito. **F.** Estereograma de contorno com atitude da família BA da área do Extremo Norte (N=6)



**Prancha 3.4. Representação das estruturas encontradas no Extremo norte de Vazante**

- A. Estruturas NW preenchidas por calamina. B. Estereograma de contorno com atitude da família NW da área do Extremo Norte (N=7). C. Plano concordante à atitude dos corpos de minério com willemita e hematita. D. Estereograma de contorno com atitude da família PM e PC da área do Extremo Norte (N=41). E. Relação entre os planos concordantes a mineralização e opostos.

### **3.3. Caracterização dos tipos de minério de Zn do Extremo Norte**

No Extremo norte da Mina de Vazante, pôde-se verificar dois tipos principais de minério, sendo um constituído predominantemente por calamina (hemimorfita) e outro, observado principalmente em testemunhos de sondagem, constituído por willemita.

A caracterização dos estilos de mineralização e tipos de minério é de fundamental importância para a definição das amostras a serem submetidas aos ensaios tecnológicos, visto que estes influenciam nos processos de beneficiamento.

#### **3.3.1. Minério com Calamina**

O termo calamina é usado para distinguir minérios de zinco contendo minerais secundários, tais como hemimorfita, smithsonita e hidrozincita. No Extremo Norte, os corpos de minério com calamina ocorrem com frequência em superfície, podendo ser dividido em dois subtipos principais:

##### **Minério com calamina rico em Fe**

Os corpos de minério com calamina rica em Fe ocorrem no norte da área em estudo e são caracterizados pela presença abundante de veios de hematita associados à dolomitos alterados e cavidades preenchidas por calamina. Estes aparecem em pequenas cavas da antiga Mina da Masa, onde se extraía um minério conhecido por willemita alterada (S. Nunes, comunicação verbal).

Geralmente, o minério aparece bastante friável, com coloração amarronzada escura, aparência terrosa e é constituído por hemimorfita, argilominerais, hidrozincita e hematita. Esta última ocorre em veios bastante fraturados, os quais bordejam as porções ricas em hemimorfita e hidrozincita.

##### **Minério com calamina associado à família de falhas NW**

Nestes corpos de minério é possível verificar que os controles para sua formação podem estar associados aos ciclos hidrogeológicos da região. Tal afirmação é verificada em campo através da presença de calamina em planos da família NW, descritas no item 3.2.4, onde estes contêm estruturas formadas por carstificação. Além disso, esta tipologia aparece em pacotes mais contínuos que a calamina associada a veios de hematita. Os corpos de calamina representados por essa tipologia foram extraídos em cavas mais profundas e de maior extensão da antiga Mina da MASA (S. Nunes, comunicação verbal). O minério é constituído por hemimorfita bem cristalizada e argilominerais.

Outra particularidade deste tipo de minério é a sua associação com metamargas. Esta última ocorre muitas vezes intercalada aos corpos de calamina e dolomito. Em campo, é comum observar, intercalado à metamarga, dolomito substituído e com feições de dissolução e preenchimento de cavidades por calamina. A camada margosa parece servir como *trap* para a mineralização, ou seja, devido às características de impermeabilidade das camadas margosas; o líquido mineralizante ficou “aprisionado”, substituindo os dolomitos.

### **3.3.2. Minério willemítico**

O minério willemítico foi observado no campo apenas no afloramento da cava 5A (ponto 45 – Figura 1.3). Em geral, este tipo de minério, foi verificado em testemunhos de sondagem e com apoio da caracterização petrográfica e química pôde-se definir as tipologias presentes no Extremo Norte.

Os teores de Fe, altos e mais elevados que aqueles do minério willemítico da Mina de Vazante (em geral, chegam ao máximo de 10% a 15% de Fe), foram considerados um dos principais parâmetros para a separação dos tipos de minérios willemíticos. Além disso, auxiliaram também na classificação e na distinção de texturas e mineralogia, caracterizadas na caracterização petrográfica. Os tipos de minério refletem as variações do teor de Fe e condições requeridas para o processo de beneficiamento, uma vez que na Mina de Vazante, os limites para o Fe podem chegar ao máximo de 10%.

Portanto, a partir de avaliação geoquímica associada à petrográfica e dados de campo, os tipos de minério foram divididos em minério willemítico rico em ferro (teores de Fe > 20% e Zn > 5%) e willemítico (Fe < 20% e Zn > 5%). O teor de Zn > 5% é também um dos critérios utilizado na alimentação da planta metalúrgica de Vazante.

Além disso, as amostras apresentam-se mais intensamente deformadas, cisalhadas e fraturadas, em relação às amostras da Mina de Vazante, mostrando também forte influência da Zona de Falha de Vazante.

#### **Minério de willemita rico em ferro**

Este tipo de minério é caracterizado pela presença de uma massa de hematita envolvendo os cristais de willemita. Em geral, as amostras apresentam uma textura cataclástica, fraturada, e às vezes com veios anastomosados de hematita cortando os cristais de willemita, dolomita e calcita, estando, portanto bastante deformadas.

Esta tipologia ocorre em profundidades próximas a 200 m, em pacotes pouco espessos, mas contínuos (exemplo do furo MASA56). Em profundidades maiores que 400 m, também ocorre tal tipologia, em geral na borda dos corpos willemíticos com menores teores de ferro ( $\text{Fe} < 20\%$ ), em níveis bastante delgados.

As amostras do minério willemítico rico em ferro são constituídas por hematita (44%), willemita (25%), dolomita e dolomita com ferro (15%) e clorita zincífera (7%). Pequenos cristais de franklinita inclusa em willemita ou hematita, limonita (com conteúdos de Zn, Si e Al) e carbonatos de Fe ocorrem subordinados.

A dolomita forma uma massa ao redor de relíquias de cristais de willemita. Frequentemente, são observados cristais de hematita com hábito acicular e pseudomorfos de magnetita/franklinita imersos em hematita maciça.

Os cristais de willemita prismáticos, fibrosos ou radiados apresentam-se fraturados, corroídos e intensamente substituídos por uma geração de willemita mais fina ou por clorita. Esta última apresenta-se também em veios cortando a massa constituída por hematita. Frequentemente, no contato da willemita com a massa de hematita, ocorrem cristais de limonita.

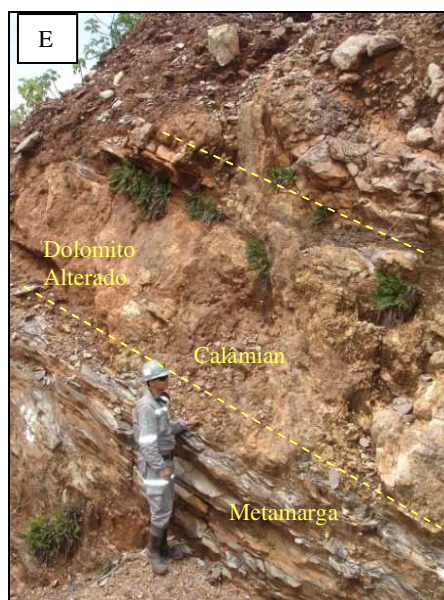
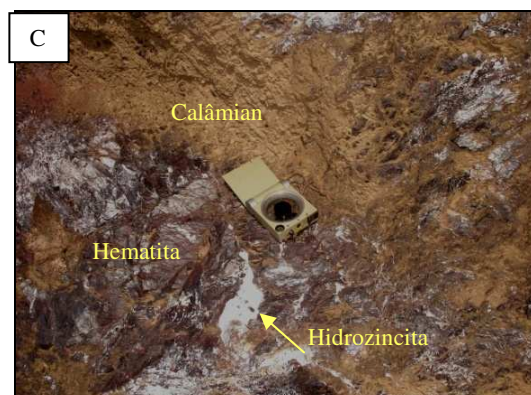
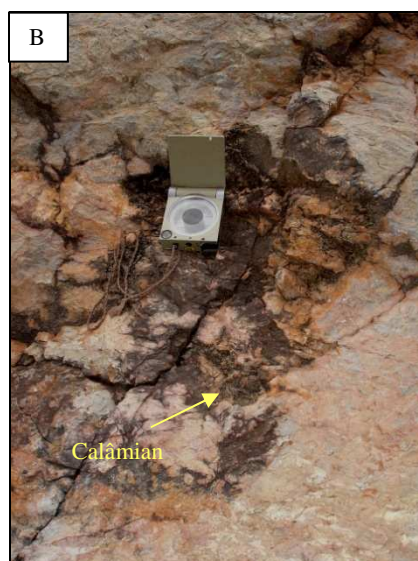
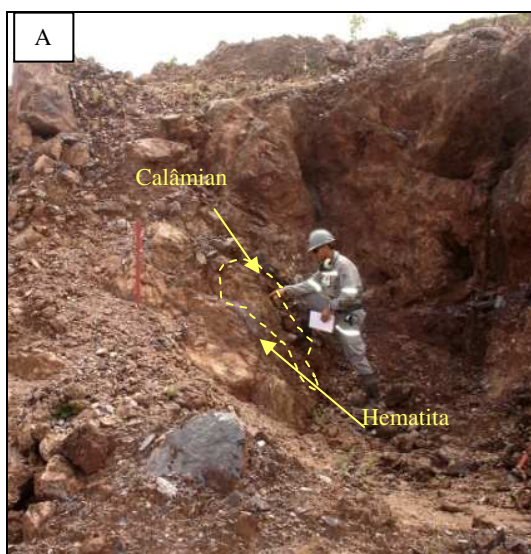
Em raras amostras foram observadas cristais de sulfetos, tais como galena e sulfetos de Cu e/ou Ag. Porém, quando estes estão presentes, ocorrem como pequenas inclusões (50 a  $10\mu\text{m}$ ) na willemita.

### **Minério com willemita**

Em geral, esta tipologia assemelha-se com as encontradas na Mina de Vazante. As amostras são constituídas por willemita (51%), hematita (25%) dolomita/calcita (10%), clorita (6%) e quartzo (2%) com barita, gahnita, covellita, greenockita, monazita, sulfetos de prata (jalpaita-mckinstryita ( $\text{Ag, Cu}_2\text{S}$ ), apatita, galena, franklinita/magnetita, limonita e carbonatos de ferro subordinados. A caracterização dos tipos de sulfetos de Ag presentes nas amostras de minério foi baseada também nas correlações entre estas análises e com outras realizadas com amostras da mina de Vazante.

A partir das descrições petrográficas, foi possível definir três formas de ocorrência da willemita:

- Cristais de willemita granoblásticos, grossos e semelhante aos presentes no minério da Mina de Vazante;
- Cristais fibrorradiais semelhantes aos encontrados na Mina de Vazante;
- Cristais finos de willemita, que substituem cristais grossos e ocorrem nas amostras mais deformadas.



**Prancha 3.5. Tipos de minério com calamina.**

- A.** Corpo de minério com calamina associado a veios de hematita cisalhados. **B.** Calamina preenchendo fraturas em dolomito rosa. **C.** Corpo de minério com calamina rico em Fe que contém hidrozincita, hemimorfita, argilominerais e hematita. **D.** Corpo de minério com calamina intercalado a metamarga. **E.** Detalhe do corpo mostrado em D, que contém hemimorfita e argilominerais.

Nenhum destes tipos de willemita apresenta diferença em sua composição química, que pode ser representada pelo espectro de EDS da Prancha 3.8 – fig. B. Os cristais apresentaram-se puros (Zn, Si e O), ou com ligeira indicação de Fe na estrutura.

Este tipo de minério também mostra-se bastante deformado, apresentando hematita ao longo da foliação milonítica, visível em lamina delgada-polida, e em planos de fraturas. Estes planos comumente deslocam cristais e veios de willemita.

Os cristais de willemita foram observados substituindo a dolomita, com exceção dos fibrorradiais. Em amostras com grau de deformação alto, também se observa a willemita fina e a clorita substituindo cristais também de willemita, grossos e granoblásticos. O silicato de zinco é cortado por veios e vênulas de hematita e carbonatos de Fe (ankerita e ferro dolomita). Em algumas amostras este último pode substituir outros cristais de willemita.

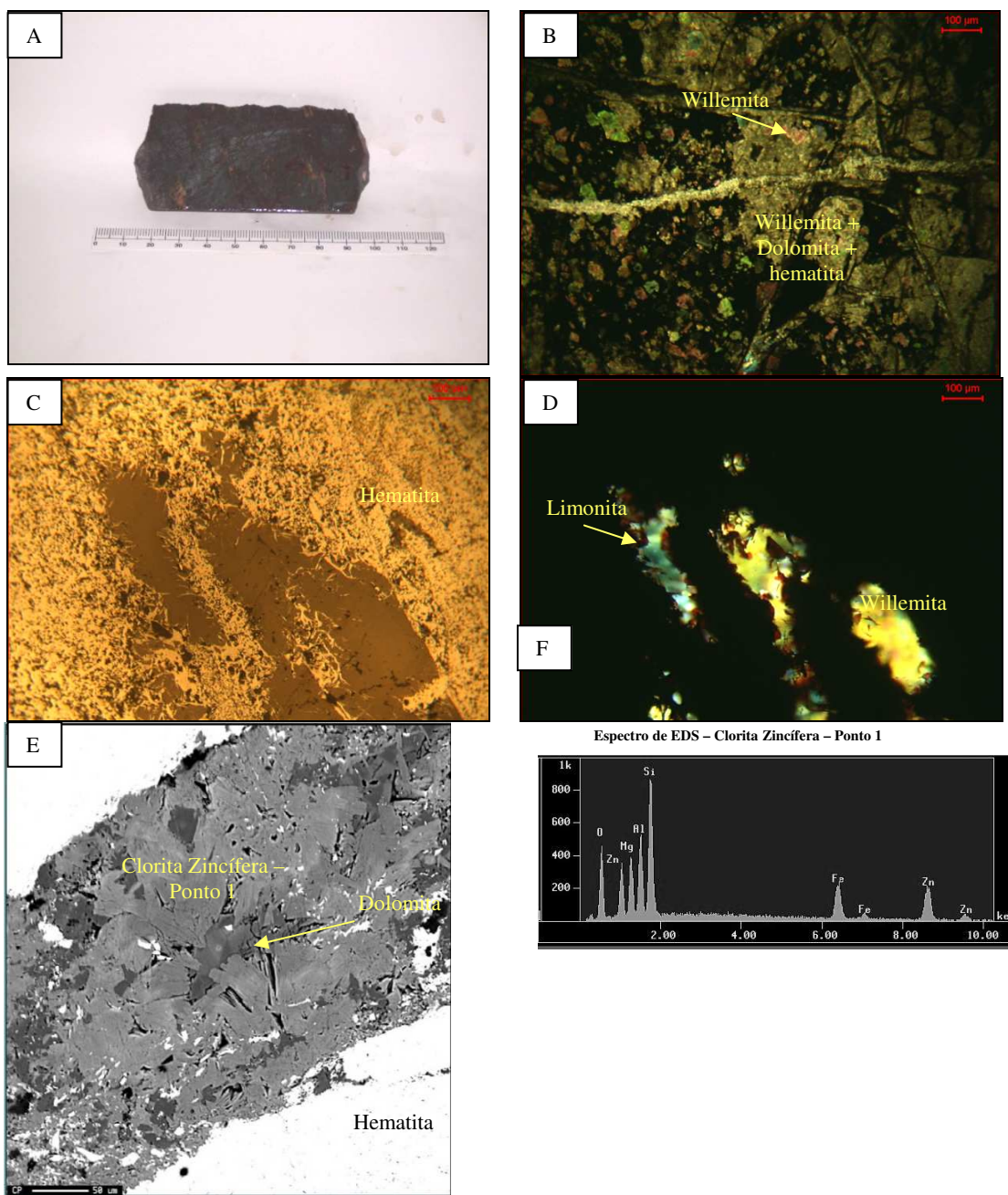
A partir das análises de microscopia eletrônica de varredura, foi possível verificar inclusões de sulfeto, sulfatos, fosfatos e óxidos da ordem de 20 µm em cristais de willemita. Estes minerais ocorrem disseminados nos cristais e são representados por fosfatos de terras raras (monazita), apatita, sulfetos de Ag e Cu, covellita/calcocita, barita, franklinita e galena. Grãos de limonita também ocorrem disseminados ou próximos ao contato da willemita com veios de hematita.

### **3.4. Relação das texturas e fluidos envolvidos**

A caracterização da origem e evolução dos fluidos mineralizantes é de grande importância para compreensão da gênese e, conseqüentemente, para o entendimento dos modos de ocorrência do zinco e seus subprodutos.

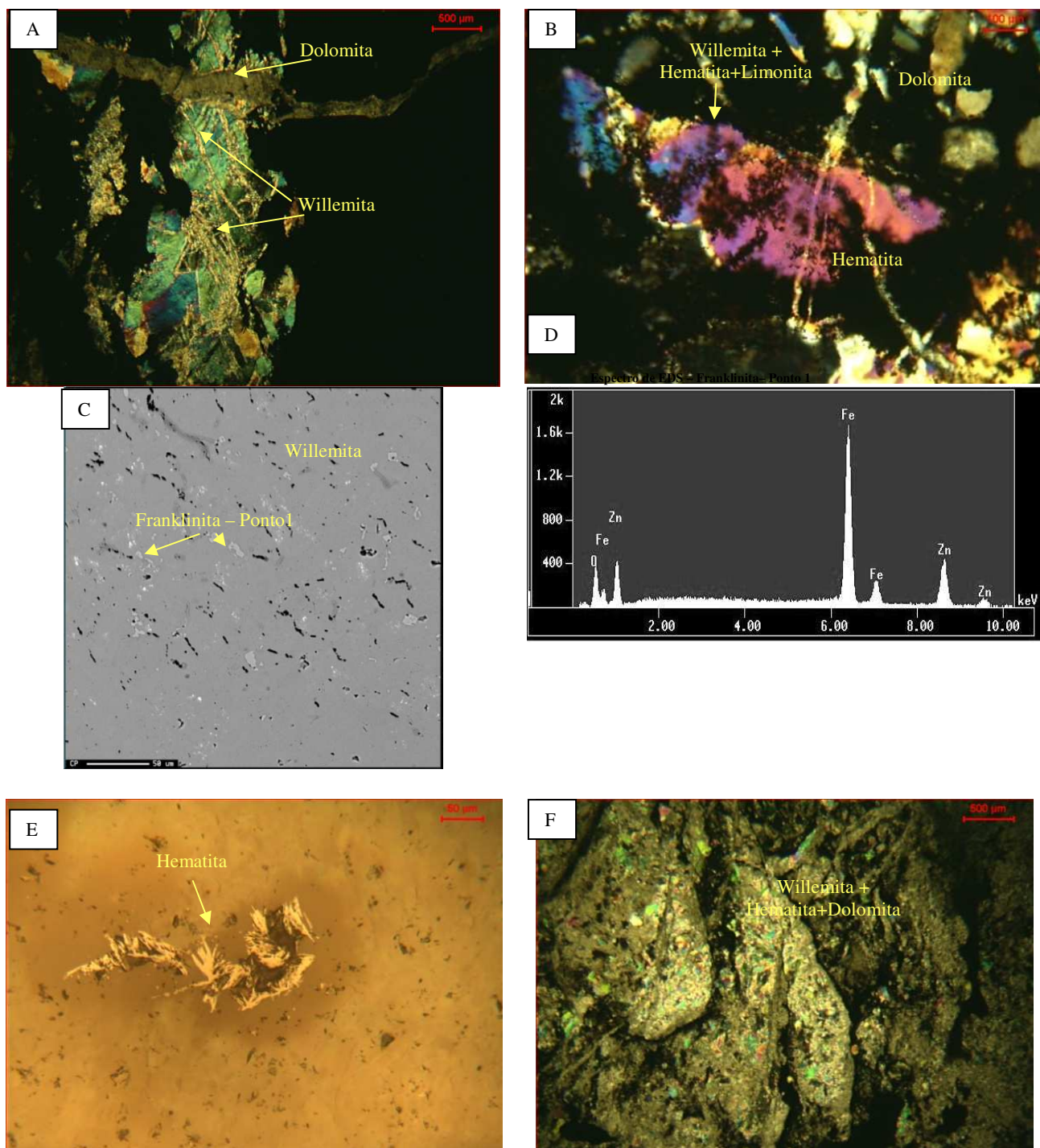
A formação do depósito de Vazante é considerada como relacionada à mistura de um fluido metalífero, e o outro meteórico, resultando em variações de pH, temperatura, salinidade e fugacidade de oxigênio dependendo da proporção de participação de cada fluido durante evolução (Monteiro, 1997; Monteiro *et al.*, 1999). Segundo Appold & Monteiro (2009), em Vazante, o fluido metalífero (*ore fluid*) seria quente, redutor, de alta salinidade, com baixo pH e rico em metais. O fluido meteórico seria frio, com alto pH e oxidante.

A solubilidade da esfalerita e galena é bastante sensível a mudanças de temperatura, o que resulta em precipitação desses minerais com o seu decréscimo. Insensível à temperatura, a solubilidade da willemita é especialmente controlada por mudanças do pH.



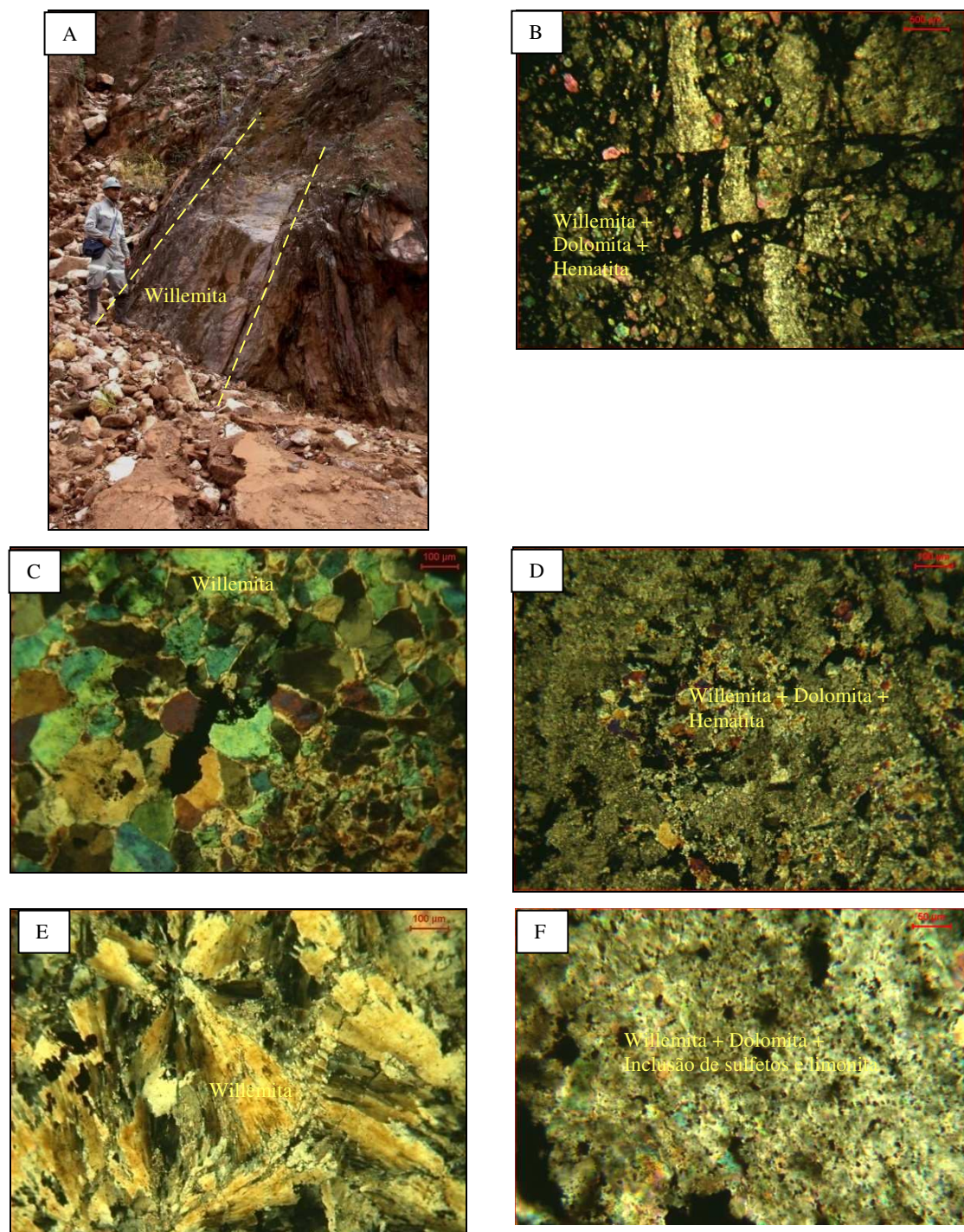
Prancha 3.6. Tipos de minério com willemita e rico em ferro.

A. Amostra de testemunho de sondagem do minério willemítico rico em Fe – Amostra MAS20. B. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de lâminas polida da amostra MAS20 – A hematita (opaca) ocorre corroendo cristas de willemita. Observa-se também massa de carbonatos e willemita de granulação mais fina sendo também corroídas por massa de hematita. No centro da imagem ocorrem vênulas de carbonatos (Escala 100 µm). C. Imagem em luz refletida de massa de hematita ao redor de cristais reliquiais de willemita (Escala 100 µm). D. Imagem anterior, porém em luz transmitida com polarizadores cruzados. Destaque para limonita na borda dos cristais de willemita (Escala 100 µm). E. Microveio preenchido por clorita zincífera e carbonatos (Escala 50 µm). F. Espectro de EDS da clorita zincífera da imagem a esquerda.



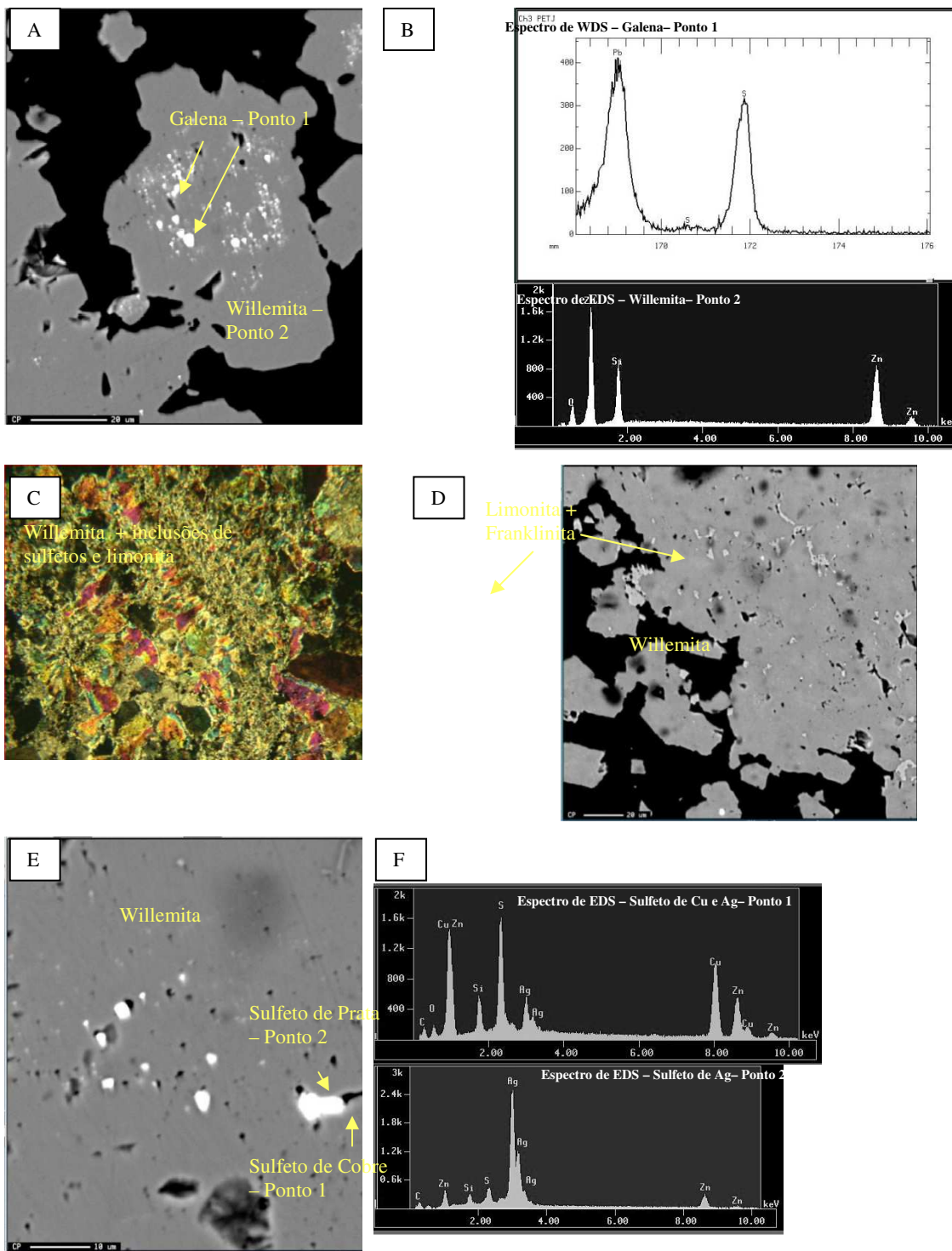
Prancha 3.7. Tipos de minério de willemita e rico em ferro.

A. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de cristais reliquias de willemita. Esta última aparece substituída por outra fase willemítica mais fina e está imersa em massa de hematita (Escala 500 µm). B. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de cristais de willemita com inclusões de limonita e bordejado por hematita (Escala 100 µm). C. Imagem de elétrons retroespalhados de microcristais de franklinita imersos em willemita (Escala 50 µm). D. Espectro de EDS da franklinita. E. Imagem em luz refletida de agregado acicular de hematita (Escala 50 µm). F. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de *pods* de willemita bordejados por hematita (Escala 500 µm).



**Prancha 3.8. Tipos de minério com willemita.**

**A.** Lente de willemita aflorante na cava 5A. **B.** Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de microveio de willemita e dolomita falhado e deslocado por microfalhas de hematita. O opaco é a hematita (Escala 500  $\mu\text{m}$ ). **C.** Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de cristais de willemita granoblástica (Escala 100  $\mu\text{m}$ ). **D.** Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de willemita fina substituindo cristais mais grossos de willemita (Escala 100  $\mu\text{m}$ ). **E.** Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de cristais fibrorradiados de willemita (Escala 100  $\mu\text{m}$ ). **F.** Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de massa willemítica com inclusão de microcristais de limonita, franklinita e sulfetos (Escala 50  $\mu\text{m}$ )

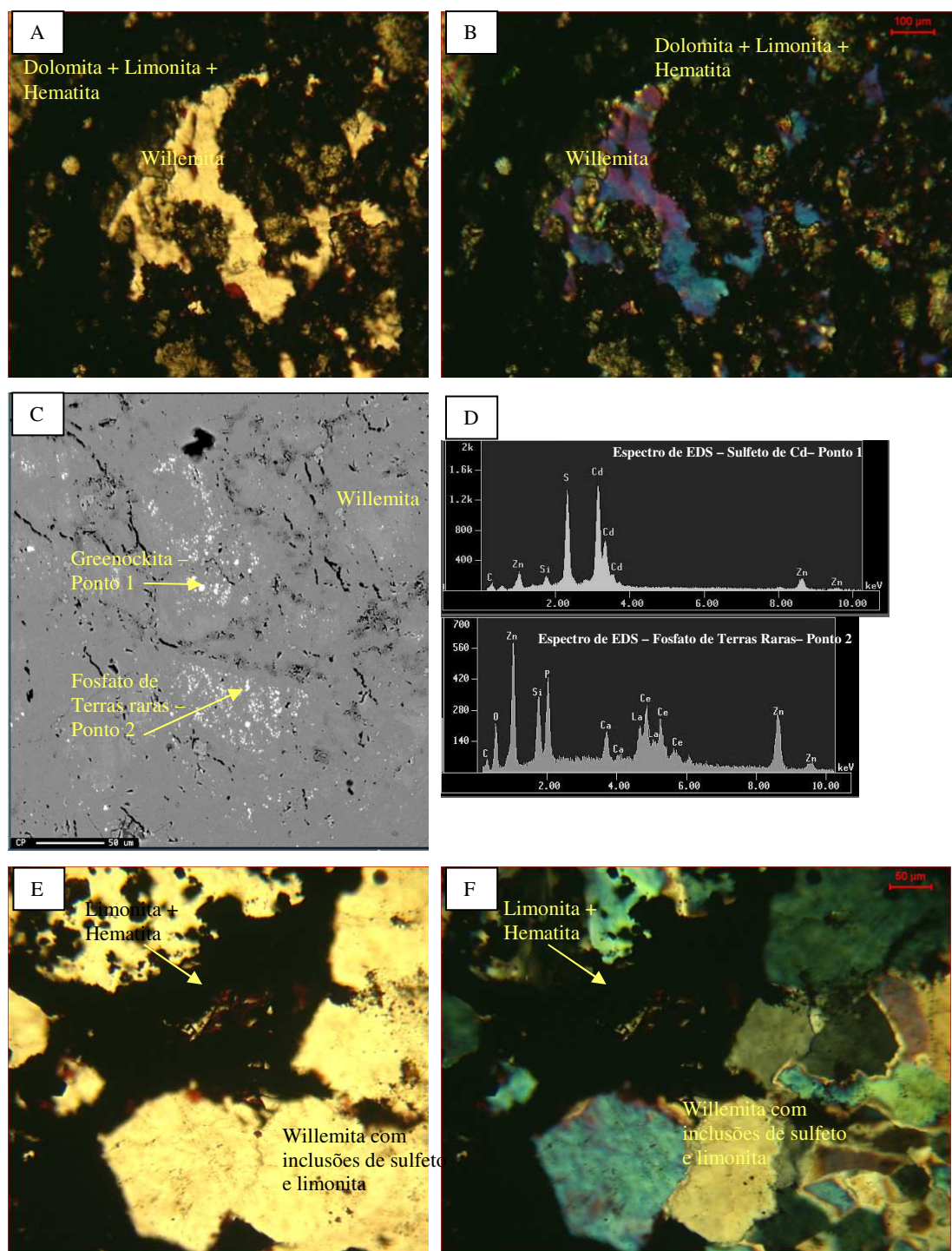


**Prancha 3.9. Tipos de minério com willemita.**

**A.** Imagem de elétrons retroespalhados de willemita inclusa por micro cristais de galena (Escala 20  $\mu\text{m}$ ) . **B.** Espectro de WDS e EDS da willemita e galena. **C.** Imagem de luz transmitida com polarizadores cruzados de cristais de willemita granoblástica e fina inclusa por micro cristais de sulfetos, limonita e franklinita (Escala 100  $\mu\text{m}$ ). **D.** Imagem de elétrons retroespalhados de willemita inclusa por micro cristais de franklinita. No contato com hematita ocorre limonita e franklinita (Escala 20  $\mu\text{m}$ ). **E.**

Imagem de elétrons retroespalhados de willemita inclusa por micro cristais de sulfetos de cobre e prata (Escala 10  $\mu\text{m}$ ). **F.**

Espectro EDS dos sulfetos de Cu e prata.



**Prancha 3.10. Tipos de minério com willemita**

A. Imagem em luz transmitida mostrando resquícios de cristais de willemita em massa constituída por dolomita e hematita (Escala 100  $\mu\text{m}$ ). A limonita encontra-se na borda da willemita. B. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados da fotomicrografia A (Escala 100  $\mu\text{m}$ ). C. Imagem de elétrons retroespalhados de willemita inclusa por microcristais de greenockita e fosfato de terras raras (Escala 50  $\mu\text{m}$ ). D. Espectro EDS da greenockita e fosfato de terras raras. E. Imagem de luz transmitida de cristais de willemita granoblástica envolvida por hematita e limonita (Escala 50  $\mu\text{m}$ ). F. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados da fotomicrografia E (Escala 50  $\mu\text{m}$ ).

Nos primeiros estágios da mistura, formaram-se principalmente esfalerita e galena com willemita apenas subordinada, pois teria ocorrido diminuição na temperatura do fluido metalífero, sem significativa mudança de pH (Appold & Monteiro, 2009). Com maior participação do fluido meteórico, o aumento do pH favoreceria a deposição da willemita (Figura 3.6 -A) em relação à esfalerita, no intervalo de temperatura entre 150 e 250 °C, condizente com o estimado para o estágio mineralizante em Vazante a partir de isótopos estáveis (Monteiro, 1997; Monteiro et al., 1999) e inclusões fluidas (Monteiro, 2002).

Em amostras da Mina Extremo Norte de Vazante, a ocorrência de sulfetos ou sulfossais de Ag e Cu é raramente observada. Estes quando presentes estão na forma de pequenas inclusões na massa willemítica, diferentemente do depósito de Vazante, onde é possível verificar corpos sulfetados, constituídos por esfalerita com galena subordinada, centimétricos a métricos, imbricados nos willemíticos (Monteiro, 1997). A presença da associação mineral quartzo-willemita-franklinita é observada em amostras semelhantes a algumas amostras do depósito de Vazante, que também não apresentam esfalerita. A assembléia descrita pode ser visualizada no diagrama  $\text{SiO}_2\text{-ZnO-FeO}$  (Figura 3.6-B). Além disso, em algumas amostras, a hematita é o mineral mais abundante, o que sugere que as condições fluidais foram bastante oxidantes.

Na Figura 3.6, é possível visualizar as condições favoráveis para formação da willemita. No gráfico (Brugger, 2003), a willemita precipitaria em condições de pH neutro, oxidantes (acima da linha de estabilidade da magnetita-hematita) e em temperaturas superiores a 100 °C, mas inferiores a 300 °C.

Em Vazante a deposição da esfalerita teria sido controlada por mudanças bruscas de temperatura e a deposição de willemita concentrada na interface entre o fluido metalífero quente e o fluido local, residente, de origem meteórica.

Como a participação de fluidos metalíferos e meteóricos seria também provável no caso do Extremo Norte, as condições físico-químicas resultantes do processo de mistura ideais para a formação do minério willemítico seriam aquelas de pH neutro a básico, resultante da maior participação de fluidos meteóricos já aquecidos ou do tamponamento devido às reações com as rochas carbonáticas, sem decréscimo acentuado de temperatura. Tais condições seriam também favoráveis à formação de zincita e, possivelmente, da franklinita que ocorre associada com a willemita

Acredita-se também, que a hematita, possivelmente foi precipitada em quantidades significativas em estágios tardios em relação à formação da willemita, sendo possível observar, em

amostras, tais como a MASA56, a hematita envolvendo e consumindo toda a massa de willemita e carbonatos (Prancha 3.5 e 3.6).

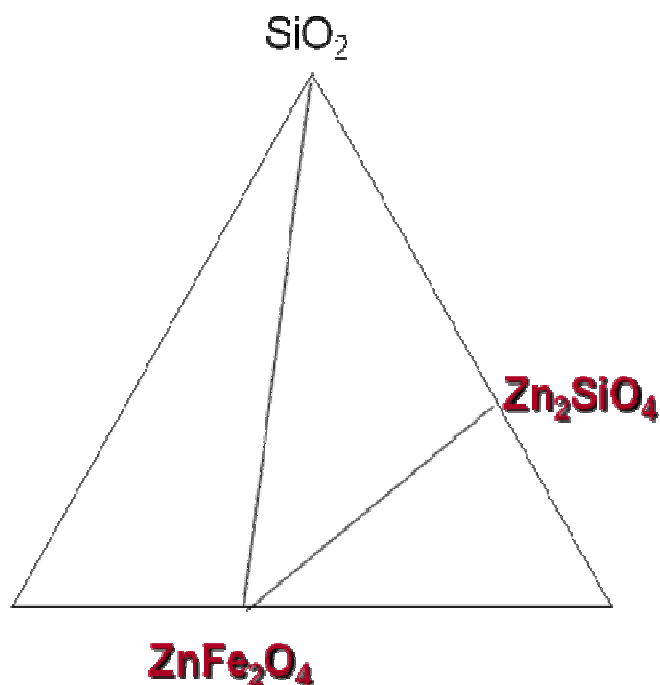
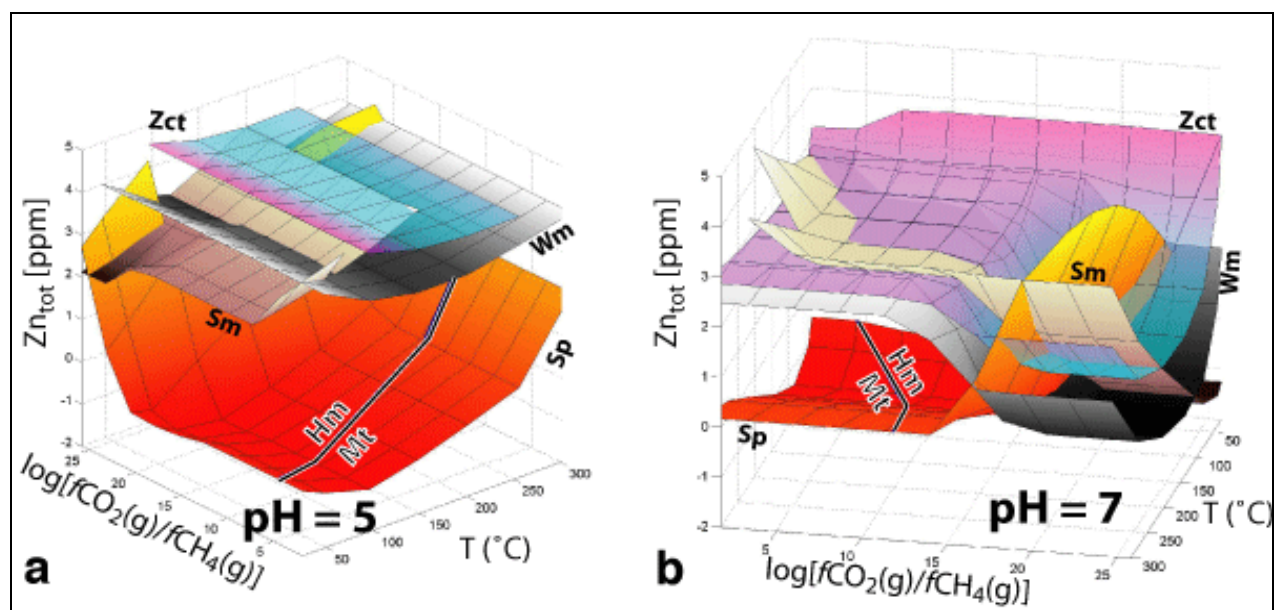


Figura 3.6. Diagrama mostrando solubilidade da esferulita, willemita, smithsonita e zincita em função da temperatura e condições redox: a) condições ácidas (pH = 5) e b) neutras (pH = 7). Escala redox é expressa em unidades de  $\log (f\text{CO}_2(\text{g})/f\text{CH}_4(\text{g}))$  (Brugger *et al.*, 2003) e c) diagrama  $\text{SiO}_2\text{-ZnO-FeO}$  (modificado de Monteiro, 1997).

### **3.5. Caracterização geoquímica**

#### **3.5.1. Rocha Hospedeira Alteradas**

As rochas que hospedam o minério do Extremo Norte são representadas por brechas hidrotermais e metadolomitos deformados.

Essas rochas apresentam teores médios de Zn e Fe de 2,0% e 25%, respectivamente, e razão média Ca/Mg igual a 1,96. Na Mina de Vazante esta razão é 1,43 (Monteiro, 1997) mostrando que a hospedeira do Extremo Norte é relativamente empobrecida em Mg.

A partir da análise petrográfica e geoquímicas foi possível dividir dois tipos de brechas, sendo uma enriquecida em ferro (teores de Fe > 20%), constituída principalmente por hematita, e outra, de coloração avermelhada, semelhante às encontradas na Mina de Vazante, com menor conteúdo de ferro (teores de Fe < 20% e composta por clorita, quartzo e minerais carbonáticos).

As comparações realizadas entre brechas hidrotermais (brecha rica e pobre em Fe) e metadolomitos não alterados mostram, em geral, enriquecimento em Fe, Zn e Pb e diminuição relativa dos conteúdos de Ca, Mg e Al (Figura 3.7) nas brechas. Tais mudanças evidenciam a dissolução dos minerais carbonáticos e a formação de minerais hidrotermais que incorporam Fe, Zn e Pb.

A brecha pobre em Fe também é mais enriquecida em Pb que a brecha rica em Fe, sugerindo interações com os fluidos hidrotermais em condições relativamente diferentes na substituição das hospedeiras da mineralização. Em geral, o conteúdo de Fe presente em ambos os tipos de brechas relaciona-se à formação de hematita e, em menor quantidade, de franklinita, limonita, carbonatos de Fe e magnetita. O Pb aparece em sulfetos, tal como a galena, enquanto o zinco pode ser incorporado aos minerais carbonáticos hidrotermais e na willemita.

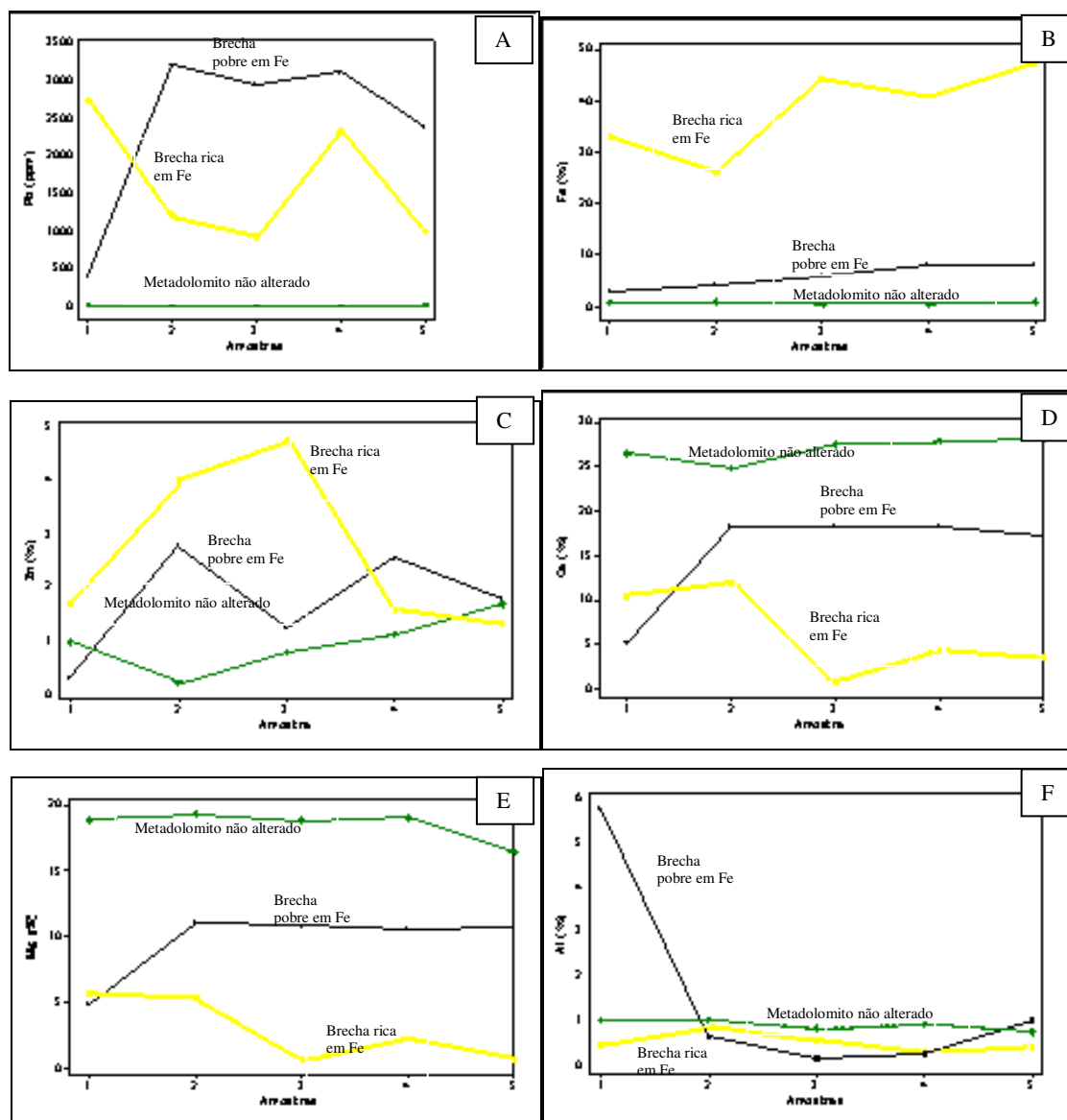
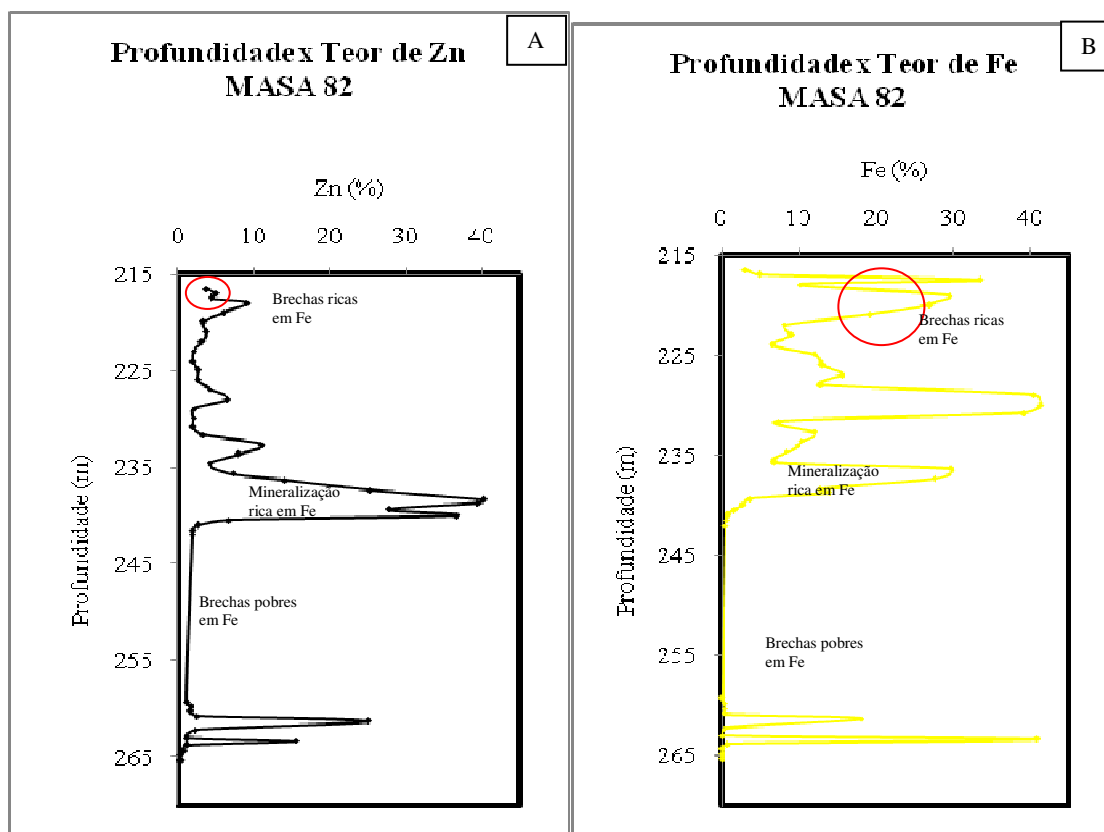


Figura 3.7. A Gráfico tipo *spider* mostrando enriquecimento de Pb das rochas hospedeiras pobre em Fe em relação aos metadolomititos não alterados e brecha rica em Fe. B. Gráfico tipo *spider* mostrando enriquecimento de Fe nas rochas hospedeiras ricas em Fe em relação ao metadolomito e brecha pobre em Fe. C. Gráfico tipo *spider* mostrando enriquecimento de Zn nas brechas em relação ao metadolomito não alterado. D. Gráfico tipo *spider* mostrando empobrecimento de Ca nas brechas em relação ao metadolomito não alterado. E. Gráfico tipo *spider* mostrando empobrecimento de Mg das rochas hospedeiras em relação ao metadolomito não alterado. F. D. Gráfico tipo *spider* mostrando leve empobrecimento de Al das rochas hospedeiras em relação ao metadolomito não alterado.

As ocorrências das brechas ricas em Fe também são relacionadas com a profundidade, sendo de ocorrência comum em níveis próximo a 200 m ou em fechamento de lentes de willemita em profundidades maiores que 200 m (Figura 3.8). As brechas com menor teor de Fe e os metadolomititos alterados são comumente observadas em profundidades superiores a 300 metros e aparecem em pacotes mais contínuos.



**Figura 3.8. Distribuição do Zn (A) e Fe (B) nos corpos de minério e rochas hospedeiras (brechas ricas e pobres em ferro) em relação à profundidade (Furo MASA82).**

As amostras que representam as brechas hidrotermais, principalmente as pobres em ferro, mostram certa correlação positiva do Al com Ti, K, La, Li, Rb e Zr. Tal fato demonstra a presença destes elementos em componentes detríticos e seus produtos metamórficos ou autigênicos, tais como argilo-minerías, filossilicatos feldspato, etc. O mesmo pode ser observado para as amostras mineralizadas nos diagramas Al vs. Zr, Ti, Rb e K, enquanto que nos diagramas do Al vs. Li não se observa nenhuma correlação clara (Figura 3.9).

Em relação ao conteúdo de SiO<sub>2</sub>, nas brechas não são observadas correlações com elementos de contribuição clástica, exceto possivelmente o Al. Nestes diagramas binários é notável o maior conteúdo de SiO<sub>2</sub> associado à mineralização, decorrente da dissolução dos minerais carbonáticos e precipitação do silicato de zinco (Figura 3.10). Portanto o SiO<sub>2</sub> marca claramente campos de diferenciação entre as amostras das rochas hospedeiras, representadas pelas brechas, e das amostras mineralizadas. O enriquecimento em SiO<sub>2</sub> nas brechas é progressivo, isto é, define um mesmo *trend* de enriquecimento.

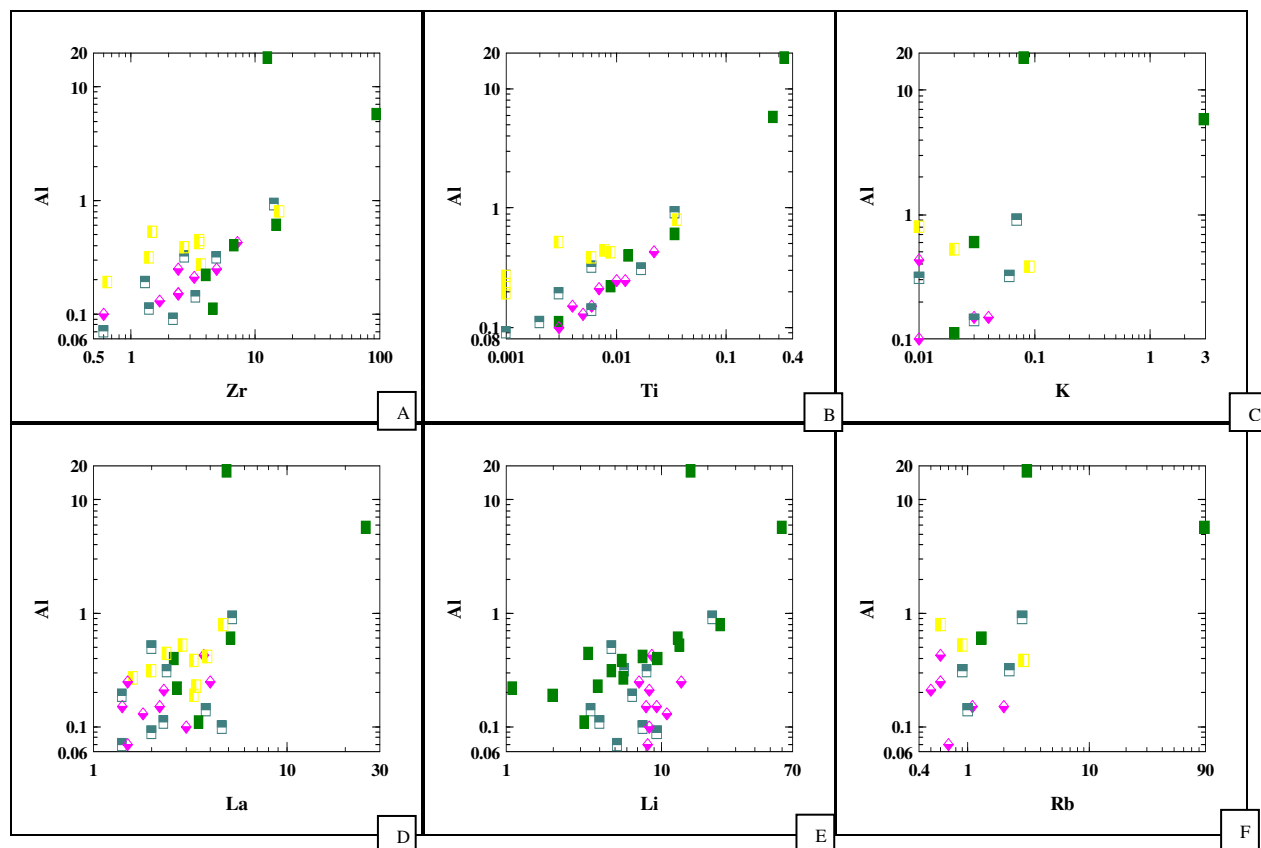


Figura 3.9. Correlação entre Al (ppm) e: A. Zr (ppm). B. Ti (ppm). C. K (ppm). D. La (ppm). E. Li (ppm). F. Rb (ppm).  
 Legenda: ■ Brechas pobres em Fe, ■ Brechas ricas em Fe, ■ Mineralização rica em Fe e ◆ Mineralização pobre em Fe.

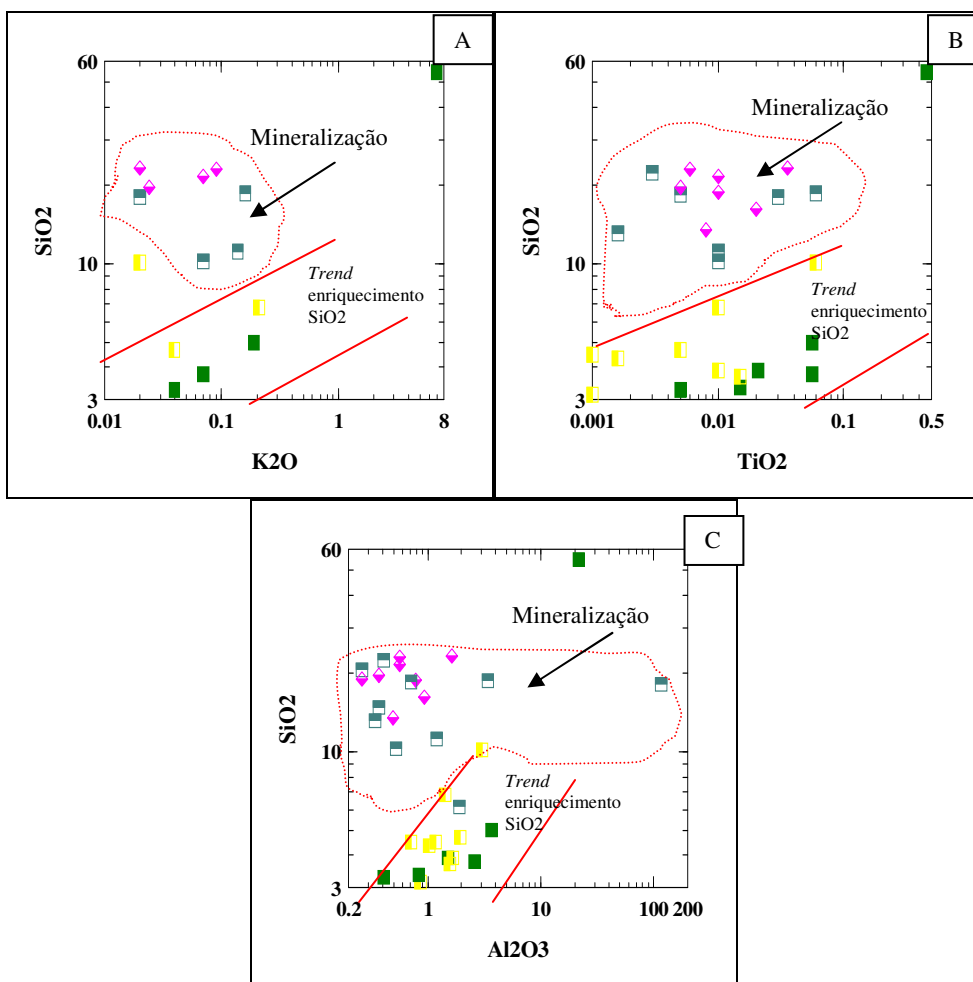


Figura 3.10. Correlação entre  $\text{SiO}_2$  (%) e: A.  $\text{K}_2\text{O}$  (ppm). B.  $\text{TiO}_2$  (ppm). C.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ppm). Legenda: ■ Brechas pobres em Fe, ■ Brechas ricas em Fe, ■ Mineralização rica em Fe e ◆ Mineralização pobre em Fe.

### 3.5.2. Mineralização

As rochas mineralizadas ricas em Fe apresentam teores médios de Fe e Zn iguais a 30 e 19%, respectivamente, enquanto a willemítica apresenta conteúdos médios de 15% de Fe e 36% de Zn (Figura 3.11).

Em geral, quando se compara a mediana dos resultados das amostras mineralizadas (independente do teor de Fe) com as brechas e metadolomitos deformados, observa-se que os enriquecimentos em Pb, Ni, P e Fe foram semelhantes, porém, nas porções mineralizadas, existe uma elevação nos teores de Ag, Cr, Cu e Ba (Figura 3.12). Portanto, estes últimos, passam a ser importantes na definição da assinatura geoquímica do minério willemítico.

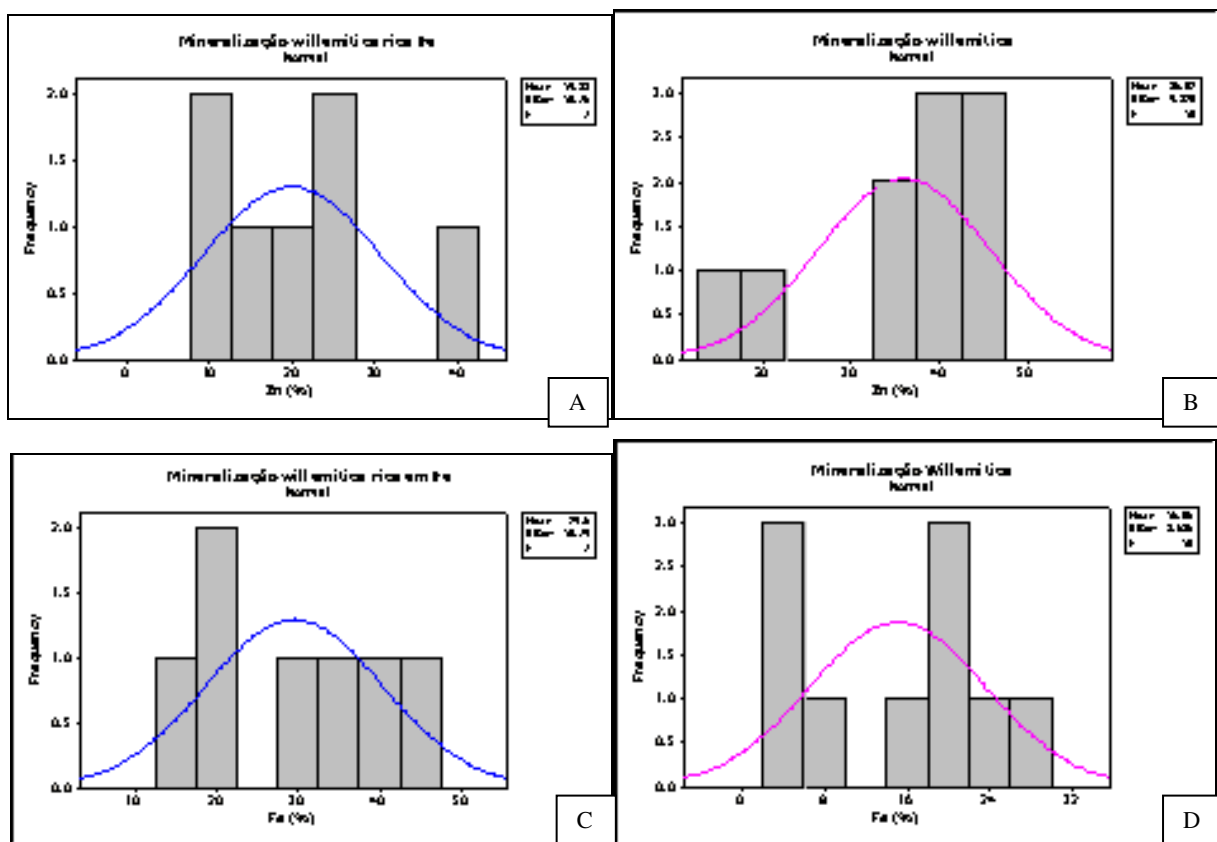


Figura 3.11 A. Histograma de Zn (%) das amostras willemíticas ricas em Fe. B. Histograma de Zn (%) das amostras willemíticas. C. Histograma de Fe (%) das amostras willemíticas ricas em Fe. D. Histograma de Fe (%) das amostras willemíticas.

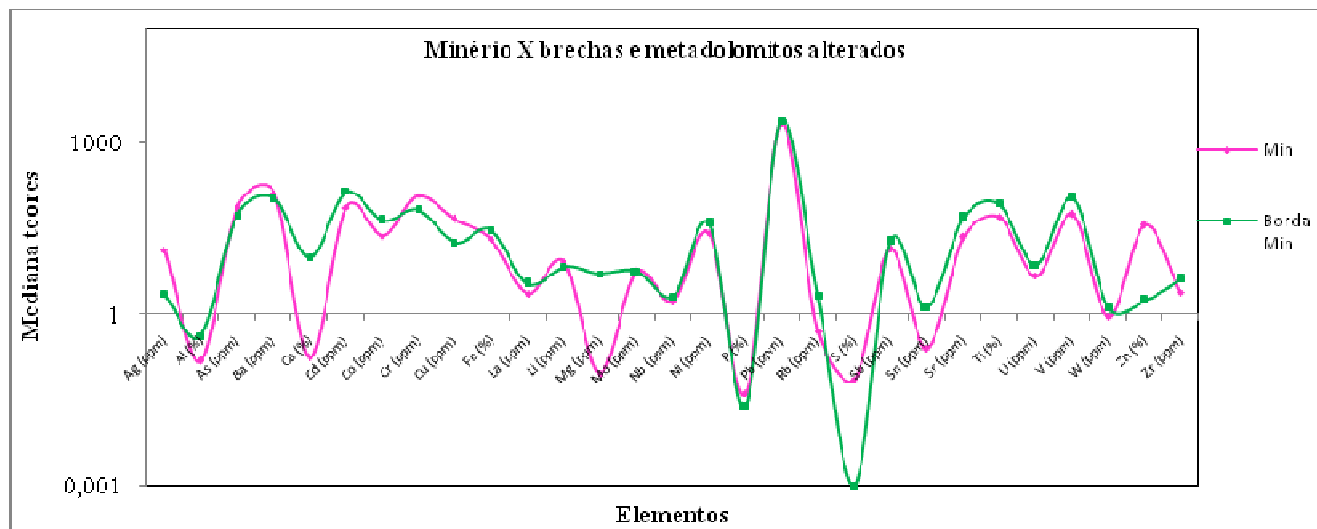


Figura 3.12. Comparação entre as medianas dos elementos das brechas/ metadolomitos alterados e amostras de minério (elementos em ppm).

Separando as amostras pelo mesmo critério usado na caracterização mineralógica, observa-se que a correlação entre os elementos apresentam, em geral, a mesma tendência para as duas tipologias. Para o minério pobre em Fe (Zn > 5 % e Fe < 20 %), pode-se verificar que os elementos

Ag, Cd, Cu e Zn são importantes para a definição de assinaturas geoquímicas (Figura 3.13). Os elementos Ag, Cd e Zn estão relacionados a sulfetos presentes em finas inclusões nas massas de willemita, enquanto o Zn ocorre predominantemente no silicato de Zn.

Para minérios com Fe > 20%, Mn, Ni, e Cr se destacam. O Mn e V são associados a principalmente a presença da hematita, enquanto o Cr à presença da franklinita e, subordinadamente, magnetita.

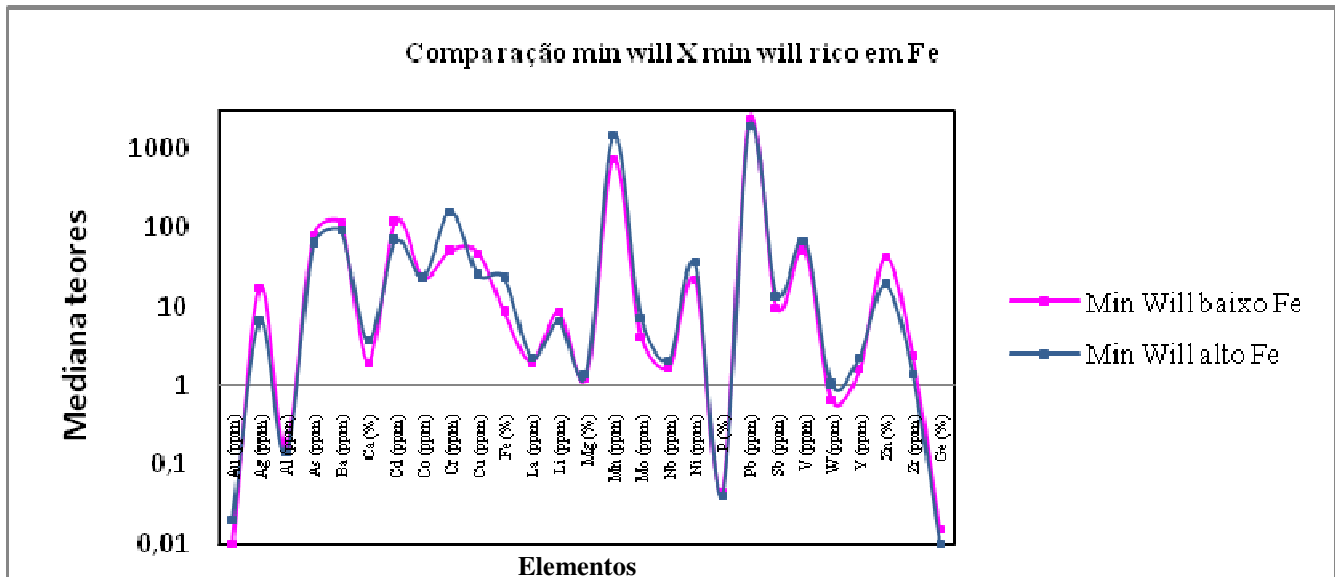


Figura 3.13. Comparação entre as medianas das amostras de minério ricas e pobres em Fe (elementos em ppm).

Para ambos os tipos de minérios, observa-se correlação positiva do Zn com Si devido à influência dos fluidos mineralizantes, rico nesses elementos. Além disso, também são verificadas correlações negativas do Zn com Fe e Ca, sendo que com este último a relação é clara apenas para amostras de minério rico em Fe (Figura 3.14). Em geral, esta relação negativa, assim como a mineralogia, sugere que o enriquecimento em Fe foi posterior à mineralização willemítica (Prancha 3.7-B). Os diagramas ZnO vs SiO<sub>2</sub> e Zn vs Cr marcam a diferenciação entre os dois tipos de minério.

Os diagramas bivariantes mostram correlação positiva do Cd com Mg, tanto nas amostras de minério ricas em ferro como nas demais (Figura 3.15). O As, por sua vez, apresenta correlação negativa com Ca, e positiva com o Pb (Figura 3.15). Tal relação negativa pode ser explicada pela substituição dos carbonatos pelo fluido mineralizante que continha metais, incluindo Pb e As. A correlação positiva está relacionada possivelmente à incorporação do As em sulfetos de Pb, como a galena.

Pelo diagrama ternário entre Fe, Zn e Cr (Figura 3.16), é possível a distinção entre os tipos de minérios, onde um apresenta semelhança química com minérios da Mina de Vazante de profundidades acima de 300 m (com sulfetos e willemita – MASA120) e outro em profundidades próximas a 200 m, ricos em Fe e com conteúdos de Cr, como encontrado na porção sul da Mina de Vazante (hematita, clorita zincífera e requícios de willemita – MASA56), como apresentado na Figura 3.17.

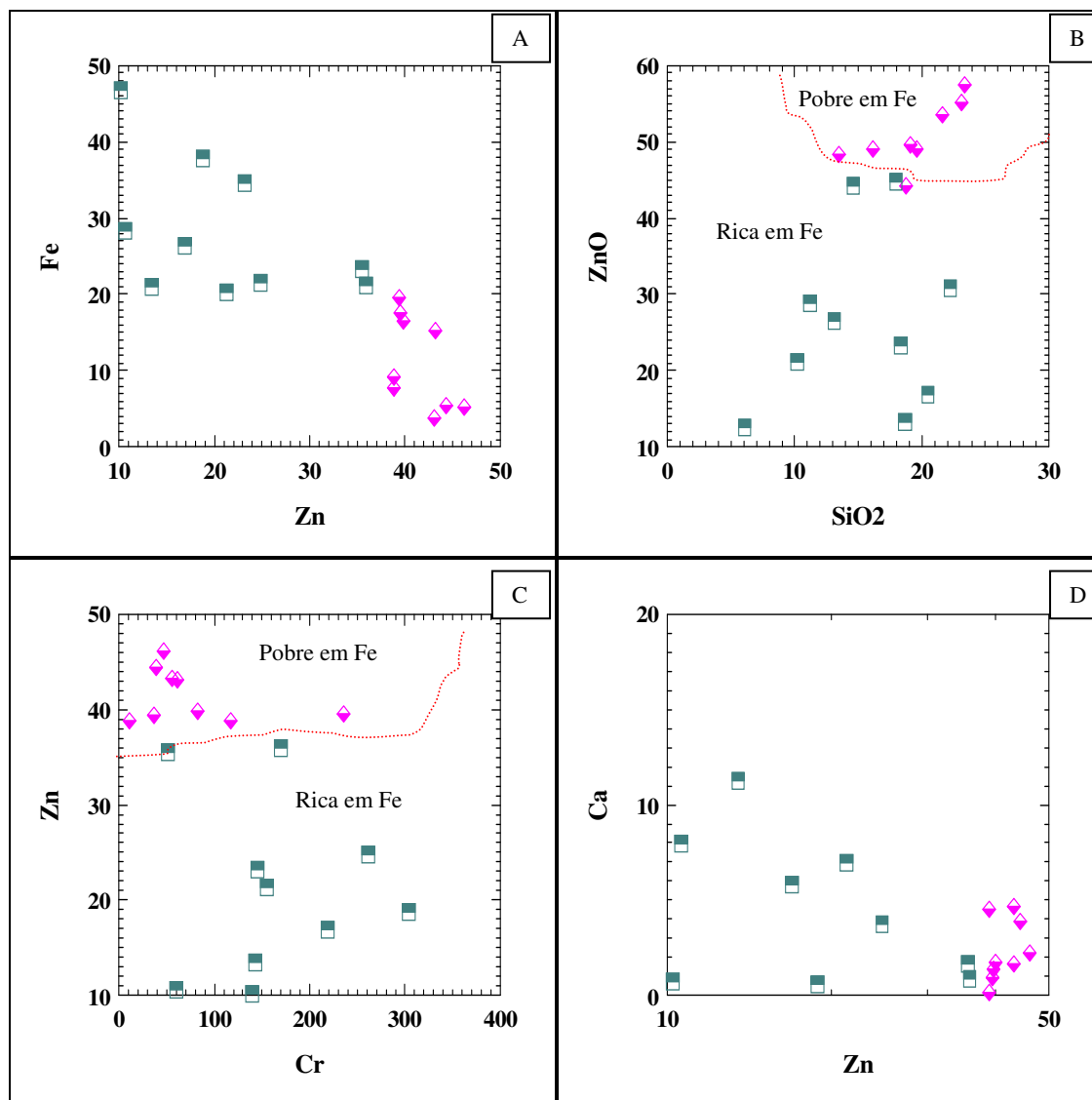


Figura 3.14. Correlação entre: A. Fe vs Zn (%). B. ZnO vs. SiO<sub>2</sub>(%). C. Zn (%) vs Cr (ppm). D. Ca vs Zn (ppm).  
Legenda Mineralização rica em Fe ■ e Mineralização pobre em Fe ♦.

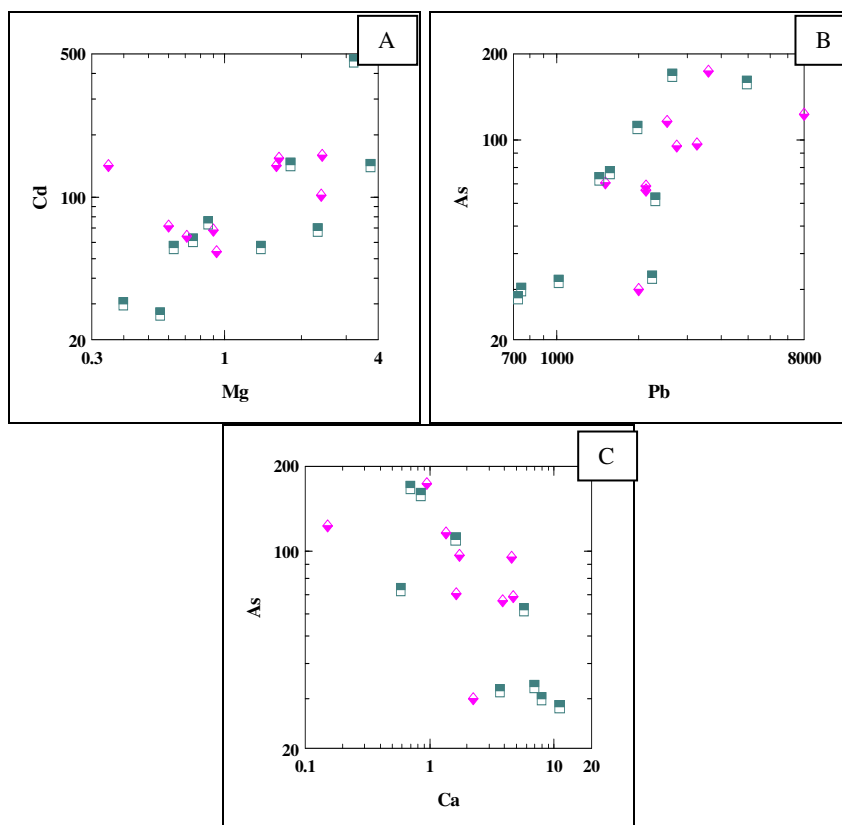


Figura 3.15. Correlação entre A. Ca vs Mg (ppm). B. As vs Pb (ppm). C. As vs Ca (ppm). Legenda Mineralização rica em Fe ■ e Mineralização pobre em Fe ◆.

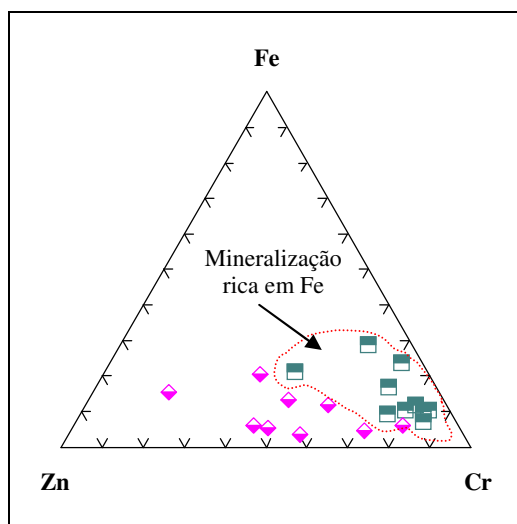


Figura 3.16. Diagrama ternário Fe vs Zn vs Cr mostrando diferenciação entre os tipos de minério (ppm). Legenda Mineralização rica em Fe ■ e Mineralização pobre em Fe ◆.

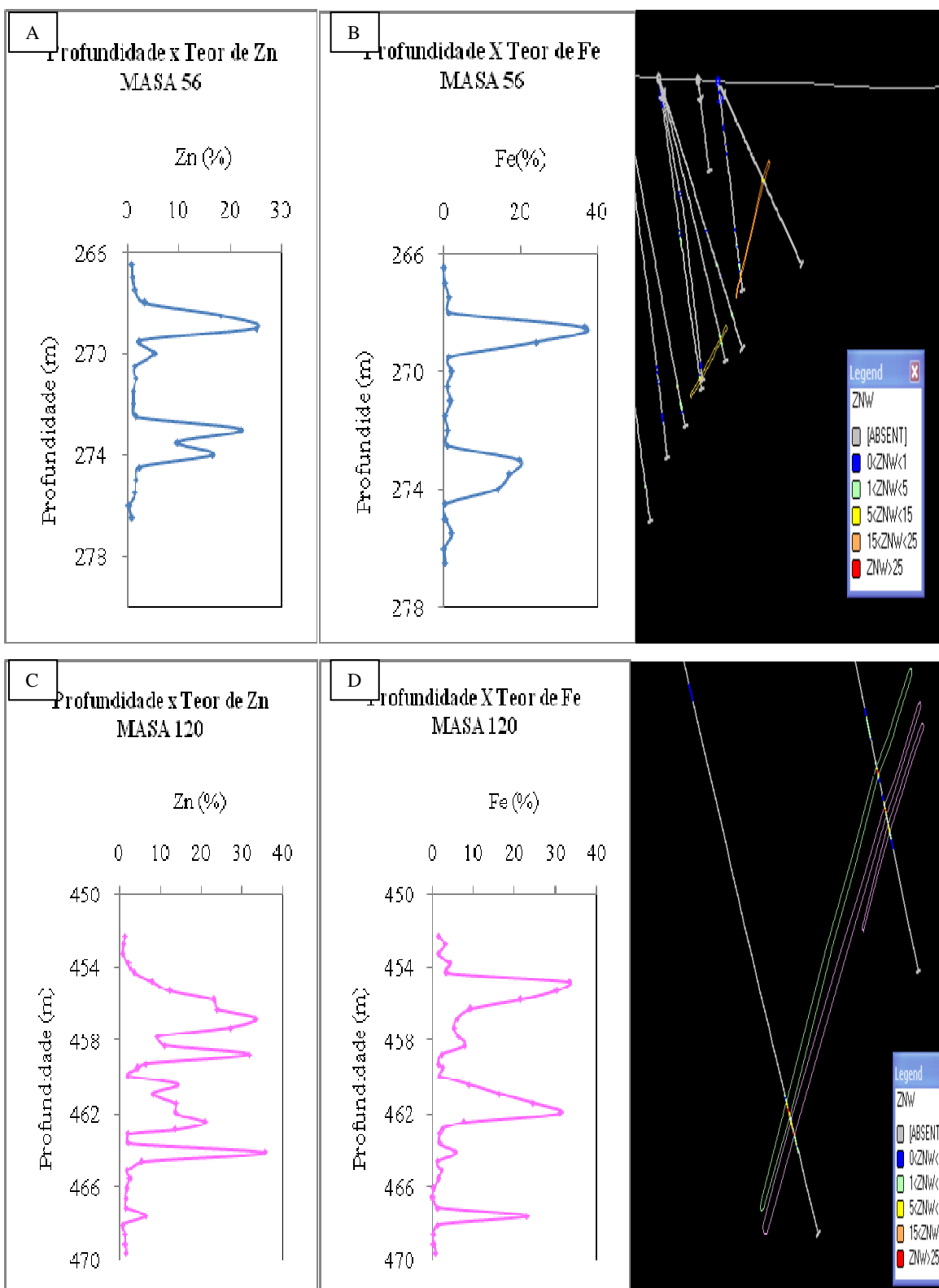


Figura 3.17. Variação da razão Zn e Fe de acordo com a profundidade. A e B) minério rico em Fe e C e D) minério pobre em Fe.

#### 4. Caracterização tecnológica dos subtipos de minério com willemita do Extremo Norte

Para caracterização tecnológica dos tipos de minérios com willemita foram escolhidas duas alíquotas de amostras referentes à classificação usada na petrografia: Masa124 (minério willemítico) e Masa115 (minério willemítico rico em Fe). O objetivo principal desse estudo foi à caracterização da distribuição granuloquímica e, conseqüente, definição das características dos grãos, suas associações e estimativa dos minerais presentes, bem como a liberação da willemita de acordo com os subtipos definidos.

Neste estudo a análise química por fração foi representada apenas pelos elementos Zn, Fe, Al, Pb, Ag, Cu, Cd, S e pelos óxidos CaO e MgO. O motivo da escolha desses é diretamente relacionado com a influência que exercem nas etapas de tratamento e metalurgia.

Conforme citado sucintamente no item 1.1, os finos gerados pelos carbonatos, argilo-minerais e/ou óxido/hidróxido de ferro podem ser os principais formadores de um efeito conhecido por *slime coating*, por isso torna-se interessante analisar CaO, MgO, Fe e Al. Além disso, a presença de quantidades elevadas de minerais carbonáticos pode ser deletéria ao processo metalúrgico de Três Marias, devido à produção excessiva de CO<sub>2</sub>, gerando espumas na autoclave com bolhas que podem chegar a 3,5 cm de diâmetro, quando normalmente apresentam-se com tamanho em torno de 0,5 cm.

A relação entre os grãos de willemita e hematita podem afetar os processos de liberação, tais como britagem e a moagem, principalmente se o ferro ocorre em teores acima de 10%.

A presença de sulfetos em quantidades elevadas pode influenciar negativamente a recuperação do Zn, dificultando a interação entre os reagentes e o silicato de Zn. Porém, é importante também ressaltar que ao estudar a forma de ocorrência destes sulfetos, entendendo melhor a distribuição e associação destes contaminantes, pode-se até caracterizá-los como possíveis subprodutos potenciais do Zn. No minério da Mina Extremo Norte, os principais sulfetos identificados por petrografia foram sulfetos de Cu, Ag, Pb e Cd.

A composição química das amostras estudadas está disposta na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1. Composição química das amostras de minério willemítico usadas em ensaios tecnológicos.**

| Amostra  | Zn (%) | Fe (%) | Al (%) | CaO (%) | MgO (%) | S (%) | Ag (ppm) | Cd (ppm) | Cu (ppm) | Pb (ppm) |
|----------|--------|--------|--------|---------|---------|-------|----------|----------|----------|----------|
| Masa 115 | 23,22  | 34,61  | 0,32   | 2,38    | 1,32    | 0,05  | 18,00    | 56,80    | 46,06    | 1576     |
| Masa 124 | 39,50  | 14,61  | 0,10   | 1,95    | 1,04    | 0,08  | 40,00    | 64,00    | 42,30    | 2530     |

A amostra Masa115 apresenta menor teor de Zn e maior de Fe, sendo que pela mineralogia e textura é classificado como subtipo de minério com willemita e rico em Fe. A amostra Masa 124 apresenta maior teor de Zn e menor teor de Fe, se encaixando no subtipo minério com willemita. Além disso, a segunda amostra apresenta teores mais altos de Ag e Pb.

Uma comparação entre as análises granulométricas para as duas amostras estudadas pode ser visualizada no gráfico de distribuição em massa acumulada no passante (Figura 4.1).

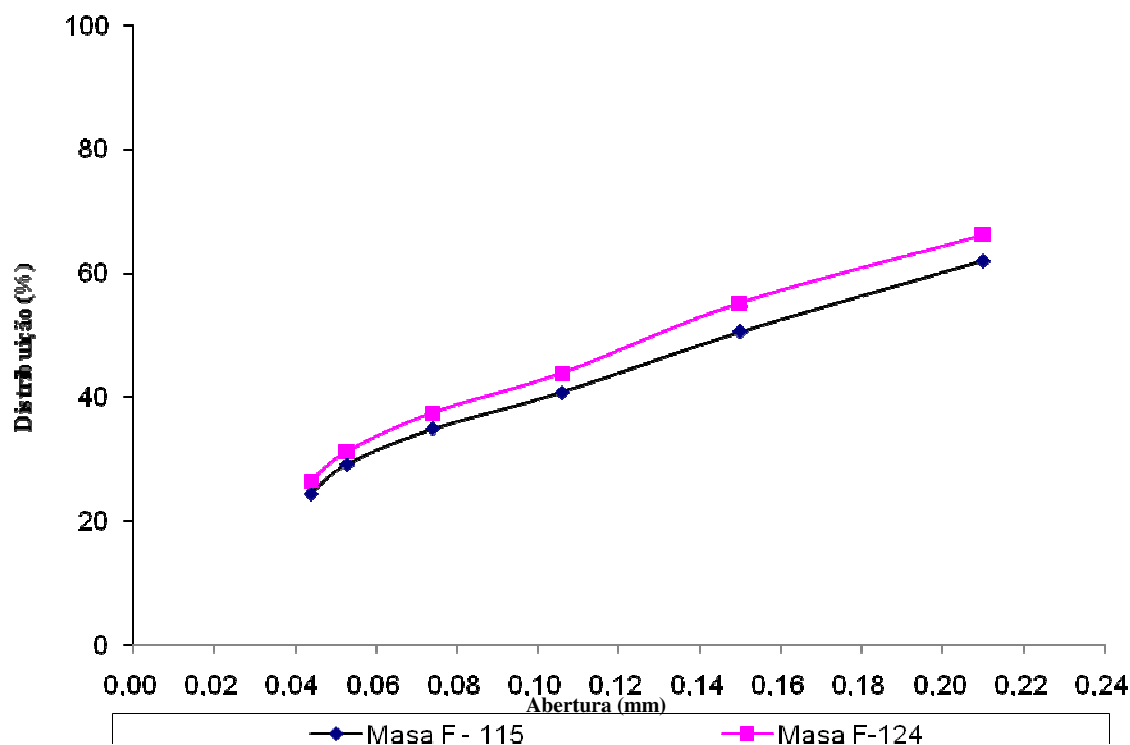


Figura 4.1. Comparação das análises granulométricas dos subtipos de minério com willemita, mostrando a distribuição em massa acumulada no passante.

Em geral, os dois subtipos apresentaram comportamentos parecidos perante a classificação granulométrica, com aproximadamente 35% em massa constituindo a porção grossa.

#### 4.1. Caracterização do subtipo willemita rica em Fe

##### 4.1.1. Distribuição dos teores por fração granulométrica

A distribuição de teores por fração granulométrica para amostra Masa115 está exposta na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Distribuição granulométrica da amostra MASA115

| Abertura<br>(mm) | % em massa |       | Teores  |         |         |          |          |        |           |           |           |           | Distribuição no ensaio (%) |         |          |          |
|------------------|------------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|---------|----------|----------|
|                  | Ret        | Ac    | Zn<br>% | Fe<br>% | Al<br>% | CaO<br>% | MgO<br>% | S<br>% | Pb<br>ppm | Ag<br>ppm | Cu<br>ppm | Cd<br>ppm | Zn<br>%                    | Fe<br>% | CaO<br>% | MgO<br>% |
| +0,15            | 38,03      | 38,03 | 18,00   | 43,90   | 0,11    | 1,13     | 0,61     | 0,02   | 1165      | 10        | 44        | 54        | 29,47                      | 48,24   | 18,08    | 17,57    |
| -0,15+0,11       | 11,43      | 49,46 | 26,08   | 30,18   | 0,70    | 1,94     | 1,07     | 0,05   | 1561      | 6         | 46        | 56        | 12,84                      | 9,97    | 9,33     | 9,27     |
| -0,11+0,074      | 9,78       | 59,24 | 27,46   | 30,41   | 0,31    | 2,37     | 1,36     | 0,05   | 1461      | 7         | 55        | 50        | 11,56                      | 8,59    | 9,75     | 10,07    |
| -0,074+0,053     | 5,91       | 65,14 | 28,26   | 28,93   | 0,31    | 2,48     | 1,30     | 0,01   | 1523      | 10        | 41        | 57        | 7,19                       | 4,94    | 6,16     | 5,82     |
| -0,053+0,044     | 5,70       | 70,84 | 28,35   | 27,87   | 0,20    | 2,72     | 1,46     | 0,02   | 1582      | 8         | 40        | 51        | 6,95                       | 4,59    | 6,52     | 6,30     |
| -0,044+0,038     | 4,69       | 75,53 | 28,45   | 27,55   | 0,20    | 2,62     | 1,62     | 0,02   | 1826      | 55        | 21        | 53        | 5,75                       | 3,73    | 5,17     | 5,76     |
| -0,038           | 24,47      | 100   | 24,90   | 28,20   | 0,54    | 4,37     | 2,44     | 0,10   | 2230      | 36        | 54        | 67        | 26,24                      | 19,94   | 44,99    | 45,22    |
| <b>Total</b>     | 100        | 100   | 23,22   | 34,61   | 0,32    | 2,38     | 1,32     | 0,05   | 1576      | 18        | 46        | 57        | 100                        | 100     | 100      | 100      |

A análise granulométrica indica que 38,03% em massa da amostra estão retidas em 0,15 mm, enquanto que 24,47% em massa constituem material passante em 0,038 mm.

O teor de Zn na fração acima de 0,038 mm situa-se entre 18,00 e 28,90 %, com tendência de acréscimo para os finos abaixo de 0,15 mm. Na fração -0,038 mm o teor de zinco corresponde a 24,90% (26,24% do total da amostra contida). Em 0,15 mm o teor de Zn é igual a 18% o que representa 29,47% da amostra. A partir desta análise é possível verificar que a distribuição de Zn em relação à massa ocorre nos extremos das frações granulométricas.

O teor de Fe acima de 0,15 mm é igual a 43,90%, o que corresponde a 48,24% do total de Fe da amostra. Em geral, observa-se uma diminuição no teor de Fe em direção aos finos indicando que a hematita, principal mineral portador de Fe, permanece nas frações mais grossas.

Os teores de CaO e MgO apresentam comportamento semelhantes com tendência de aumento a medida que a granulometria diminui. O teor de CaO varia entre 1,94 e 4,37 nas frações abaixo de 0,15mm; enquanto o os de MgO encontram-se entre 1,07 e 2,44. Abaixo de 0,038mm, estes elementos estão contidos em 45% do total da amostra.

Os teores de Pb e Ag também aumentam a medida que a granulometria se torna mais fina, enquanto os de Cd e Cu permanecem, em geral, constantes. Os valores de S variam de 0,01 a 0,05%.

#### **4.1.2. Separação dos minerais por líquido denso**

Os resultados das separações minerais são apresentados na Tabela 4.3. Para as frações abaixo de 0,038 mm não foi possível a realização da análise devido à predominância dos finos. Não foi realizada análise química para os produtos da separação, porém uma análise visual foi realizada em estereomicroscópio, com o uso do qual foi possível a definição dos minerais presentes nos produtos flutuados e afundados.

**Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de separação mineral com líquidos densos para amostra de minério willemítico rico em Fe (Masa115).**

| Abertura (mm) | Produto  | % em massa |         |
|---------------|----------|------------|---------|
|               |          | Ensaio     | Amostra |
| +0,15         | Flutuado | 42,60      | 16,20   |
|               | Afundado | 57,40      | 21,83   |
|               | Total    | 100        | 38,03   |
| -0,15+0,11    | Flutuado | 41,30      | 4,71    |
|               | Afundado | 58,80      | 6,72    |
|               | Total    | 100        | 11,43   |
| -0,11+0,074   | Flutuado | 38,90      | 3,80    |
|               | Afundado | 61,10      | 5,98    |
|               | Total    | 100        | 9,78    |
| -0,074+0,053  | Flutuado | 36,88      | 2,18    |
|               | Afundado | 63,12      | 3,73    |
|               | Total    | 100        | 5,91    |
| -0,053+0,044  | Flutuado | 43,67      | 2,49    |
|               | Afundado | 56,33      | 3,21    |
|               | Total    | 100        | 5,70    |
| -0,044+0,038  | Flutuado | 47,80      | 2,24    |
|               | Afundado | 52,20      | 2,45    |
|               | Total    | 100        | 4,69    |
| Total         | Flutuado | 17,60      | 13,29   |
|               | Afundado | 82,40      | 62,25   |
|               | Total    | 100        | 75,54   |

Em geral, 13,29% da amostra encontram-se no produto flutuado, enquanto a maior quantidade (62,25%) corresponde ao produto afundado. Observa-se uma tendência de aumento do flutuado a medida que a granulometria se torna mais fina.

Para todas as frações granulométricas, o produto flutuado apresentou coloração rosada, sendo constituído, principalmente, por minerais carbonáticos e argilominerais. As alíquotas afundadas mostram-se com tonalidade escura e coloração acinzentada e são constituídas principalmente por willemita e hematita (Figura 3.2).

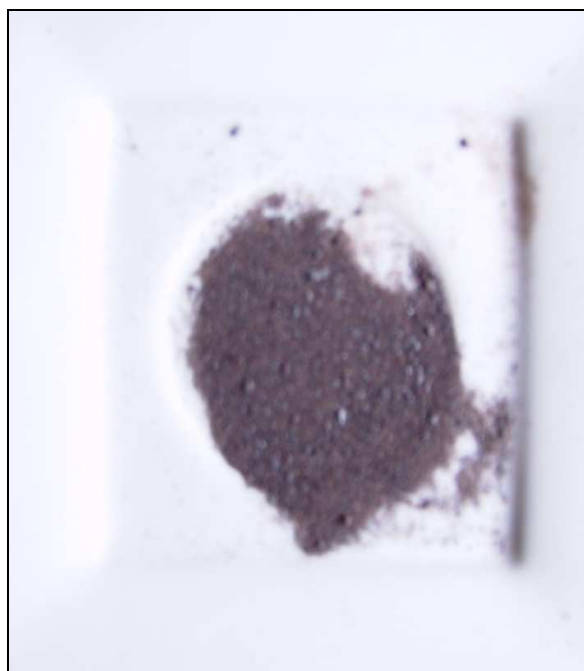


Figura 4.2. Produto afundado da separação mineral da amostra do minério rico em Fe (Masa 115) na fração -0,15+0,11 mm.

#### 4.1.3. Estimativa da composição mineral, formas de ocorrência e liberação da willemita

A composição mineralógica estimada para este subtipo de minério com willemita, obtida a partir de observações ao microscópio ótico, análise química e MEV podem ser verificadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Estimativa da composição mineralógica para amostra Masa115

| Abertura<br>(mm) | % massa<br>retida | % Minerais |    |     |                    |     |     |    |        |
|------------------|-------------------|------------|----|-----|--------------------|-----|-----|----|--------|
|                  |                   | Will       | Hm | Dol | Carbonato<br>de Fe | Chl | Qtz | Gn | Outros |
| +0,15            | 38,03             | 15         | 55 | 4   | 5                  | 10  | 6   | tr | tr     |
| -0,15+0,11       | 11,43             | 33         | 44 | 7   | 2                  | 8   | 3   | tr | tr     |
| -0,11+0,074      | 9,78              | 34         | 43 | 7   | 4                  | 6   | 2   | tr | tr     |
| -0,074+0,053     | 5,91              | 36         | 32 | 10  | 6                  | 5   | 5   | tr | 0,5    |
| -0,053+0,044     | 5,70              | 38         | 31 | 13  | 5                  | 5   | 3   | tr | 0,6    |
| -0,044+0,038     | 4,69              | 35         | 36 | 15  | 4                  | 4   | 2   | tr | tr     |
| -0,038           | 24,47             | 27         | 34 | 21  | 8                  | 3   | 1   | tr | 0,7    |
| Total            | 100               | 25         | 44 | 10  | 5                  | 7   | 4   | tr | tr     |

\*tr = traço (<0,5%); Outros = sulfetos de Cu e Ag, apatita, barita, franklinita, argilominerais e limonita.  
Abreviações: Will = willemita; Hm = hematita; Dol = dolomita; Chl = clorita; Qtz = quartzo; Gn = galena.

Em geral, este subtipo é constituído por hematita (44%), willemita (25%) e, secundariamente, por dolomita (10%), clorita que pode conter Zn em sua estrutura (7%), carbonatos de Fe e/ou dolomita férrica (5%). Além disso, foram verificados outros minerais que ficaram em porcentagem abaixo de 0,5%, incluindo galena, apatita, barita, raros sulfetos de prata e/ou cobre, limonita e argilominerais.

Os grãos de willemita apresentam-se fraturados, por vezes porosos e com recobrimento superficial principalmente nas frações mais finas. Frequentemente, são observadas as seguintes associações dos grãos de willemita (Prancha 4.1):

- Intercrescida ou envolvida pela hematita;
- Justaposta ou intercrescida com a dolomita e/ou carbonatos de ferro;
- Com inclusões submicrométricas de limonita e franklinita sendo esta frequência diminuída em direção aos finos.

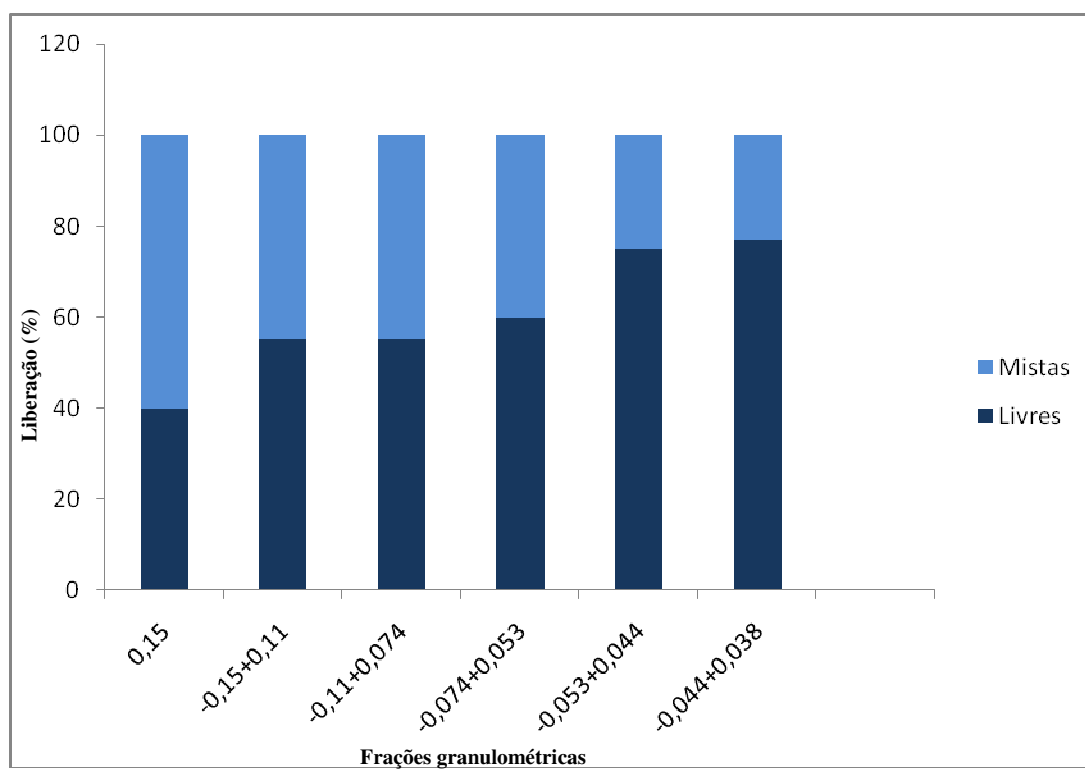
A Tabela 4.5 apresenta um sumário da distribuição das formas de associação da willemita (% em massa), em partículas livres e mista para os intervalos usados na classificação granulométrica. É importante ressaltar que abaixo da fração 0,038 mm a visualização para determinação da liberação se torna muito limitada e por isso não estão presentes na tabela dados para essa fração.

**Tabela 4.5. Sumário da distribuição da willemita relativa à liberação no minério rico em Fe.**

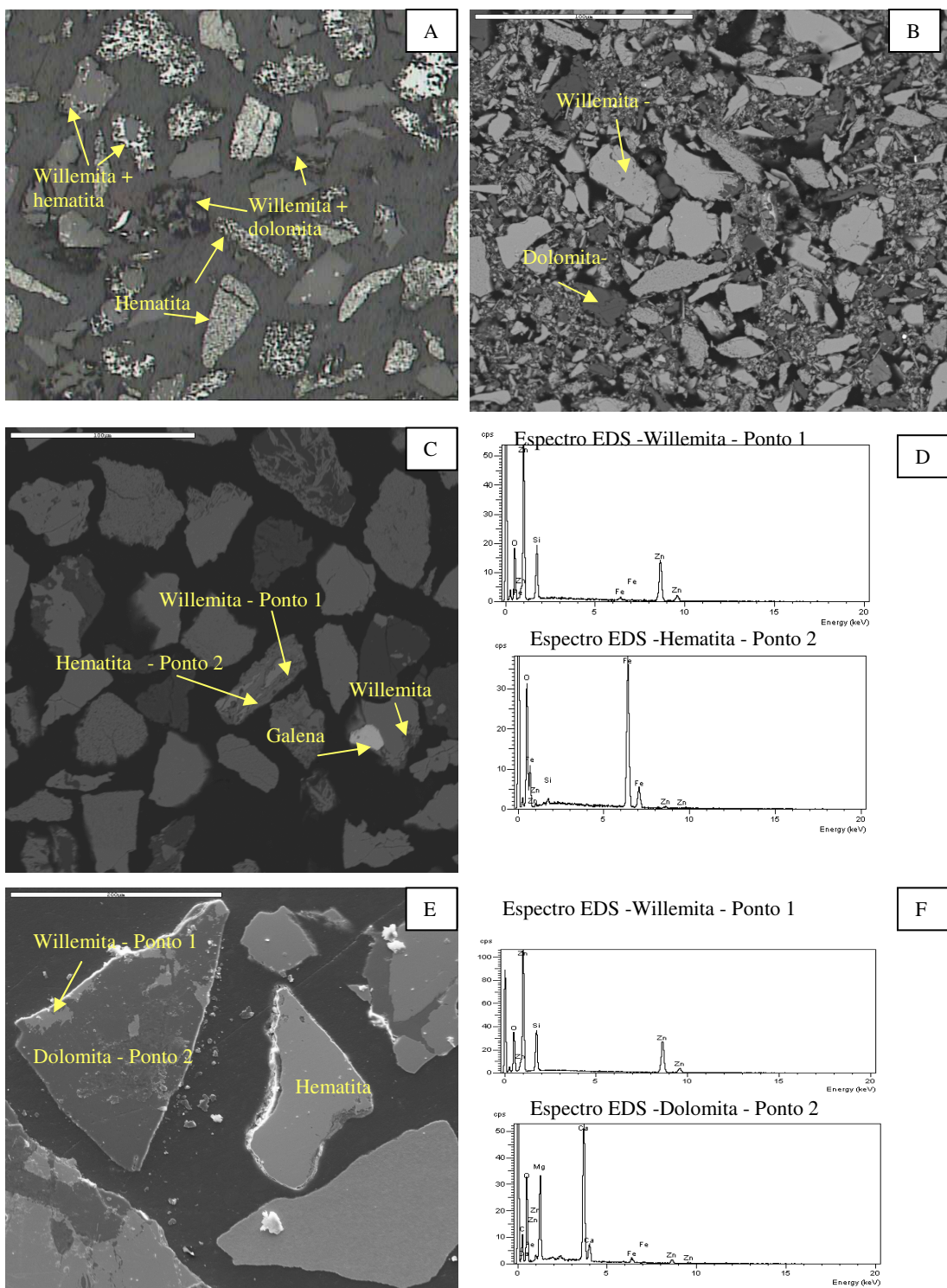
| Abertura (mm) | Formas de associação da willemita (% em massa) |       |                     |                   |
|---------------|------------------------------------------------|-------|---------------------|-------------------|
|               | Livre                                          | Mista | Total livre + mista | Grau de liberação |
| +0,15         | 40                                             | 60    | 100                 | 40                |
| -0,15+0,11    | 55                                             | 45    | 100                 | 55                |
| -0,11+0,074   | 55                                             | 45    | 100                 | 55                |
| -0,074+0,053  | 60                                             | 40    | 100                 | 60                |
| -0,053+0,044  | 75                                             | 25    | 100                 | 75                |
| -0,044+0,038  | 77                                             | 23    | 100                 | 77                |

A liberação global da willemita para este subtipo de minério acima de 0,053 mm corresponde a 60%; liberação superior a 75% só é atingida para frações abaixo de 0,053 mm, chegando a 77% na fração passante em 0,044 mm.

A figura 3.3 ilustra graficamente as formas dos grãos de willemita em relação aos intervalos granulométricos.



**Figura 4.3.** Distribuição das formas de ocorrência da willemita em diferentes frações granulométricas da amostra do minério rico em Fe.



**Prancha 4.1. Associações do grãos que contém willemita do subtipo de minério rico em Fe**

- A.** Imagem em luz refletida dos grãos do minério rico em Fe com willemita (Fração -0,074+0,053mm - Escala 100 µm). **B.** Imagem de elétrons retroespalhados da fração -0,038mm mostrando grãos de hematita e willemita liberados (Escala 100 µm). **C.** Imagem de elétrons retroespalhados da associação dos grãos de willemita com dolomita e hematita (Fração -0,044+0,038mm - Escala 100 µm). **D.** Espectro EDS dos grãos. **E.** Imagem de elétrons retroespalhados da willemita e associações (Escala 200 µm). **F.** Espectro EDS dos grãos.

## **4.2. Caracterização do subtipo de minério com willemita**

### **4.2.1. Distribuição dos teores por fração granulométrica**

A distribuição de teores por fração granulométrica para a amostra Masa124 é apresentada na Tabela 4.6. A análise granulométrica indica que 33,73% em massa da amostra foram retidas em 0,15 mm, enquanto que 26,50% em massa constituem material passante em 0,038 mm.

O teor de Zn na fração acima de 0,038 mm situa-se entre 32,53 e 45,60%, com tendência de acréscimo para os finos abaixo de 0,15 mm. Na fração -0,038mm o teor de zinco corresponde a 41,92% (28,12% do total da amostra contida). Em 0,15 mm o teor de Zn é igual a 32,53% o que representa 27,78% da amostra. A partir desta análise é possível verificar que a distribuição de Zn em relação a massa ocorre também nos extremos das frações granulométricas como na amostra Masa115.

O teor de Fe na fração granulométrica acima de 0,15 mm foi igual a 23,56%, o que corresponde a 54,15% do total de Fe da amostra. Em geral, observa-se uma diminuição no teor de Fe até a fração -0,044+0,038 mm. Na faixa granulométrica abaixo de 0,038 mm observa-se um aumento no teor de Fe que está contido em 18,63% do total da amostra.

Os teores de CaO e MgO apresentam comportamento semelhante com tendência de aumento a medida que a granulometria diminui. O teor de CaO varia entre 0,76% e 4,08%, enquanto os de MgO encontram-se entre 0,44% e 1,99%. Abaixo de 0,038 mm, estes elementos estão contidos em torno de 50% do total da amostra, o que pode contribuir para o fenômeno *slime coating*.

Os teores de Pb, Cu, Cd, S e Ag também aumentam a medida que a granulometria se torna mais fina, sendo mais elevados na fração -0,038 mm.

Tabela 4.6. Distribuição granuloquímica da amostra MASA124

| Abertura<br>(mm) | % em massa |       | Teores  |         |         |          |          |        |           |           |           |           | Distribuição no ensaio (%) |           |          |          |
|------------------|------------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|----------|----------|
|                  | Ret        | Ac    | Zn<br>% | Fe<br>% | Al<br>% | CaO<br>% | MgO<br>% | S<br>% | Pb<br>ppm | Ag<br>ppm | Cu<br>ppm | Cd<br>ppm | Zn<br>%                    | Fe<br>%   | CaO<br>% | MgO<br>% |
| +0,15            | 33,73      | 33,73 | 32,53   | 23,46   | 0,20    | 0,76     | 0,44     | 0,07   | 2166      | 13        | 25        | 57        | 27,7<br>8                  | 54,1<br>5 | 13,15    | 14,31    |
| -0,15+0,11       | 11,08      | 44,81 | 42,98   | 12,04   | 0,15    | 1,32     | 0,78     | 0,08   | 2452      | 19        | 34        | 58        | 12,0<br>6                  | 9,13      | 7,50     | 8,33     |
| -0,11+0,074      | 11,34      | 56,15 | 42,34   | 10,41   | 0,12    | 1,44     | 0,83     | 0,09   | 2382      | 18        | 38        | 58        | 12,1<br>6                  | 8,08      | 8,38     | 9,07     |
| -0,074+0,053     | 6,41       | 62,56 | 44,99   | 9,08    | 0,10    | 1,58     | 0,95     | 0,08   | 2511      | 55        | 44        | 63        | 7,30                       | 3,98      | 5,20     | 5,87     |
| -0,053+0,044     | 6,19       | 68,75 | 45,32   | 8,50    | 0,09    | 1,70     | 1,06     | 0,08   | 2580      | 58        | 43        | 58        | 7,10                       | 3,60      | 5,40     | 6,32     |
| -0,044+0,038     | 4,74       | 73,50 | 45,60   | 7,48    | 0,06    | 2,02     | 1,15     | 0,10   | 2642      | 74        | 41        | 58        | 5,48                       | 2,43      | 4,92     | 5,26     |
| -0,038           | 26,50      | 100   | 41,92   | 10,27   | 0,08    | 4,08     | 1,99     | 0,10   | 3064      | 79        | 69        | 81        | 28,1<br>2                  | 18,6<br>3 | 55,46    | 50,83    |
| <b>Total</b>     | 100        | 100   | 39,50   | 14,61   | 0,13    | 1,95     | 1,04     | 0,08   | 2531      | 40        | 42        | 64        | 100                        | 100       | 100      | 100      |

#### 4.2.2. Separação dos minerais por líquido denso

Os resultados das separações minerais por líquido denso estão dispostos na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7. Resultados dos ensaios da separação mineral para amostra de minério willemítico Masa124.**

| Abertura (mm) | Produto  | % em massa |         |
|---------------|----------|------------|---------|
|               |          | Ensaio     | Amostra |
| +0,15         | Flutuado | 51,30      | 17,30   |
|               | Afundado | 48,70      | 16,43   |
|               | Total    | 100        | 33,73   |
| -0,15+0,11    | Flutuado | 43,67      | 4,84    |
|               | Afundado | 56,33      | 6,24    |
|               | Total    | 100        | 11,08   |
| -0,11+0,074   | Flutuado | 37,89      | 4,30    |
|               | Afundado | 62,11      | 7,04    |
|               | Total    | 100        | 11,34   |
| -0,074+0,053  | Flutuado | 37,32      | 4,30    |
|               | Afundado | 62,68      | 7,04    |
|               | Total    | 100        | 6,41    |
| -0,053+0,044  | Flutuado | 44,45      | 2,75    |
|               | Afundado | 55,55      | 3,44    |
|               | Total    | 100        | 6,19    |
| -0,044+0,038  | Flutuado | 38,78      | 1,84    |
|               | Afundado | 61,22      | 2,90    |
|               | Total    | 100        | 4,74    |
| Total         | Flutuado | 45,47      | 33,42   |
|               | Afundado | 54,52      | 40,07   |
|               | Total    | 100        | 73,50   |

O produto total flutuado acima de 0,038 mm corresponde a 45,47% em massa no ensaio (30,27% em relação a amostra). A proporção em massa desse produto acima de 0,15 mm foi de 51,30%, enquanto abaixo desta fração as proporções situam-se entre 43,67% e 37,32% em massa, tendo um aumento para os finos.

Em geral, como no subtipo de minério com willemita rico em Fe, todas as frações granulométricas também apresentaram no produto flutuado coloração rosada e constituído principalmente por carbonatos e argilominerais. As alíquotas afundadas mostram-se com tonalidade escura e coloração acinzentada, sendo constituídas principalmente por willemita e hematita.

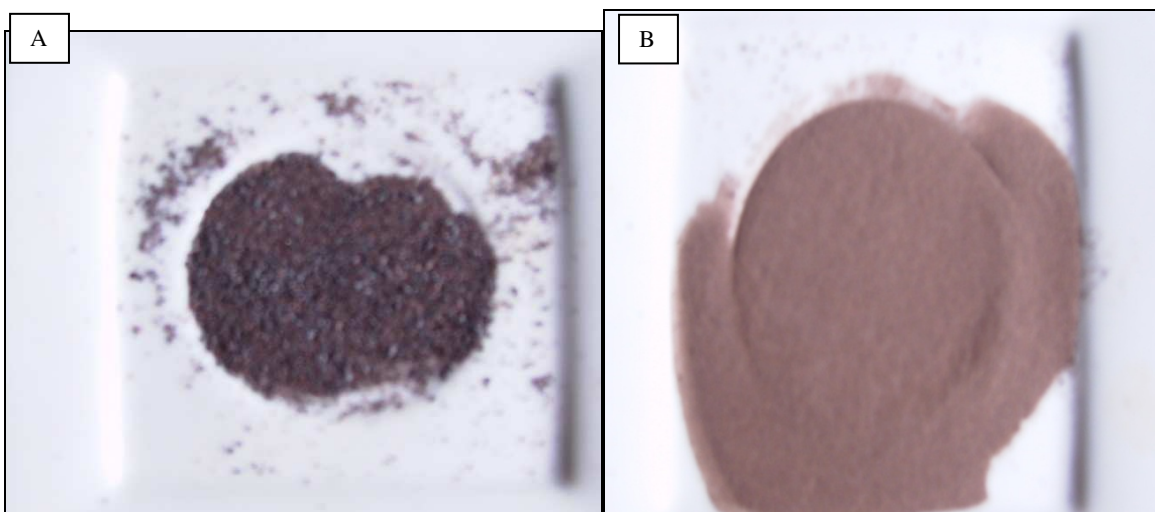


Figura 4.4. Produto da separação mineral da amostra do minério com willemita: A) afundado; B) flutuado – Fração - 0,074+0,044mm.

#### 4.2.3. Estimativa da composição mineral, formas de ocorrência e liberação da willemita

A composição mineralógica estimada para o subtipo de minério com willemita foi também obtida através de observações em microscópio ótico, análise química e MEV, sendo ilustrada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Estimativa da composição mineralógica para amostra Masa124

| Abertura<br>(mm) | % massa<br>retida | % Minerais |    |     |                    |     |     |    |        |
|------------------|-------------------|------------|----|-----|--------------------|-----|-----|----|--------|
|                  |                   | Will       | Hm | Dol | Carbonato<br>de Fe | Chl | Qtz | Gn | Outros |
| +0,15            | 33,73             | 45         | 35 | 2   | 2                  | 8   | 2   | tr | 0,5    |
| -0,15+0,11       | 11,08             | 55         | 25 | 6   | 3                  | 5   | 1   | tr | 0,7    |
| -0,11+0,074      | 11,34             | 57         | 19 | 7   | 1                  | 4   | 2   | tr | 0,5    |
| -0,074+0,053     | 6,41              | 63         | 16 | 7   | 6                  | 5   | 5   | tr | 0,5    |
| -0,053+0,044     | 6,19              | 65         | 14 | 8   | 2                  | 3   | 1   | tr | 0,8    |
| -0,044+0,038     | 4,74              | 63         | 11 | 12  | 3                  | 4   | 3   | tr | 0,8    |
| -0,038           | 26,50             | 47         | 26 | 16  | 5                  | 5   | 3   | tr | 1      |
| Total            | 100               | 51         | 25 | 8   | 3                  | 6   | 2   | tr | 0,7    |

\*tr = traço (<0,5%); Outros = sulfetos de Cu e Ag, apatita, barita, franklinita, argilominerais e limonita.  
Abreviações: Will = willemita; Hm = hematita; Dol = dolomita; Chl = clorita; Qtz = quartzo; Gn = galena.

Em geral, este subtipo é constituído por willemita (51%), hematita (25%) e, secundariamente, por dolomita (8%), clorita que contém Zn em sua estrutura (6%), carbonatos de Fe e/ou dolomita férrica (3%). Nas amostras deste subtipo é mais comum encontrar inclusões de galena, sulfetos de cobre e/ou prata e franklinita nos grãos de willemita.

Diferentemente das amostras do minério willemítico rico em Fe, os grãos deste subtipo apresentam superfície límpida e homogênea, principalmente quando liberada. Porém, por vezes, aparece porosa, fraturada e com recobrimento superficial nas frações mais finas. As associações mais comuns dos grãos que contém willemita são com a hematita, justaposta com dolomita e com inclusões de sulfetos e franklinita, sendo esta mais uma diferença relativa às amostras rica em Fe, onde é mais rara a ocorrência de sulfetos (Prancha 4.2).

A Tabela 4.9 apresenta um sumário da distribuição das formas de associação da willemita (% em massa), em partículas livres e mistas para os intervalos usados na classificação granulométrica. É importante ressaltar que também para estas amostras, a visualização para determinação da liberação em frações abaixo de 0,038 mm apresentou dificuldades.

**Tabela 4.9. Sumário da distribuição da willemita relativa a liberação no minério willemítico (Masa124)**

| Abertura (mm) | Formas de associação da willemita (% em massa) |       |                     |                   |
|---------------|------------------------------------------------|-------|---------------------|-------------------|
|               | Livre                                          | Mista | Total livre + mista | Grau de liberação |
| +0,15         | 51                                             | 49    | 100                 | 51                |
| -0,15+0,11    | 62                                             | 38    | 100                 | 62                |
| -0,11+0,074   | 65                                             | 35    | 100                 | 65                |
| -0,074+0,053  | 72                                             | 28    | 100                 | 72                |
| -0,053+0,044  | 78                                             | 22    | 100                 | 78                |
| -0,044+0,038  | 80                                             | 20    | 100                 | 80                |

A liberação global da willemita abaixo de 0,11 mm corresponde a 65%. Liberação superior a 70% só é atingida para frações abaixo de 0,074 mm, chegando a 80% na fração passante em 0,044 mm.

A figura 4.5 ilustra graficamente as formas dos grãos de willemita para este subtipo de minério ao longo dos intervalos granulométricos.

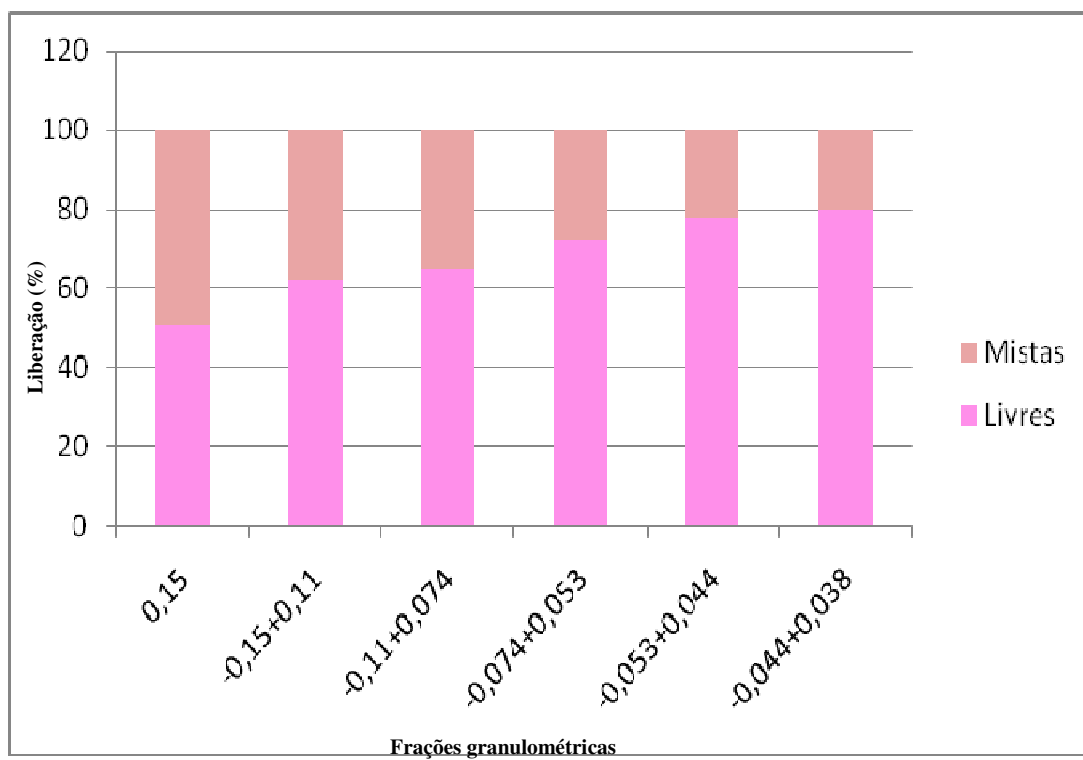
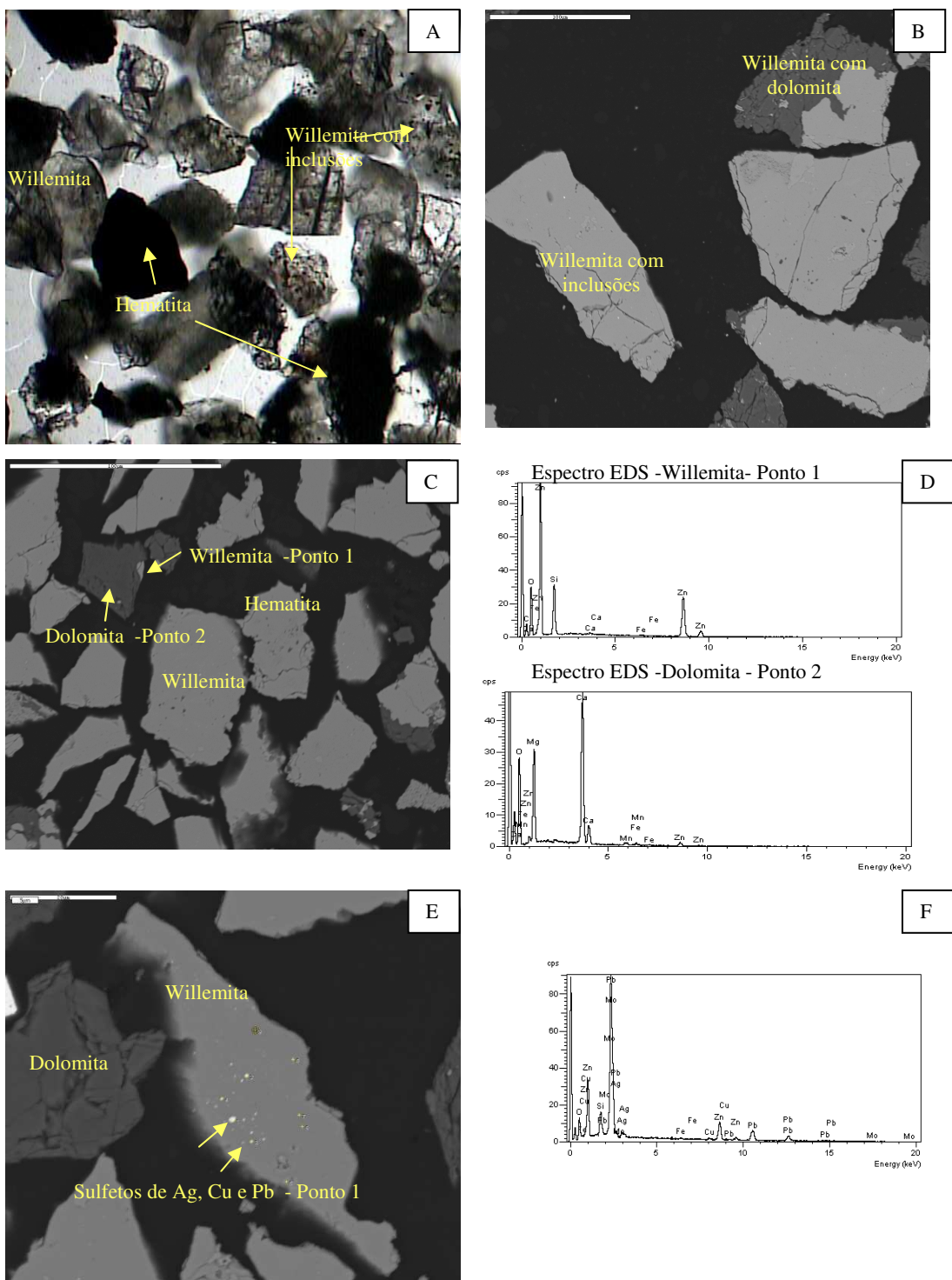


Figura 4.5. Distribuição das formas dos grãos willemita para o minério com willemita (amostra Masa124).



Prancha 4.2. Associações dos grãos do subtipo de minério com willemita

A. Imagem em luz transmitida dos grãos do minério com willemita. A willemita apresenta inclusão e ocorre associada a hematita (Fração  $-0,11 \pm 0,074\text{mm}$  - Escala  $100\text{ }\mu\text{m}$ ). B. Imagem de elétrons retroespalhados da fração  $-0,15 \pm 0,11\text{mm}$  mostrando grãos de willemita associados a dolomita em partículas mistas (Escala  $200\text{ }\mu\text{m}$ ). C. Imagem de elétrons retroespalhados dos grãos de willemita liberados e associados com dolomita e hematita (Fração  $-0,044 \pm 0,038\text{mm}$  - Escala  $100\text{ }\mu\text{m}$ ). D. Espectro EDS dos grãos. E. Imagem de elétrons retroespalhados da willemita com finas inclusões de sulfetos (Fração  $-0,038\text{mm}$  - Escala  $20\text{ }\mu\text{m}$ ). F. Espectro EDS dos grãos.

### 4.3. Comparação das características tecnológicas dos subtipos de minério willemítico

Em geral, os subtipos de minério willemítico com maior e menor teor de ferro apresentaram distribuição granulométrica bastante semelhante, da qual se tem porcentagens em massa significativas nas frações grossas e muito finas.

A distribuição do Zn para ambas as amostras mostra um aumento significativo entre as frações - 0,15+0,11 mm e -0,044+0,038 mm. Mas, em geral, os teores da fração mais grossa e fina são significativos (Figura 4.6- A).

Os teores de Fe, obviamente, apresentam-se mais elevados no subtipo do minério rico em Fe, porém quando se compara com a outra tipologia verifica-se um comportamento semelhante (Figura 4.6- B) em sua distribuição nas diferentes frações granulométricas. Nas frações grossas o conteúdo de Fe é relativamente maior do que nas demais frações e quando confrontado com as análises em MEV e descrição em microscópio ótico observa-se que os grãos de willemitas ocorrem pouco liberados e associados a hematita na faixa +0,15 mm. Além disso, a hematita ocorre frequentemente liberada e grossa (Prancha 4.1 - A). Este fato mostra que provavelmente o *WI* (*work index*) destas amostras é maior do que as da Mina de Vazante, podendo prejudicar diretamente os processos de britagem e cominuição.

O aumento nos teores de CaO e MgO apresentaram tendência de maior concentração nos finos, para ambas tipologias (Figura 4.6- C e D). Os finos gerados estão em sua maioria na forma de dolomita e, mais raramente, em argilominerais, contribuindo para o recobrimento das partículas de willemita, como verificados em MEV. Este recobrimento pode dificultar a interação dos reagentes com os grãos, diminuindo a eficiência do processo. Este caso pode ser também relacionado com a quantidade de hematita na amostra, principalmente no subtipo de minério com willemita rico em Fe. Como a dureza da hematita é maior que a dos carbonatos e a quantidade do óxido de Fe é elevada, a hematita passa a ser um corpo moedor, ou seja, ajuda na cominuição, gerando finos dos minerais de baixa dureza.

Nas amostras, observa-se um aumento nos teores de Pb e Ag nas frações mais finas, principalmente para o subtipo de minério com willemita com mais baixo teor de ferro. Em MEV, foi possível definir a ocorrência dessas inclusões em grãos de willemita, inclusive na faixa abaixo de 0,038 mm. Esta forma de associação torna o aproveitamento destes sulfetos limitado, pois não apresentaram liberações significativas, por ocorrerem finamente disseminados na willemita. A mesma tendência se verifica para o Cd e Cu.

Em geral, a separação mineral por líquido denso para os dois subtipos resultou mesma tendência, porém a amostra de minério rico em Fe produziu uma maior quantidade de massa afundada devido ao maior conteúdo de hematita.

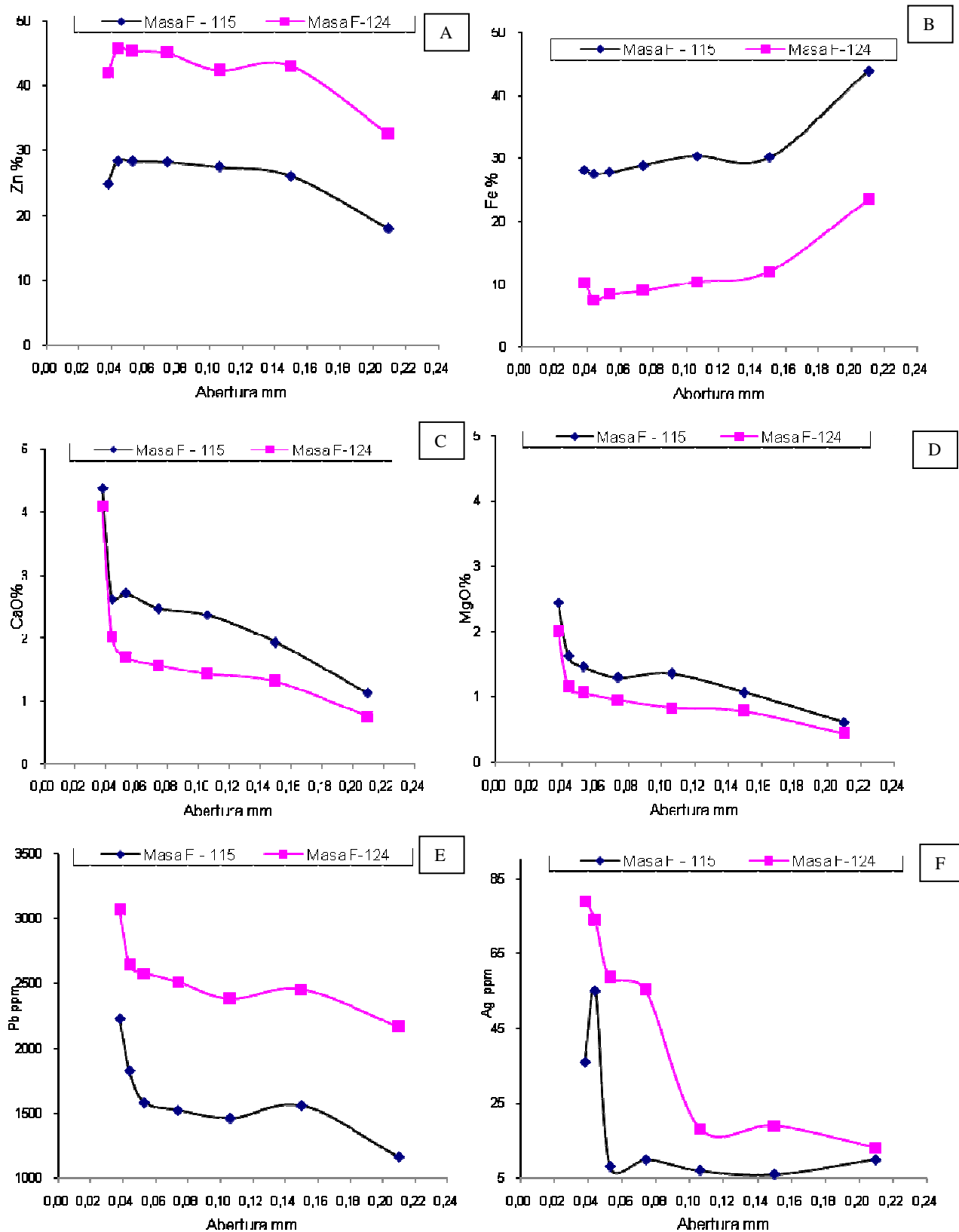
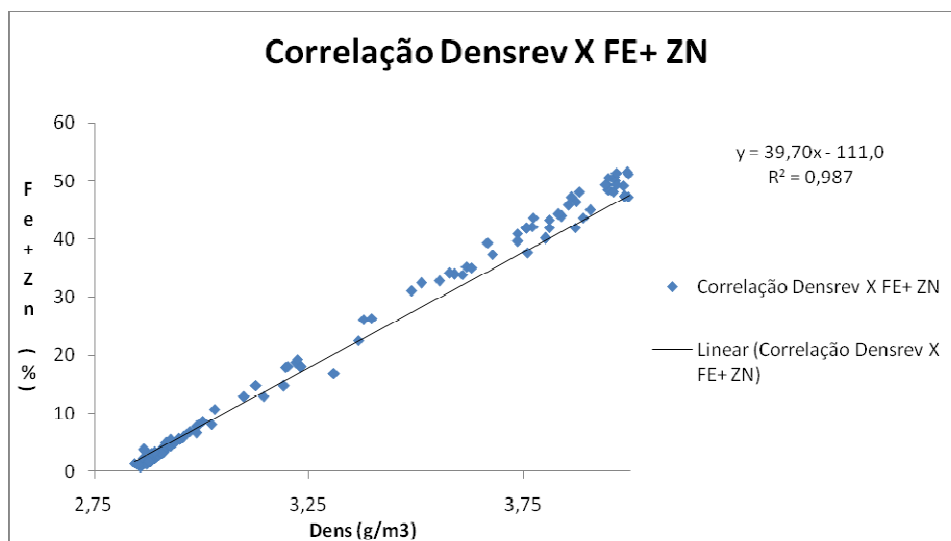


Figura 4.6. Variação de teores de acordo com a distribuição granulométrica para os subtipos de minério com willemita com menor (Masa124) e maior conteúdo de ferro (Masa115). A. Zn (%). B. Fe (%). C. CaO (%). D. MgO (%). E. Pb (ppm). F. Ag (ppm).

#### 4.4. Resultados dos testes de densidade

Os dados de densidades mostram que as maiores contribuições para esta variável estão relacionados com os teores de Fe e Zn encontrados para ambos os subtipos de minérios (Figura 38).

Portanto, a fim de facilitar a obtenção da densidade, pode se propor a sua definição a partir da equação da correlação entre estes elementos. Assim economiza-se, principalmente, tempo com os testes de deslocamento, visto que os processos para definição dos corpos de minério, como descrição de testemunho de sondagem, análise química e modelamento devem ser ágeis para atendimento do plano de produção.



**Figura 4.7. Correlação da densidade (g/m<sup>3</sup>) vs Fe + Zn (%)**

## 5. Conclusões

### Caracterização geológica do minério de zinco da Mina Extremo Norte de Vazante

O contexto geológico da área do Extremo Norte é semelhante ao da Mina de Vazante, porém ocorrem particularidades importantes a serem destacadas. Estratigraficamente é possível verificar a ocorrência da Formação Serra do Garrote e do Membro Morro do Pinheiro Inferior, Formação Serra do Poço Verde (Grupo Vazante), aflorantes na região da antiga Mina da MASA. Na Mina de Vazante, são aflorantes apenas os membros Morro do Pinheiro Superior e Pamplona Inferior da Formação Serra do Poço Verde. Dessa forma, os corpos de minério do Extremo Norte ocorrem ao longo da zona de falha que intercepta nessa área unidades estratigraficamente inferiores àquelas expostas na área da Mina de Vazante.

A Zona de Falha no Extremo Norte mostra um *trend* preferencial N-S, com conseqüente caimento dos planos mineralizados para oeste. Tal fato comprova que a Falha Vazante apresenta traço curvo à medida que se avança para norte. Assim, como na Mina de Vazante, a Falha Vazante baliza a localização dos corpos de minério willemítico, representando um importante controle estrutural para a mineralização willemítica. Adicionalmente, os caimentos dos planos da família de falhas rúpteis NW apresentam-se menos inclinados em relação à Vazante, e representam controles para a mineralização com calamina (hemimorfita) e para a carstificação desenvolvida nos metadolomitos da Formação Serra do Poço Verde.

Os corpos de minério com willemita da Mina Extremo norte, assim como na Mina de Vazante, são hospedados por dolomitos brechados e brechas hidrotermais, que possivelmente evidenciam sobrepressão dos fluidos na zona de falha. Quimica e mineralogicamente, as brechas hidrotermais também podem ser divididas em tipos, sendo uma rica em Fe e outra não. Esta primeira ocorre frequentemente em profundidades próximas a 200 m ou em fechamento de lentes do minério com willemita mais profundas e é empobrecida em Mg em relação as demais hospedeiras. Em Vazante, a ocorrência desta brecha pode ser verificada no segmento sul.

As diferenças principais nos tipos de minérios willemítico são relacionadas com a quantidade de hematita associada à mineralização, levando à classificação de uma tipologia de minério rica em Fe, em decorrência das expressivas quantidades de hematita. Este tipo de minério, que também apresenta quantidades de limonita consideráveis, pode ser apenas comparado à ocorrência restrita ao seguimento sul da Mina de Vazante, conhecida como Lumiadeira, sendo, portanto bastante diferenciadas dos outros segmentos da mina, tais como Sucuri e Morro da Usina.

O minério willemítico com menores conteúdos de ferro ( $\text{Fe} < 20 \%$ ), apresenta os teores mais elevados de zinco e de outros metais (Pb, Cd, Cu e Ag), associados à presença de willemita em cristais fibrosos, radiados e prismáticos. Amostras muito deformadas, texturalmente bastante finas, são também constituídas por uma geração tardia de willemita que substituí relíquias de cristais maiores de willemita. Essa tipologia de minério não havia sido reconhecida na Mina de Vazante.

O minério willemítico com maiores teores de ferro ( $\text{Fe} > 20\%$ ) apresenta grandes quantidades de hematita, em geral, com texturas que evidenciam ser sua deposição posterior à da willemita mais grossa. Hematita concentra-se também em planos de falha que limitam os *pod*s de minério willemítico mais pobre em ferro, representando envelopes às zonas de minério com mais alto teor de zinco.

Outra diferença notável na área do Extremo Norte é a ausência de corpos expressivos constituídos por sulfetos, tais como esfalerita e galena, que ocorrem imbricados aos corpos de minério willemítico ao longo da Zona de Falha de Vazante, na área da Mina de Vazante. Os sulfetos e franklinita/magnetita, quando presentes, ocorrem como diminutas inclusões disseminadas em massa willemítica.

Adicionalmente, enquanto na Mina de Vazante, conteúdos significativos de magnetita podem ser reconhecidos em profundidade, na área de Extremo Norte a presença de hematita é característica. Embora seja possível supor que a área do Extremo Norte represente uma porção distinta de um mesmo sistema hidrotermal, as condições físico-químicas predominantes nessa área podem ter sido um pouco distintas em relação à Vazante.

Dessa forma, a Mina de Vazante pode representar um certo zoneamento no qual maiores quantidades de sulfetos e magnetita seriam esperadas nas partes mais profundas do depósito. A predominância dos corpos de minério com willemita, franklinita, zincita e hematita na Mina Extremo Norte, contudo, não reflete necessariamente as porções mais frias do sistema. A associação de minério dessa área refletiria condições físico-químicas resultantes do processo de mistura entre fluidos metalíferos, quentes e ascendentes, e o fluido meteórico residente na bacia (paleoaquífero), mais frio, que seriam ainda relativamente quentes ( $150\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mas sob condições de pH neutro. Isso poderia refletir influxo ao longo de falhas e permanência relativamente longa do fluido metalífero quente no paleoaquífero alimentado por fluidos de origem meteórica, que estariam em equilíbrio com as rochas hospedeiras carbonáticas. A evolução dos fluidos teria favorecido a maior precipitação de hematita nos estágios finais de desenvolvimento da Falha de Vazante, resultando em

substituição parcial dos corpos willemíticos já formados. Para melhor definição das condições de formação do minério da Mina Extremo Norte, seria interessante a realização de estudo isotópicos.

Em superfície, o minério de calamina rico em ferro, também foi descrito pela primeira vez, uma vez que este tipo de ocorrência também não havia sido levantado anteriormente.

### **Caracterização tecnológica do minério de zinco da Mina de Extremo Norte de Vazante**

O minério do Extremo Norte de Vazante, em geral, apresenta-se enriquecido em Fe e empobrecido em elementos menores como Ag, Cd e Ge quando comparado ao minério de Vazante. Nas análises químicas é possível verificar o baixo teor de S nas amostras, que pode ser diretamente relacionado ao maior conteúdo de esfalerita no minério da Mina de Vazante.

De acordo com a caracterização tecnológica, observa-se que os subtipos de minério com willemita e rico em Fe, mostram tendências semelhantes em relação a sua distribuição granulométrica. O conteúdo de Zn é significativo entre as faixas granulométricas  $-0,15+0,11$  e  $-0,044+0,038$  mm. Os teores de Fe encontram-se maiores na fração grossa, principalmente para as amostras ricas em Fe, onde os grãos de hematita estão associados à willemita ou liberados. Ao relacionar tal fato com a petrografia, pode-se concluir que esse comportamento deve-se à presença da associação da massa de hematita e à substituição da fase willemítica pela hematítica.

Os teores de CaO e MgO apresentaram-se maiores nas frações mais finas para os dois subtipos de minério, principalmente para o subtipo rico em Fe e contribuem para fenômeno *slime coating*. Esse fenômeno é influenciado tanto pelos maiores teores de CaO e MgO, como pelas quantidades mais elevadas de hematita, pois representaria um corpo moedor devido a diferença entre sua dureza e ados minerais carbonáticos.

Em geral, o aproveitamento de metais que ocorrem como sulfetos na área da Mina de Extremo Norte representam potenciais não muito atrativos, devido à sua forma de ocorrência. Isso decorre tanto da ausência de corpos sulfetados e de veios com esfalerita que cortam a willemita e dolomita, reconhecidos em Vazante, como do seu modo de ocorrência como inclusões finamente disseminadas na willemita, que não são liberadas nem mesmo nas frações granulométricas mais finas.

Na Mina de Vazante, os teores de Fe são mais baixos, mas sua distribuição é semelhante aquela dos minérios encontrados na Mina Extremo Norte. O mesmo é observado para Zn, CaO e MgO.

Espacialmente é difícil a separação dos subtipos de minério com willemita, pois o rico em Fe, normalmente ocorre no fechamento das lentes mais ricas em Zn, representando envelopes nos quais

há maior concentração de hematita. Apenas no início da lavra se deve ter uma seletividade, pois foi constatado que o minério rico em Fe também prevalece em menores profundidades. Para isso, é necessário um planejamento bem feito para realizações da blendagem do minério do Extremo Norte com os de Vazante, fornecendo assim subsídios para uma boa eficiência da planta de tratamento e metalurgia.

Interessante também é a criação de equipes multidisciplinares para estudos de rotas alternativas para processamento do minério rico em Fe. Estes fatos citados são de fundamental importância para uma boa relação e aproveitamento das etapas de geologia, beneficiamento e planejamento, demonstrado que estas podem ser tratadas separadamente. A importância da relação interdisciplinar e correlação entre os processos dentro da mineração os tornam mais produtivos e interessantes, podendo assim romper barreiras.

## 6. Sugestões

Para trabalhos relacionados a caracterização tecnológica e beneficiamento sugere-se:

- Caracterização química das amostras do afundado e do flutuado quanto a partição de Zn;
- Minério ou concentrado rico em Fe pode representar uma oportunidade para o processamento hidrometalúrgico, com elevada recuperação de zinco, usando exclusivamente concentrado de silicato de zinco alto ferro. Atualmente o processo existente é muito eficaz para um mix de 87% de concentrado de silicato junto com 13% de concentrado sulfetado.

## Referencias Bibliográficas

- Alkmim, F.F. & Marshak, S., 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic Collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29– 58.
- Almeida, F.F.M., 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, *Bol. DNPM*, v. 243, 36p.
- Amaral, G. & Kawashita, K. 1967. Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 21., *Anais*, SBG, p. 214-217.
- Amaral, G. 1966. Isótopos de chumbo e gênese das jazidas de Vazante e Itacarambi. Publicação número 1. Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo Rio de Janeiro. p. 45.
- Amaral, G. 1968. Resultados preliminares do estudo sobre a mineralização e composição isotópica do chumbo em galenas de depósitos encaixados no Grupo Bambuí. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22.
- Amaral, G., 1968. *Geologia e depósitos de minério na região de Vazante, Estado de Minas Gerais*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade de São Paulo, 133p.
- Appold, M.S. & Monteiro, L.V.S. 2009. Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil. *Geofluids*, **9**, 96–115.
- 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
- Babinski, M.; Monteiro, L.V.S.; Fetter, A.H.; Bettencourt, J.S.; Oliveira, T.F. 2005. Isotope geochemistry of the mafic dikes from the Vazante nonsulfide zinc deposit, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2005):293-304
- Banks, D.A. & Russell, M.J. 1992 Fluid mixing during ore deposition at the Tynagh base-metal deposit, Ireland. *European Journal of Mineralogy*, **4**:921-931.
- Barros, F.C. D., 2007. Investigação da Possível Continuidade da Falha Vazante a Norte da Mina da Masa. Monografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- Bhering, A.P., 2009. Classificação do Maciço Rochoso e Caracterização das Brechas da Mina Subterrânea de Vazante – MG. Viçosa. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.

- Bittencourt, C., 2008. Carstificações Hipogênicas e Epigênicas – Influência sobre a exploração de minério de zinco da Mina de Vazante- MG. Curitiba. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- Brugger, J., McPhail, D.C., Wallace, M. and Waters, J., 2003. Formation of willemite in hydrothermal environments. *Econ. Geol.*, **98**:819–836.
- Cassedane, J. & Lasserre, M. 1969, Análise isotópica pelo método do chumbo em algumas galenas brasileiras: descrição do método utilizado. *Min. Met*, v. XLIX, n.293, p. 215 - 224.
- Cassedane, J. 1972. *Les Gîtes de Plomb et de Zinc du Brésil et leur Répartition Linéamentaire*. Thèse de Doctorat, Univ. Clermont Ferrand, 336p.
- Cloud, P. E. & Dardenne, M. A. 1973. Proterozoic age of the Bambuí Groupe in Brazil. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.84, p. 1673 - 1676.
- Coomer, P.G. & Robinson, B.W. 1976. Sulphur and Sulphate-oxygen Isotopes and the Origin of the Silvermines Deposits, Ireland. *Mineralium Deposita*, **11**:155-169.
- Couto, J. G. P; Cordani, U. G.; Kawashita, K.; Iyer, S. S.; Moraes, N.M.P. 1981. Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, p. 5 - 16.
- Cunha, I. de A.; Misi, A., Babinski, M. 2001. Lead isotope signatures of galenas from Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. In: MISI, A. & TEIXEIRA, J. B. G. (org.) Proterozoic base metal deposits of Africa and South America. Contributions presented at the 1<sup>st</sup> Field Workshop, International Geological Correlation Programme 450, Belo Horizonte, CNPq/ UNESCO/IUGS, p. 45 – 47.
- Dardenne, M. A. & Freitas-SILVA, F. H. 1998. Modelos Genéticos dos depósitos de Pb–Zn nos Grupos Bambuí e Vazante. *Workshop Depósitos Minerais Brasileiros de Metais Base*, Salvador, CPGG-UFBA/ADIMB, p.86 - 93.
- Dardenne, M.A, 1979. *Les minéralisations plomb-zinc du Groupe Bambui et leur contexte géologique*. Thèse de Doct. Etat., Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), 275 p.
- 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: Congr. Bras. Geol., 40., *Resumos*, SBG, p. 26.
- Dardenne, M.A.; Schobbenhaus, C.S., 2001. *Metalogênese do Brasil*. Brasília, Editora UnB/CNPq. 392 p.

- Deller, Graham, CRU International, “Changing economics along the zinc supply chain”, anais do Congresso Lead&Zinc 2010, volume único.
- Freitas-SILVA, F. H & Dardenne, M. A. 1997. Pb/Pb isotopic patterns of galenas from Morro do Ouro (Parcatu Formation), MorroAgudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits. In: South-American Symposium on Isotope Geology, 1., Campos do Jordão, 1997. *Extended Abstracts*, p. 118-120.
- Ferreira, M.F. 2008. Circuito Alternativo para Flotação de Minério Willemítico. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Goldstein, J.I., et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis – A Textbook for Biologist, Materials Scientists and Geologist. 1992. Plenum Press. New York.
- Goodfellow, W.D; Lydon, J.W; Turner, R.J.W. 1993. Geology and Genesis of stratiform sediment-hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulphide deposits. In: Kirkhan, R.V; Sinclair, W.D; Thorpe, R.I; Duke, J.M (eds) *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canadá, *Special Paper*, v. 40, p.201-251.
- Henley, K. J. 1983. Ore-Dressing Mineralogy – A Review of Techniques Applications and Recent Developments. International Congress on Applied Mineralog, 1, ICAM’81. Johannesburg, Africa do Sul, 1981. Proceedings in Special Publication of Geological Society of South Africa, 7, p.175-200.
- Hitzman, M.W. 1995. Mineralization in the Irish Zn-Pb- (Ba-Ag) Orefield. In:Thompson, T.B.- Irish Carbonate-hosted Zn-Pb Deposits, Guidebook Series, **21**, Society of Economic Geologists.
- Hitzman, M.W.; Reynolds, N.; Sangster, D.F.; Allen, C.R.; Carman, C., 2003, Classification, Genesis, and Exploration Guides for Non-Sulfide Zinc Deposits. *Econ. Geol.*, **98**:685–714.
- Hodgson, C.J. & Lydon, J.W. 1977. Geological setting of some volcanogenic massive sulphide deposits and active hydrothermal systems: some implications for exploration.*CIM Bulletin*, **70**(786): 95-106.
- IBRAM. 2008. Relatório Produção de Minério Brasileira, p 165.
- Iyer, S. S; Hoefs, J; Krouse, H. R. 1992. Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil: Implications on Ore Genesis. *Economic Geology*, v. 87, n. 2, p. 437 - 443.

- Iyer, S. S.; Krouse, H. P.; Babinski, M. 1993. Isotope investigations on carbonate rocks hosted lead-zinc deposits from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil: Implications for ore genesis and prospect evaluation. In: Simpósio do Cráton do São Francisco, 2., Salvador, 1993. *Anais*. Salvador, SBG, p. 338-339.
- Iyer, S. S. 1984. A discussion on the lead isotope geochemistry of galenas from the Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 19, p. 132 - 137.
- Jacquin, J.P; Gateau, C; Remon, G. 1984. Développements de la Minéralogie Appliquée au Traitement des Minerais. *Industries Minérale*. Vo. 66 n 4, p 172-188.
- Jones, M.P. Applied Mineralogy – A Quantitative Approach. Graham & Trotman, London. 259p.1987.
- Klaus, W. & Large, D.E. 1980. Submarine-exhalative Cu-Pb-Zn deposits: a discussion of their classification and metallogenesis. *Geologisches Jahrbuch*, ReiheD-Heft40: 13-58.
- Large, D.E. 1980. Geological parameters associated with sediment-hosted, submarine-exhalative lead-zinc Deposits: an empirical model for mineral exploration. *Geologisches Jahrbuch*, ReiheD-Heft40: 59-129.
- Laznicka, P. 1988. Breccias and coarse fragmentites: petrology, environments, associations ores. *Developments in Economic Geology*, **25**. Elsevier Science Publishers. 832 p.
- Leach, D.L & Sangster, D.F. 1993. Mississippi Valley-type Lead-Zinc deposits *In*: Kirkhan, R.V; Sinclair, W.D; Thorpe, R.I; Duke, J.M (eds) - Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada, *Special Paper*, **40**, p.289-314.
- Misi, A.; Tassinari, C. C. G.; Iyer S. S. (1997a) New isotope data from the Proterozoic lead-zinc (Ag) sediment-hosted sulfide deposits of Brazil: implications for their metallogenic evolution. In: South-American Symposium on Isotope Geology, 1., Campos do Jordão, 1997. *Extended Abstracts*. Campos do Jordão, p. 201 - 203.
- Misi, A. 2010. Comparing metallogenic and phosphogenic events in the intracratonic and passive margin Proterozoic basins of the SF Craton: The Bambuí/Una and Vazante Groups. IV Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Memórias [CD-ROM]
- Misi, A., 2001. Estratigrafia isotópica das seqüências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Idades e correlações. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Minerais*. SBG/MG, p. 67 – 92.

- Moeri, E. (1972) On a columnar stromatolite in the Precambrian Bambuí Group of Central Brazil. *Eclog. Geol. Helv.*, v. 65, p. 185 - 195.
- Monteiro, L.V.S., 1997. *Contribuição à gênese das mineralizações de Zn da Mina de Vazante, Vazante, MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Monteiro, L.V.S., 2002. *Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, IG - Universidade de São Paulo.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Spiro, B., Graça, R., Oliveira, T.F. de, 1999. The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil: Constraints on willemite mineralization and fluid evolution. *Exploration Mining and Geology*, 8:21–42.
- 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.
- Monteiro, L.V.S.; Bettencourt, J.S.; Juliani, C.; Oliveira, T.F., 2007. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. *Gondwana Research*, 11:362-381.
- Neumann, R., Schneider, C.L., Alcover Neto, A., 2004. Caracterização Tecnológica de Minérios. In: Luz, A.B. da, Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M. de (Eds). *Tratamento de Minérios*. Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, pp. 55-111.
- Nunes, Samuel Ferreira, Geólogo Votorantim Zinco, comunicação verbal
- Ohle, E.L. 1959. Some considerations in determining the origin of ore deposits of the Mississippi Valley type. *Economic Geology*, **54**(5): 769-789.
- Ohle, E.L. 1980. Some considerations in determining the origin of ore deposits of the Mississippi Valley type-Part II. *Economic Geology*, **75**: 161-172.
- Ohle, E.L. 1985. Breccias in Mississippi Valley- Type Deposits. *Economic Geology*, **80**, p. 1736-1752.
- Oliveira, T.F. de, 1998 As Minas de Vazante e de Morro Agudo. In: *Workshop Depósitos Minerais Brasileiros de Metais Base*, Salvador, CPGG-UFBA/ADIMB, p. 48 - 57.

- Pimentel, M.M.; Dardenne, M.A.; Fuck, R.A.; Viana, M.G.; Junges, S.L.; Fischel, D.P.; Seer, H.; 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.
- Pinho, J.M.M., 1990. *Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 115p.
- Qing, H. & Mountjoy, E.W. 1994. Origin of Dissolution vugs, caverns and breccias in the Middle Devonian Presqu'île Barrier, Host of Pine Point Mississippi Valley Type deposits. *Economic Geology*, **89**(4):858-976.
- Rigobello, A.E.; Branquinho, J.A.; Dantas, M.G. da S.; Oliveira, T.F.; Neves Filho, W., 1988. Mina de Zinco de Vazante. In: Shobbenhaus, C. & Coelho, C.E.S. (coords). *Principais depósitos minerais do Brasil*. DNPM, v.3, p. 101- 110
- Rouvier, H. 1971. Minéralisations plombo-zincifères et phénomène karstique Exemple tunisien: Le gisement du Djebel Hallouf. *Mineralium Deposita*, **6**:196-208.
- Russell, M.J., Solomon, M., Walsh, J.L. 1981. The genesis of sediment-hosted, exhalative zinc plus lead deposits. *Mineralium Deposita*, **16**:113-127.
- Samson, I.M. & Russell, M.J. 1987. Genesis of the Silvermines Zinc-Lead-barite Deposit, Ireland: Fluid Inclusion and Stable Isotope Evidence, *Economic Geology*, **82**: 371-394.
- Samson, I.M. & Russell, M.J. 1987. Genesis of the Silvermines Zinc-Lead-barite Deposit, Ireland: Fluid Inclusion and Stable Isotope Evidence, *Economic Geology*, **82**: 371-394.
- Sangster, D.F. 1988. Breccia-hosted lead-zinc deposits in carbonate rocks. In: James, N.P. & Choquette, P.W (eds). *Paleokarst*. Springer-Verlag. NY. Inc. p. 102-116.
- Sangster, D.F., 2003. A Special Issue Devoted to Nonsulfide Zinc Deposits: A New Look. *Econ. Geol.*, **98**:683-684.
- Sant'Agostinho, L.M; Khan, H. 1997. Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PMI/069, 29p.
- Sato, T. 1977. Los sulfuros masivos volcanogeneticos: su metalogenia y cladificacion. Dept. Geologia, Univ. Sonora, Publ. N°. 1, 54p.
- Silva, J.M. Caracterização Tecnológica. EEUFMG. Belo Horizonte, 1989.
- Silva, T.A.V. 2006. Estudos de Reagentes na Flotação de Minério de Zinco. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

- Souza, Adelson Dias, Gerente de Tecnologia de Votorantim Zinco, em email enviado em 31/01/2011, às 10horas.
- Taylor, S. 1984. Structural and paleotopographic controls of lead zinc mineralization in the Silvermines orebodies, Republic of Ireland. *Economic Geology*, **79**:529-548.
- Tschauder, R.J.; Landis, G.P.; Noyes, R.R. 1990<sup>a</sup>. Late Mississippian Karst Caves and Ba-Ag-Pb-Zn Mineralization in Central Colorado: Part I. Geologic Framework, mineralogy, and cave morphology. *Economic Geology, Monograph*, **7**: 308-338.
- Tschauder, R.J.; Landis, G.P.; Noyes, R.R. 1990<sup>b</sup>. Late Mississippian Karst Caves and Ba-Ag-Pb-Zn Mineralization in Central Colorado: Part II. Fluid inclusion, Stable Isotope, and Rock Geochemistry Data and a Model of Ore Deposition. *Economic Geology, Monograph*, **7**: 339-366.
- Votorantim Metais, 2007. Relatório de Dados Técnicos de Desenvolvimento de Processos MASA. Relatório Interno, 117p.
- Votoratim Metais, 2008. Relatório de Avaliação de Recursos. Relatório Interno, 72p.
- Votorantim Metais, 2009. Caracterização Tecnológica em Amostras de Minério de Silicatado de Zn. Relatório Interno, 117p.
- Wills, B.A. Mineral Procesing Technology. Pergamon Press., 1988.

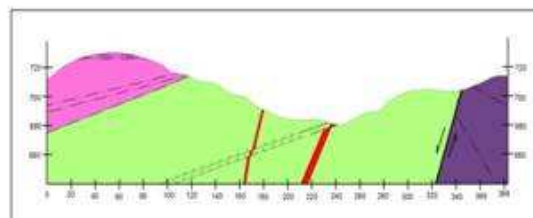
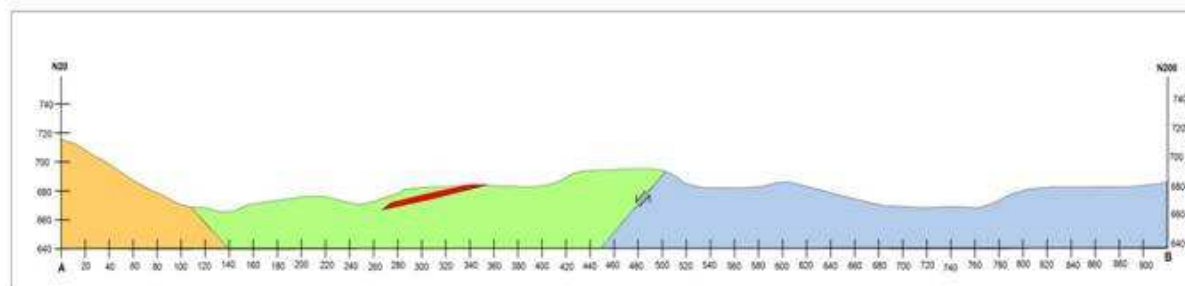
**Anexo 1:**

**Mapa Geológico do Extremo Norte da Mina de Vazante**

**Perfil Geológico do Extremo Norte da Mina de Vazante**



# SEÇÕES GEOLÓGICAS (1:2000)



## LEGENDA

### Rochas Hidrotermais

- Brecha Hidrotermal, de cor rosa a avermelhada, intensamente venulada, com pedos arredondados e subarredondados dispersos em matriz dolomítica recristalizada.
- Minério Hematítico da Mina da Mass, com estrutura maciça ou porcos brechados, de cor cinza-escuro, brilho metálico e alta densidade.

### Grupo Vazante

- MS, Pamplona Inferior:** Dolomito rosa, não muito bem definido, com laminações algas, bastante venulado com intercalações de níveis de margas.
- MP, Morro do Pinheiro Superior:** Dolomito cinza, maciço ou laminado, com brechas e laminações algas, com alguns níveis de brechas intratácicas e metapelitos.
- MI, Morro do Pinheiro Inferior:** Brecha intratácica de cor cinza, com matriz dolomítica, dentro de níveis angulares, com pouca influência hidrotermal.

- Filito carbonífero, de cor preta, quando fresco ou variegado quando atestado, framente laminado definindo o acamamento da rocha (Sc), com duas foliações marcadas.

- Acamamento Sedimentar
- Foliação Metamórfica (S1/S2)
- Falha de Vazante
- Falhas Secundárias
- Falha Secundária (Infenda)



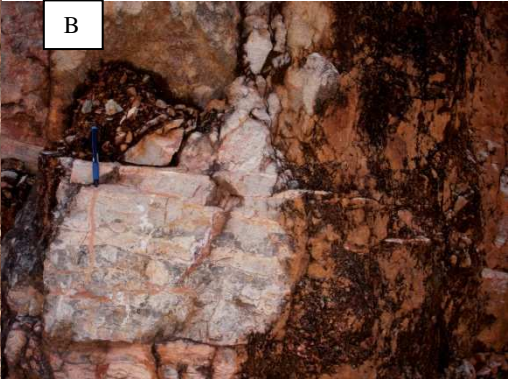
Modificado de Barros, 2008

**Anexo 2**  
**Fichas de Campo**

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                     |               |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Coordenada (UTM):<br>307707/8018595 | Cota (m): 641 |                                                                                     |
| Talude próximo a cava 5A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |               |                                                                                     |
| Descrição:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |               |                                                                                     |
| <p>Metadolomito de coloração acinzentada a amarronzada, tonalidade clara, textura fina e presença de lâmiação composicional bastante marcante. Esta última apresenta uma lâmian de granulação mais fina e esbranquiçada, enquanto a outra é pouco mais grosseira acinzentada a amarronzada, podendo apresentar <i>bird's - eyes</i>. As lâmianções podem aparecer perturbadas por planos de baixo ângulo que causam deslocamento centimétricos. É possível observar também, níveis brechados também centimétricos.</p> <p>O metadolomito é cortado por vênulas preenchidas por dolomita férrica avermelhada e hematita.</p> <p>Planos de falhas concordante e discordante da mineralização ocorrem formando cunhas.</p> |                                     |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                     |               |                                                                                     |
| Família 1: S <sub>0</sub> marcado pela lâmiação e diferenças composicionais/coloração                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 163/50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                                                     |
| Família 2: PM – marcado por planos de falha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 295/55                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                                                     |
| Família 3: PC – marcados por planos de falha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 116/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                                                     |
| Família 4: N – marcados por planos de falha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 350/75                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                                                     |
| Aleatórias: BA – marcados por planos de falha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 196/35, 206/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                     |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                     |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>lâmianções perturbadas por planos de falha de baixo ângulo e diferenciação composicional com presença de bird's-eyes. (B) Plano de falha concomitante a mineralização e plano contrário.</p>                                                                                                                                                                         |                                     |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Coordenada (UTM):<br>307711/ 8018686 | Cota (m): 617 |                                                                                     |
| Cava 5A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Descrição:</p> <p>Lentes com aspectos anastomosados, mineralizadas. A mineralização apresenta uma textura fina, espessura de aproximadamente 1 m, coloração arroxeada a acinzentada e aparece envolvida por planos preenchidos por hematita e clorita. Veios de hematita cortam a porção rica em willemita. Além disso, observam-se nos planos de falha, nítidas lineações minerais e planos discordantes dos mineralizados, contendo também hematita</p> <p>Acima do corpo de willemita, próximo a 3 m de distância, é possível verificar mesmo metadolomito do ponto 1, com níveis brechados mais destacados, estando estes deslocados por planos de baixo ângulo.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: S <sub>0</sub> marcado pela diferenças composicionais/coloração em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 240/20, 230/30, 225/20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: PM – marcado por planos de falha e planos na porção mineralizada                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 247/55, 289/40, 290/75, 282/70, 285/40, 260/69, 263/60, 297/55                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3: PC – marcados por planos de falha também preenchidos por hematita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 130/55, 095/85, 111/75                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4: NW – marcados por planos de falha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 003/80, 035/90                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias: Lineações minerais em planos de falha PM e BA marcado por deslocamento de níveis brechados em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 193/35, 229/45 e 166/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>(A) Padrão anastomosado das lentes de hematita que envolve metadolomitos e plano de falha concordante com a mineralização. (B) Lente de willemita.</p>                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Coordenada (UTM):<br>307728/ 8018677 | Cota (m): 626 |                                                                                     |
| Cava 5A – acima do ponto 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Descrição:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| <p>Lentes de calamina, bem cristalizada, associada à metamarga e metadolomito. Observa-se que a mineralização está controlada pelo Sn da marga.</p> <p>A metamarga aparece com coloração acinzentada e quando muito alterada mostra-se esverdeada. É possível observar duas foliações (S1 e S2) e raramente intercalação de níveis cinza escuros e verde escuros, os quais marcam o bandamento composicional. Este último aparece dobrado e bastante perturbado. A foliação desta rocha, muitas vezes, delimita as lentes de calamina, servindo de <i>trap</i> para a mineralização.</p> <p>O metadolomito ocorre nas lentes de calamina ou intercalado na metamarga, o qual aparece bastante alterado, com coloração amarronzada clara.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: S <sub>0</sub> marcado pela diferenças composicionais/coloração na marga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 126/10, 210/20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: PM – marcado por planos concordantes a mineralização                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 224/50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3: PC – marcados por planos de falha discordante a mineralização                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 110/55                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4: Foliação em marga (Sn)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 272/40, 261/30, 320/15, 115/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Lente de calamina associada à marga e metadolomito alterados.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Número do ponto: 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Coordenada (UTM):<br>307766/ 8018687 | Cota (m): 630 |
| Cava 5A – acima do ponto 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |
| <p align="center"><b>Descrição:</b></p> <p>Metadolomito semelhante ao ponto 1. A rocha apresenta coloração acinzentada a amarronzada clara, com níveis brechados centimétricos e esteiras de ciano-bactérias. Os níveis brechados são marcados por clastos angulosos, claros e são envolvidos por matriz acinzentada de textura bastante fina, semelhante à composição da porção acinzentada da rocha.</p> <p>É possível verificar descontinuidades contendo hematita com inclinação contrária a mineralização e outras de baixo ângulo que perturbam a lâminação dos metadolomitos.</p>                                                                |                                      |               |
| <p align="center"><b>Descontinuidades – atitudes e características</b></p> <p>Família 1: S<sub>0</sub> marcado pela diferenças composicionais e lâminação no metadolomito</p> <p align="center">Medidas: 240/20, 255/26</p> <p>Família 2: PM – marcado por planos concordantes a mineralização</p> <p align="center">Medidas: 224/50</p> <p>Família 3: PC – marcados por planos de falha discordante a mineralização e preenchidos por hematita</p> <p align="center">Medidas: 115/80</p> <p>Família 4:</p> <p align="center">Medidas:</p> <p>Aleatórias: BA – planos que deslocam lâminações em metadolomito</p> <p align="center">Medidas: 150/25</p> |                                      |               |
| <p align="center"><b>Imagens</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>A</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B</p>  </div> </div> <p align="center">Planos de falha contendo hematita e contrários aos da mineralização (B) Níveis brechados em metadolomito</p>                                                                                                                                     |                                      |               |

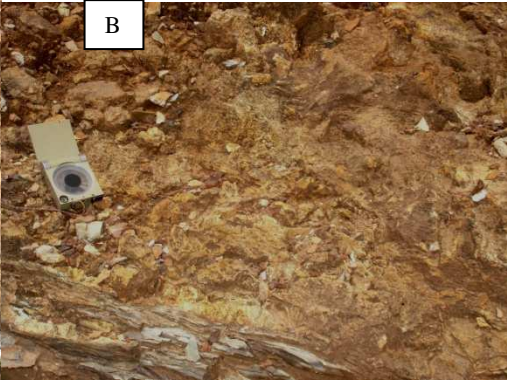
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)</b>                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |  |
| Número do ponto:<br>5                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Coordenada (UTM):<br>307775/ 8018640 | Cota (m): 651 |                                                                                     |
| Cava 5A – acima do ponto 4                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Descrição:</b></p> <p>Metadolomito idem ao ponto 4, porém mais rosado devido alteração. Na rocha verifica-se que o acamamento sedimentar é marcado por esteira de ciano-bactérias.</p> <p>Presença de planos de direção NW que parecem definir falhas posteriores a mineralização.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Descontinuidades – atitudes e características</b>                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: S <sub>0</sub> marcado pela esteiras de ciano-bactérias no metadolomito                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 260/20, 245/25                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2:                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4: NW                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 040/85, 035/90                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Imagens</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Planos de direção NW em metadolomito.                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                      |               |                                                                                     |

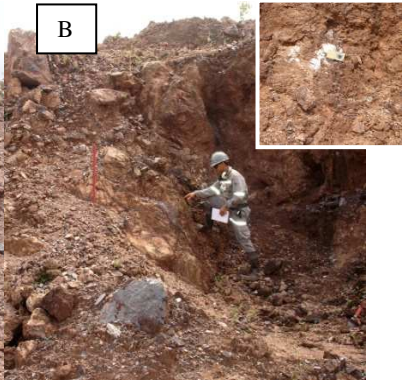
| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Coordenada (UTM):<br>307927/ 8019050 | Cota (m): 685 |                                                                                     |
| Cava 6A – acima do ponto 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| <p>Descrição:</p> <p>Metadolomito de coloração rosada, granulação média a fina e esteiras de ciano-bactérias que marcam o acamamento sedimentar (S0). Nesta rocha observam-se veios de hematita e vênulas de dolomita férrica que cortam o metadolomito. Além disso, planos concordantes e discordantes da mineralização também podem ser verificados.</p> <p>Próximos ao metadolomito observam-se brechas, também rosadas, com clastos subarredondados e matriz fina de coloração rosada clara. Essas brechas são associadas a lentes de hematita.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: S <sub>0</sub> marcado pela esteira de ciano-bactéria no metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 224/35                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: PM- plano concordante com a mineralização presente em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 288/50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3: PC- plano discordante da mineralização presente em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 120/50, 150/55, 149/80, 127/80, 140/75, 125/70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">A</div>  </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">B</div>  </div> </div>                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| <p>(A) Brecha dolomítica de coloração rosada. (B) Afloramento de metadolomito rosado com veios de hematita.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                     |               |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Coordenada (UTM):<br>307939/8018952 | Cota (m): 679 |                                                                                     |
| Cava 6A – acima do ponto 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                     |               |                                                                                     |
| <p>Descrição:</p> <p>Metadolomito de coloração rosada, com esteiras de ciano-bactérias e cortado por veios de hematita, semelhante à levantada no ponto 6. Planos de falha concordantes e discordantes a mineralização, preenchidos por hematita especular, estão presentes no afloramento. Além disso, verificam-se planos de baixo ângulo que parecem definir um falhamento que é quase concomitante com o <math>S_0</math>. Observa-se brechas, idem ao ponto anterior.</p> |                                     |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                     |               |                                                                                     |
| Família 1: BA – planos de baixo ângulo quase concordante com o $S_0$ do metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 264/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |               |                                                                                     |
| Família 2: PM- plano concordante com a mineralização, preenchidos por hematita, presente em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 288/45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |               |                                                                                     |
| Família 3: PC- plano discordante da mineralização presente em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 123/50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |               |                                                                                     |
| Família 4: Lineação mineral em plano de falha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas: 220/15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                     |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                     |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                     |               |                                                                                     |
| Falhas de baixo ângulo em metadolomito rosado.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                     |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Coordenada (UTM):<br>307913/ 8019032 | Cota (m): 666 |                                                                                     |
| Cava 6A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Descrição:</p> <p>Metadolomito com características idem ao ponto anterior, porém intercalado com metamarga e cortados por inúmeros veios de hematita.</p> <p>A metamarga ocorre de coloração acinzentada, semelhante ao ponto 3 e delimitam a mineralização de calamina.</p> <p>As lentes de hematita também ocorrem associadas à calamina e às vezes parecem estar substituindo níveis de metamarga.</p> <p>Os corpos de minério supergênico de Zn, também preenchem planos de direção NW.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: NW– planos preenchidos por calamina                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 045/75, 054/35, 012/70, 027/65, 054/65,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: PM- plano concordante com a mineralização, preenchidos por hematita, presente em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 305/50, 266/75                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3: PC- plano discordante da mineralização presente em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 140/35, 105/60, 134/75, 140/80, 165/80                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Metadolomito intercalado com metamarga, níveis com calamina e cortado por veios preenchidos por hematita.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Coordenada (UTM):<br>308062/ 8018955 | Cota (m): 673 |                                                                                     |
| Próximo a cava 7A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| <p>Descrição:</p> <p>Metadolorudito com clastos esbranquiçados, subarredondados a angulosos e envolvidos por matriz de textura fina acinzentada, micrítica. Esta rocha aparece intercalada com metamarga contendo Sn bastante expressivo.</p> <p>São observadas fraturas preenchidas por calamina bem cristalizada.</p>                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: Sn em metamarga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 160/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">A</div>  </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">B</div>  </div> </div> |                                      |               |                                                                                     |
| <p>(A) Matacão de metadolorudito cortado por veio de dolomita.</p> <p>(B) Metamarga intercalada com metadolorudito, o qual apresenta fraturas preenchidas por calamina (detalhe canto superior esquerdo).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |  |
| Número do ponto:<br>10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Coordenada (UTM):<br>308103/ 8018980 | Cota (m): 703 |                                                                                     |
| Próximo a cava 7A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Descrição:</b></p> <p>Lentes de calamina associada à metadolomito alterado e controladas por níveis de metamarga. Esta última, de coloração acinzentada e alterada, aparece controlar a mineralização servindo como <i>trap</i> A metamarga apresenta-se foliada, onde o Sn ocorre paralelo a <math>S_0</math>.</p> <p align="center">Observam-se níveis de metadolorudito idem ao ponto anterior.</p>                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: Sn em metamarga // ao $S_0$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 200/25                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>A</b></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>B</b></p> </div> </div> <p>(A) Lente de calamina entre níveis de metamarga. (B) Detalhe da foto ao lado, mostrando calamina associada à metadolomito.</p> |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                    |               |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Coordenada (UTM):<br>30804/8019040 | Cota (m): 690 |                                                                                     |
| Próximo a cava 7A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                    |               |                                                                                     |
| Descrição:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                    |               |                                                                                     |
| <p>Lentes de calamina alterada associada à hematita. Está última aparece cortando e intercalada (substituindo metamarga?) com metadolomito rosado semelhante ao do ponto 6.</p> <p>Os corpos de calamina estão alterados e com coloração amarronzada. É possível observar bolsões de hidrozinco associado à hemimorfita, goethita e argilominerais.</p> <p>Os níveis hematíticos são bastante fraturados, presentes em planos de direção NE, discordante e concordante a mineralização.</p> <p>Clivagens espaçadas são verificadas e estão associadas a zonas de cisalhamentos contendo hematita e clorita.</p> |                                    |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                    |               |                                                                                     |
| Família 1: PM – planos em corpos de hematita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                    |               |                                                                                     |
| Medidas: 280/25                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                    |               |                                                                                     |
| Família 2: NE – planos de direção norte em corpos de hematita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                    |               |                                                                                     |
| Medidas: 350/80                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                    |               |                                                                                     |
| Família 3: PC – planos discordantes a mineralização em corpos de hematita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                    |               |                                                                                     |
| Medidas: 155/75                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                    |               |                                                                                     |
| Família 4: Planos da zona de cisalhamento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                    |               |                                                                                     |
| Medidas: 275/45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                    |               |                                                                                     |
| Aleatórias: Lineação mineral                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                    |               |                                                                                     |
| Medidas: 280/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                    |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                    |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">A</div>  </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">B</div>  </div> </div>                                                                                          |                                    |               |                                                                                     |
| <p>(A) Zona de cisalhamento em metadolomito. (B) lente de calamina associada a veios de hematita. Detalhe de bolsão de hidrozinco, no canto superior direito da imagem.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                    |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 12                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Coordenada (UTM):<br>308019/ 8019188 | Cota (m): 705 |                                                                                     |
| Próximo ao contato com a formação Serra do Garrote                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Descrição:<br>Metadolomito rosado e alterado semelhante ao ponto anterior. Planos de direção contrária a mineralização aparecem preenchidos por calamina e hematita. Esta última ocorre também em veios que cortam os metadolomitos.<br>É possível verificar planos concordantes da mineralização nos veios de hematita, as quais apresentam fraturas preenchidas por hidrozinquita. |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: PM – planos em corpos de hematita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 255/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: PC – planos discordantes a mineralização em corpos de hematita                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 140/70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Veios de hematita fraturada e preenchida por hidrozinquita.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Coordenada (UTM):<br>308046/ 8019177 | Cota (m): 681 |                                                                                     |
| Próximo ao contato com a formação Serra do Garrote                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Descrição:</p> <p>Metadolomito rosado e alterado semelhante ao ponto anterior, intercalado com calamina e metamarga acinzentada. Contém planos que marcam falhas de baixo ângulo concordantes com o S<sub>0</sub>, o qual é cortado por veios preenchidos por hematita. Esta última ocorre fraturada e contendo hidrozincolita nas fraturas.</p> <p>É possível verificar planos concordantes da mineralização e caimento para NW nos veios de hematita e metamarga. Os planos de caimento para NW são também preenchidos por calamina e clorita.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: PM – planos em corpos de hematita e metamarga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 289/40, 280/70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: N – planos em corpos de hematita preenchidos por hemimorfita e hidrozincolita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 320/85                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3: BA – planos em metadolomitos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 280/25                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
|  <p align="center">Metadolomitos alterados com nível cortado por veios de hematita.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Coordenada (UTM):<br>308067/ 8019275 | Cota (m): 688 |                                                                                     |
| Próximo ao contato com a formação Serra do Garrote                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| <p>Descrição:</p> <p>Metadolomito intercalado com metamarga. Este metadolomito aparece rosado e lâmiando com raros níveis brechados e planos de baixo ângulo que definem falhas. Esta última desloca o bandamento.</p> <p>A metamarga ocorre acinzena, com diferenças composicionais relativas à coloração acinzena escura e clara, semelhante aos pontos anteriores.</p> <p>Faturas, de inclinação próxima a 90 graus, cortam o metadolomito e estão preenchidas por calamina. Observam-se planos de falhas contrários a inclinação da mineralização e S<sub>0</sub>.</p>                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: PC – planos em metamarga e veios de hematita                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 195/30, 160/90                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: BA- planos de baixo ângulo em metadolomito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 255/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">A</div>  </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">B</div>  </div> </div> <p>(A) Metadolomitos alterados com falhas de baixo ângulo. (B) fraturas preenchidas por calamina.</p> |                                      |               |                                                                                     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |  |
| Número do ponto:<br>15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Coordenada (UTM):<br>308057/ 8019279 | Cota (m): 680 |                                                                                     |
| Contato da Serra do Poço Verde com a formação Serra do Garrote                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Descrição:</b></p> <p>Metadolomitos da formação Serro do Poço Verde, idem ao ponto anterior em contato com filitos carbonosos da Serra do Garrote. Os metadolomitos aparecem intercalados com metamargas e com níveis pouco brechados.</p> <p>Os filitos ocorrem em coloração esverdeada intercalada com lâminas de tonalidade mais escura e granulação mais fina, estando bastante dobrados.</p> <p>No contato observa-se presença de níveis ricos em calamina. Está última ocorre concordante a Sn e S<sub>0</sub>.</p> <p>É possível verificar planos de falha com lineação mineral e <i>steps</i> em filito. Este mostra que possivelmente a formação Serra do Poço Verde foi empurrada na formação Serra do Garrote.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: Sn contato                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 218/30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2:PC- Plano de falha contrário a mineralização em filito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 116/40                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3: Lineação mineral em plano de falha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 113/40                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
| Filito da Formação Serra do Garrote.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |

|                                                                                                   |                                      |               |                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)</b>                    |                                      |               | <br>UNICAMP |
| Número do ponto:<br>16                                                                            | Coordenada (UTM):<br>308138/ 8019253 | Cota (m): 666 |                                                                                                |
| Cava 7A                                                                                           |                                      |               |                                                                                                |
| Descrição:<br>Brecha dolomítica, semelhante ao ponto 6 intercalado/cortado por veios de hematita. |                                      |               |                                                                                                |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                     |                                      |               |                                                                                                |
| Família 1:                                                                                        |                                      |               |                                                                                                |
| Medidas:                                                                                          |                                      |               |                                                                                                |
| Família 2:                                                                                        |                                      |               |                                                                                                |
| Medidas:                                                                                          |                                      |               |                                                                                                |
| Família 3:                                                                                        |                                      |               |                                                                                                |
| Medidas:                                                                                          |                                      |               |                                                                                                |
| Família 4:                                                                                        |                                      |               |                                                                                                |
| Medidas:                                                                                          |                                      |               |                                                                                                |
| Aleatórias:                                                                                       |                                      |               |                                                                                                |
| Medidas:                                                                                          |                                      |               |                                                                                                |
| Imagens                                                                                           |                                      |               |                                                                                                |
|                                                                                                   |                                      |               |                                                                                                |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)</b>                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |  |
| Número do ponto: 17                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Coordenada (UTM):<br>308069/ 8019357 | Cota (m): 689 |                                                                                     |
| Contato da Formação Serra do Poço Verde com Serra do Garrote                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Descrição:</p> <p>Metadolomitos da formação Serra do Poço Verde em contato com filitos carbonosos da Serra do Garrote, idem ao ponto 15.</p> <p>É possível verificar a presença de calamina concordante com o contato e magnetitas/hematitas bem cristalizadas envolvidas por hidrozinca.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| Descontinuidades – atitudes e características                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: Contato metadolomito e filito                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 261/60                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2:                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Imagens                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Contato entre a Formação Serra do Poço Verde e Serra do Garrote.</p>                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |

|                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)</b>                                                                                |                                      |               |  |
| Número do ponto: 18                                                                                                                                           | Coordenada (UTM):<br>308052/ 8019395 | Cota (m): 693 |                                                                                     |
| Contato da Formação Serra do Poço Verde com Serra do Garrote                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Descrição:</b><br>Idem ao ponto anterior, porém observam-se níveis ricos em hematita e calamina no contato entre a formação Serra do Poço verde e Garrote. |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Descontinuidades – atitudes e características</b>                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: Contato metadolomito e filito rico em hematita e calamina                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 255/85                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2:                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                    |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                   |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Imagens</b>                                                                                                                                                |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 19                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Coordenada (UTM):<br>307065/ 8016559 | Cota (m): 664 |                                                                                     |
| Cava 1 A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Descrição:</b></p> <p>Metadolomito de granulação fina, com níveis ricos em quartzo, coloração amarronzada clara e com lâmiação e dobras intraformacionais. Esta rocha ocorre intercalada com metamargas de coloração esverdeadas e foliadas.</p> <p>É possível observar estruturas e planos dobrados que marcam empurrão em metadolomito e fraturas de direção NE.</p>                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Descontinuidades – atitudes e características</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: S <sub>0</sub> em metadolomito marcado por lâmiação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 230/10, 228/05                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: Sn em metamarga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 310/10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3: Fraturas de direção NE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 305/70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Imagens</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">A</div>  </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">B</div>  </div> </div> <p align="center">(A) Metadolomitos dobrados marcando empurrão. (B) Metadolomito com níveis ricos em quartzo.</p> |                                      |               |                                                                                     |

| Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |               |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Número do ponto: 20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Coordenada (UTM):<br>307150/ 8016700 | Cota (m): 669 |                                                                                     |
| Cava 1 A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Descrição:</b></p> <p>Metadolomito de granulação fina, com bolsões ricos em quartzo e bordas com hematita e carbonato de ferro. Localmente observa-se que o bandamento composicional está dobrado, devido a reflexo do empurrão descrito no ponto anterior.</p> <p>Acima do metadolomito já descrito, verifica-se outra rocha de mesma natureza, porém alterada e mais rosada, semelhante ao ponto 6. Ambas as rochas ocorrem intercaladas com metamargas de coloração esverdeadas a acinzentada e foliadas.</p> |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Descontinuidades – atitudes e características</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Família 1: S<sub>0</sub> em metadolomito marcado por lâminação</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Medidas: 190/30, 028/30</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Família 2: Plano que marca empurrão (plano axial da dobra)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Medidas: 145/50</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Família 3:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Medidas:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Família 4:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Medidas:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Aleatórias:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center">Medidas:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| <p align="center"><b>Imagens</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| <div align="center">  </div> <p align="center">Metadolomitos dobrados marcando empurrão.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |

|                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ficha de campo – Caracterização do Extremo Norte – Mina de Vazante (MG)</b>                                                                                                  |                                      |               |  |
| Número do ponto: 21                                                                                                                                                             | Coordenada (UTM):<br>307300/ 8016777 | Cota (m): 674 |                                                                                     |
| Próximo a limite da Cava 1 A com 3A                                                                                                                                             |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Descrição:</b><br>Metadolomito de granulação fina, lâmiando e coloração amarronzada clara. Esta rocha ocorre intercalada com metamargas de coloração esverdeadas e foliadas. |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Descontinuidades – atitudes e características</b>                                                                                                                            |                                      |               |                                                                                     |
| Família 1: S <sub>0</sub> em metadolomito marcado por lâmiação                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 294/45, 290/30, 250/80                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |
| Família 2: NW - plano de falha em metadolomito                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas: 007/65, 346/55                                                                                                                                                         |                                      |               |                                                                                     |
| Família 3:                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Família 4:                                                                                                                                                                      |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| Aleatórias:                                                                                                                                                                     |                                      |               |                                                                                     |
| Medidas:                                                                                                                                                                        |                                      |               |                                                                                     |
| <b>Imagens</b>                                                                                                                                                                  |                                      |               |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                 |                                      |               |                                                                                     |

### **Anexo 3. Análise Química**

| Amostrs       | Ag   | Au    | Ag   | Al   | As  | Ba      | Be   | Bi    | Ca       | Cd | Ce | Co  | Cr    | Cu         | Fe    | Hf   | K    | La    | Li   | Mg   | Mn    | Mo   | Na |  |
|---------------|------|-------|------|------|-----|---------|------|-------|----------|----|----|-----|-------|------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|----|--|
| MASA10-73987  | 14   | 0.04  | 15.3 | 0.21 | 71  | 25 <5   | <0.5 | 1.65  | 68.5     | 7  | 20 | 56  | 47.1  | 15.21 <0.5 | <0.01 | 2.3  | 8.4  | 0.9   | 472  | 4.8  | <0.01 |      |    |  |
| MASA11-74145  | 20   | 0.01  | 19   | 0.07 | 97  | 16 <5   | <0.5 | 1.73  | 54.2 <5  |    | 25 | 82  | 49    | 16.59 <0.5 | <0.01 | 1.5  | 8.2  | 0.93  | 703  | 4.6  | <0.01 |      |    |  |
| MASA27-75992  | 6    | 0.02  | 5.9  | 0.1  | 110 | 15 <5   | <0.5 | 1.65  | 74.4     | 14 | 26 | 51  | 13.6  | 23.33 <0.5 | <0.01 | 4.6  | 7.6  | 0.86  | 758  | 5.4  | <0.01 |      |    |  |
| MASA46-78204  | 11   | 0.01  | 8.2  | 0.09 | 33  | 3309 <5 | <0.5 | 6.98  | 142.7 <5 |    | 28 | 155 | 45.4  | 20.32 <0.5 | <0.01 | 2    | 9.4  | 3.75  | 1755 | 11.6 | <0.01 |      |    |  |
| MASA56-78640  | 12   | <0.01 | 10   | 0.19 | 73  | 51 <5   | <0.5 | 0.59  | 29.9 <5  |    | 15 | 304 | 56.7  | 37.83 <0.5 | <0.01 | 1.4  | 6.5  | 0.4   | 1847 | 11.8 | <0.01 |      |    |  |
| MASA56-78649  | 5    | 0.02  | 4.8  | 0.11 | 32  | 134 <5  | <0.5 | 3.72  | 144.6 <5 |    | 24 | 262 | 23.1  | 21.46 <0.5 | <0.01 | 2.3  | 4    | 1.82  | 1882 | 5.8  | <0.01 |      |    |  |
| MASA68-80002  | I.S. | I.S.  | 18.3 | 0.25 | 174 | 161 <5  | <0.5 | 0.95  | 71.7     | 7  | 27 | 37  | 48.4  | 19.51 <0.5 | <0.01 | 4    | 7.2  | 0.6   | 201  | 5.2  | <0.01 |      |    |  |
| MASA73-80485  | 21   | 0.05  | 21.1 | 0.31 | 159 | 33 <5   | <0.5 | 0.85  | 61.1 <5  |    | 46 | 170 | 30.7  | 21.14 <0.5 | 0.01  | 2.4  | 8.1  | 0.75  | 912  | 7    | <0.01 |      |    |  |
| MASA76-80892  | 13   | 0.01  | 18.1 | 0.15 | 67  | 70 <5   | <0.5 | 3.88  | 154.1 <5 |    | 15 | 39  | 18.5  | 5.48 <0.5  | 0.04  | 2.2  | 9.3  | 1.63  | 491  | 1.3  | <0.01 |      |    |  |
| MASA112-88926 | 13   | 0.02  | 8.2  | 0.07 | 28  | 522 <5  | <0.5 | 11.23 | 56.3 <5  |    | 12 | 143 | 25.5  | 20.91 <0.5 | <0.01 | 1.4  | 5.2  | 1.39  | 1425 | 7    | <0.01 |      |    |  |
| MASA114-89310 | <5   | 0.02  | 4.1  | 0.5  | 168 | 151 <5  | <0.5 | 0.7   | 26.3 <5  |    | 12 | 140 | 22.8  | 46.74 <0.5 | <0.01 | 2    | 4.8  | 0.56  | 911  | 12.3 | <0.01 |      |    |  |
| MASA115-89505 | 18   | 0.04  | 15.7 | 0.32 | 77  | 1678 <5 | <0.5 | 1.22  | 56.8     | 9  | 10 | 145 | 45.6  | 34.61 <0.5 | 0.06  | 3.3  | 5.8  | 0.63  | 1428 | 12.9 | <0.01 |      |    |  |
| MASA115-89524 | 14   | <0.01 | 3.9  | 0.15 | 69  | 208 <5  | <0.5 | 4.69  | 101.3 <5 |    | 11 | 61  | 992   | 3.81 <0.5  | 0.03  | 1.4  | 8    | 2.4   | 729  | 0.7  | <0.01 |      |    |  |
| MASA120-89847 | 12   | 0.01  | 13.2 | 0.13 | 95  | 1976 <5 | <0.5 | 4.53  | 158.7 <5 |    | 29 | 117 | 143.1 | 7.76 <0.5  | <0.01 | 1.8  | 10.9 | 2.41  | 1191 | 4.8  | <0.01 |      |    |  |
| MASA122-89980 | 18   | 0.01  | 16.5 | 0.43 | 30  | 189 <5  | <0.5 | 2.24  | 142.7    | 7  | 43 | 47  | 32.4  | 5.19 <0.5  | 0.01  | 3.7  | 8.7  | 1.6   | 1199 | 0.8  | <0.01 |      |    |  |
| MASA124-90067 | 40   | <0.01 | 41.4 | 0.1  | 116 | 310 <5  | <0.5 | 1.36  | 64       | 5  | 18 | 236 | 42.5  | 17.61 <0.5 | 0.01  | 3    | 8.4  | 0.71  | 1928 | 10.9 | <0.01 |      |    |  |
| MASA20-75646  | <5   | <0.01 | 6.3  | 0.14 | 62  | 67 <5   | <0.5 | 5.79  | 460.4    | 7  | 37 | 219 | 70.1  | 26.35 <0.5 | 0.03  | 3.8  | 3.5  | 3.22  | 2317 | 13.3 | <0.01 |      |    |  |
| MASA38-77144  | <5   | <0.01 | 0.8  | 0.91 | 30  | 94 <5   | <0.5 | 7.99  | 68.5     | 9  | 23 | 60  | 2.8   | 28.36 <0.5 | 0.07  | 5.2  | 21.4 | 2.32  | 545  | 3.3  | <0.01 |      |    |  |
| PQ45          | 27   | 0.04  | 32.9 | 0.25 | 123 | 16 <5   | <0.5 | 0.15  | 142.1 <5 |    | 22 | 11  | 425.5 | 9.22 <0.5  | <0.01 | 1.5  | 13.4 | 0.35  | 825  | 3.5  | <0.01 |      |    |  |
| MASA12-73705  | N.A. | N.A.  | 0.6  | 0.6  | 14  | 50 <5   | <0.5 | 18.26 | 722.5    | 8  | 59 | 21  | 15    | 4.2 <0.5   | 0.03  | 5.1  | 12.8 | 11.06 | 1496 | 0.9  | 0.01  |      |    |  |
| MASA20-75639  | N.A. | N.A.  | 0.7  | 5.77 | 6   | 5289 <5 | <0.5 | 5.02  | 4.4      | 49 | 18 | 96  | 83.6  | 2.9        | 2.8   | 2.91 | 25.5 | 60.1  | 4.86 | 919  | 5.7   | 0.04 |    |  |
| MASA20-75653  | <5   | <0.01 | 4.6  | 0.23 | 76  | 18 <5   | <0.5 | 0.43  | 14.5     | 13 | 44 | 250 | 90.3  | 57.26 <0.5 | <0.01 | 3.4  | 3.9  | 0.35  | 1662 | 24.7 | <0.01 |      |    |  |
| MASA47-78459  | <5   | <0.01 | 3.3  | 0.19 | 89  | 26 <5   | <0.5 | 2.26  | 76.4     | 11 | 40 | 416 | 39.7  | 49.94 <0.5 | <0.01 | 3.3  | 2    | 1.23  | 3469 | 20.4 | <0.01 |      |    |  |
| MASA73-80476  | N.A. | N.A.  | 2.2  | 0.4  | 54  | 48 <5   | <0.5 | 13.98 | 571.3    | 6  | 61 | 92  | 54.3  | 18.07 <0.5 | <0.01 | 2.6  | 9.5  | 8.36  | 1551 | 6.5  | <0.01 |      |    |  |
| MASA76-80887  | N.A. | N.A.  | 6.6  | 0.38 | 69  | 178 <5  | <0.5 | 3.54  | 43.6 <5  |    | 16 | 124 | 13.1  | 47.41 <0.5 | 0.09  | 3.3  | 5.6  | 0.69  | 819  | 13.3 | <0.01 |      |    |  |
| MASA82-81957  | N.A. | N.A.  | 1.6  | 0.44 | 73  | 180 <5  | <0.5 | 8.64  | 95.2     | 6  | 44 | 128 | 20.5  | 37.4 <0.5  | <0.01 | 2.4  | 3.4  | 4.84  | 1515 | 7.6  | <0.01 |      |    |  |
| MASA83-82030  | N.A. | N.A.  | 2.6  | 0.11 | 11  | 121 <5  | <0.5 | 18.3  | 510.3    | 6  | 42 | 16  | 24.1  | 5.89 <0.5  | 0.02  | 3.5  | 3.2  | 10.78 | 1096 | <0.5 | 0.01  |      |    |  |
| MASA84-82185  | N.A. | N.A.  | 0.8  | 0.22 | 7   | 171 <5  | <0.5 | 18.2  | 1090 <5  |    | 57 | 8   | 0.6   | 7.87 <0.5  | <0.01 | 2.7  | 1.1  | 10.59 | 1101 | 1.2  | <0.01 |      |    |  |
| MASA96-83866  | <5   | <0.01 | <0.5 | 0.96 | 18  | 90 <5   | <0.5 | 17.11 | 388.1    | 9  | 31 | 32  | 8.5   | 7.96 <0.5  | 0.08  | 4.9  | 15.5 | 10.67 | 635  | 1.2  | <0.01 |      |    |  |
| MASA99-84784  | N.A. | N.A.  | 1.9  | 0.42 | 53  | 50 <5   | <0.5 | 10.41 | 662.6    | 10 | 31 | 39  | 14.8  | 33.14 <0.5 | <0.01 | 3.9  | 7.6  | 5.64  | 1214 | 5.6  | <0.01 |      |    |  |
| MASA99-84793  | N.A. | N.A.  | 4.2  | 0.8  | 36  | 208 <5  | <0.5 | 11.94 | 178.9    | 10 | 57 | 24  | 9.4   | 26.1 <0.5  | 0.01  | 4.7  | 24.1 | 5.29  | 500  | 2.4  | 0.01  |      |    |  |
| MASA100-84844 | N.A. | N.A.  | 6.3  | 0.52 | 81  | 56 <5   | <0.5 | 0.61  | 8.8      | 11 | 51 | 42  | 11.5  | 44.31 <0.5 | 0.02  | 2.9  | 13.1 | 0.61  | 363  | 4.3  | <0.01 |      |    |  |
| MASA119-89561 | N.A. | N.A.  | 0.9  | 0.27 | 65  | 177 <5  | <0.5 | 4.23  | 43.8 <5  |    | 31 | 295 | 79.8  | 40.91 <0.5 | <0.01 | 1.6  | 5.7  | 2.25  | 3041 | 17.3 | <0.01 |      |    |  |
| MASA75-80773  | 13   | <0.01 | 10.6 | 0.31 | 206 | 52 <5   | <0.5 | 0.24  | 6.2 <5   |    | 24 | 190 | 48.3  | 50.96 <0.5 | <0.01 | 2    | 4.8  | 0.3   | 1024 | 12.4 | <0.01 |      |    |  |

| Amostras      | Nb   | Ni   | P    | Pb    | Rb   | S     | Sb   | Se | Sn   | Sr  | Ta   | Tb   | Ti     | U    | V    | W    | Y    | Zn      | Zr             | Ge              | Zn          |
|---------------|------|------|------|-------|------|-------|------|----|------|-----|------|------|--------|------|------|------|------|---------|----------------|-----------------|-------------|
| MABA10-73987  | 4.2  | 21.5 | 0.04 | 1514  | 0.5  | <0.05 | 16.6 | <1 | <0.5 | 14  | 2.2  | <0.5 | 0.007  | 3.1  | 55   | 0.9  | 2    | >400000 | 3.2            | 0.01            | 43.2        |
| MABA11-74145  | 2.4  | 20.5 | 0.09 | 3268  | 0.7  | <0.05 | 18.4 | <1 | <0.5 | 20  | 1.6  | <0.5 | <0.001 | 7.2  | 59   | 0.7  | 1.2  | >400000 | <0.5           | 0.02            | 39.86       |
| MABA27-75992  | 1    | 23.4 | 0.09 | 1988  | <0.5 | <0.05 | 14.7 | <1 | <0.5 | 18  | <0.5 | <0.5 | <0.001 | 3.8  | 52   | 0.9  | 1.3  | 354896  | <0.5           | <0.01           |             |
| MABA48-78204  | 0.6  | 25.6 | 0.05 | 2241  | <0.5 | 0.07  | 13.8 | <1 | 0.6  | 102 | <0.5 | <0.5 | 0.001  | 8.9  | 68   | 0.9  | 2.3  | 212757  | 2.2            | 0.01            |             |
| MABA56-78640  | 2.8  | 51   | 0.02 | 1440  | <0.5 | <0.05 | 14.2 | <1 | 0.8  | 8   | <0.5 | <0.5 | 0.003  | 9.7  | 184  | 1.6  | 3.6  | 187785  | 1.3            | <0.01           |             |
| MABA56-78649  | 2.3  | 50.5 | 0.03 | 1021  | <0.5 | <0.05 | 8.9  | <1 | <0.5 | 39  | <0.5 | <0.5 | 0.002  | 7.1  | 53   | 1.5  | 1.8  | 248237  | 1.4            | 0.01            |             |
| MABA68-80002  | 1    | 36.3 | 0.07 | 3578  | <0.5 | <0.05 | 16.4 | <1 | 0.6  | 17  | <0.5 | <0.5 | 0.012  | 7.9  | 48   | 0.6  | 2    | >400000 | 4.9            | 0.01            | 39.41       |
| MABA73-80485  | 2.1  | 78.2 | 0.07 | 4984  | 0.9  | <0.05 | 33.5 | <1 | 1    | 26  | <0.5 | <0.5 | 0.017  | 11.7 | 101  | 1.4  | 1.1  | 359252  | 4.9            | 0.01            |             |
| MABA76-80892  | 1.8  | 8.1  | 0.04 | 2118  | 2    | <0.05 | 2    | <1 | <0.5 | 56  | 0.8  | <0.5 | 0.004  | 2.5  | 38   | <0.5 | 1    | >400000 | 2.4            | 0.02            | 44.36       |
| MABA112-88926 | 0.7  | 18.2 | 0.03 | 730.5 | <0.5 | <0.05 | 6.4  | <1 | 0.5  | 337 | <0.5 | <0.5 | <0.001 | 3.5  | 31   | 0.5  | 0.7  | 135035  | 0.6            | <0.01           |             |
| MABA114-89310 | 3.3  | 36.1 | 0.05 | 2647  | <0.5 | <0.05 | 7.4  | <1 | <0.5 | 12  | <0.5 | <0.5 | <0.001 | 12.2 | 53   | 0.5  | 2.3  | 101519  | <0.5           | <0.01           |             |
| MABA115-89505 | 0.7  | 27.5 | 0.01 | 1576  | 2.2  | <0.05 | 20.6 | <1 | 43.2 | 32  | <0.5 | <0.5 | 0.006  | 3.8  | 63   | 0.7  | 1.5  | 232294  | 2.7            | <0.01           |             |
| MABA115-89524 | 1.8  | 8.2  | 0.05 | 1868  | 1.1  | <0.05 | 2.4  | <1 | <0.5 | 35  | <0.5 | <0.5 | 0.006  | 1.2  | 161  | <0.5 | 1    | >400000 | 2.4            | 0.01            | 43.05       |
| MABA120-89847 | 0.5  | 23.3 | 0.09 | 2757  | <0.5 | <0.05 | 4.7  | <1 | 5.9  | 39  | <0.5 | <0.5 | 0.005  | 2.3  | 33   | 1.1  | 2.5  | >400000 | 1.7            | 0.01            | 38.88       |
| MABA122-89980 | 1.2  | 27.9 | 0.04 | 1996  | 0.6  | <0.05 | 1.6  | <1 | <0.5 | 17  | <0.5 | 0.6  | 0.022  | 1.2  | 31   | <0.5 | 2.7  | >400000 | 7.2            | 0.02            | 46.17       |
| MABA124-90067 | <0.5 | 23   | 0.06 | 2530  | <0.5 | <0.05 | 6.5  | <1 | 0.7  | 15  | <0.5 | <0.5 | 0.003  | 5.5  | 38   | 1.4  | 0.9  | 395061  | 0.6            | 0.02            |             |
| MABA20-75645  | 2.9  | 59.1 | 0.04 | 2309  | 1    | <0.05 | 18.6 | <1 | 2.4  | 22  | <0.5 | <0.5 | 0.006  | 4.6  | 114  | 1    | 3.6  | 169232  | 3.3            | 0.01            | 16.16       |
| MABA38-77144  | 1.4  | 23.8 | 0.04 | 746.1 | 2.8  | <0.05 | 7.4  | 1  | <0.5 | 147 | <0.5 | 1    | 0.034  | 6.5  | 82   | 1.8  | 2.7  | 106236  | 14.2           | 0.01            | 8.85        |
| PO45          | 1.5  | 30.3 | 0.03 | 7981  | <0.5 | <0.05 | 14.7 | <1 | <0.5 | 13  | <0.5 | 1.1  | 0.01   | 4    | 1207 | 0.7  | 0.8  | 397506  | 2.4            | 0.02            | 38.87       |
| MABA12-73705  | 10.6 | 24.7 | 0.02 | 3198  | 1.3  | <0.05 | 4.7  | 1  | <0.5 | 44  | 5.7  | 0.9  | 0.034  | 1.6  | 45   | 0.6  | 3.5  | 28613   | <b>14.8</b>    | <b>&lt;0.01</b> | <b>2.95</b> |
| MABA20-75639  | 11.9 | 28.8 | 0.03 | 381.2 | 89.4 | 0.11  | 1.1  | 7  | 5.3  | 112 | 1.3  | 6.1  | 0.277  | 1.1  | 56   | 2.1  | 12.8 | 3827    | <b>54.6</b>    | <b>N.A.</b>     | <b>8.37</b> |
| MABA20-75653  | 2.3  | 99.9 | 0.04 | 1691  | <0.5 | <0.05 | 48.5 | <1 | 2.3  | 11  | <0.5 | <0.5 | 0.001  | 12.1 | 107  | 2    | 2.1  | 16810   | <b>&lt;0.5</b> | <b>&lt;0.01</b> | <b>1.67</b> |
| MABA47-78459  | 4.2  | 75.3 | 0.02 | 2209  | <0.5 | <0.05 | 31.9 | <1 | 0.7  | 13  | <0.5 | <0.5 | 0.001  | 7.2  | 69   | 0.9  | 1.4  | 6641    | <b>1.3</b>     | <b>&lt;0.01</b> | <b>8.65</b> |
| MABA73-80476  | 3.1  | 40   | 0.04 | 2504  | <0.5 | <0.05 | 24.6 | <1 | 1.2  | 46  | <0.5 | <0.5 | 0.013  | 12   | 106  | 0.7  | 2.5  | 33442   | <b>6.8</b>     | <b>&lt;0.01</b> | <b>3.37</b> |
| MABA76-80887  | 1    | 23.1 | 0.02 | 973.5 | 2.9  | <0.05 | 19.6 | <1 | 0.7  | 83  | <0.5 | <0.5 | 0.006  | 27   | 153  | 1.1  | 1.5  | 13630   | <b>2.7</b>     | <b>&lt;0.01</b> | <b>1.32</b> |
| MABA82-81957  | 4.8  | 51.7 | 0.04 | 3157  | <0.5 | <0.05 | 33.2 | <1 | 1.4  | 31  | <0.5 | <0.5 | 0.008  | 8.4  | 184  | 1.3  | 1.9  | 18857   | 3.6            | <0.01           | 1.88        |
| MABA83-82030  | <0.5 | 10.5 | 0.08 | 2940  | <0.5 | <0.05 | 6.1  | <1 | <0.5 | 51  | <0.5 | <0.5 | 0.003  | 2.4  | 112  | 0.7  | 3.9  | 12478   | 4.6            | <0.01           | 1.3         |
| MABA84-82185  | 0.6  | 25.8 | 0.02 | 3122  | <0.5 | <0.05 | 3    | <1 | <0.5 | 88  | <0.5 | <0.5 | 0.009  | 3    | 20   | <0.5 | 2.1  | 29678   | 4              | <0.01           | 2.61        |
| MABA96-83866  | 1.8  | 35.7 | 0.03 | 2387  | 3.1  | <0.05 | 6.4  | 1  | 0.7  | 139 | <0.5 | 1    | 0.034  | 3.3  | 149  | 1.1  | 3    | 18540   | 12.5           | <0.01           | 1.84        |
| MABA99-84784  | 1.6  | 15.8 | 0.01 | 2736  | <0.5 | <0.05 | 17.1 | <1 | <0.5 | 58  | <0.5 | <0.5 | 0.009  | 6.1  | 118  | 1.3  | 2.1  | 16405   | 3.6            | <0.01           | 1.7         |
| MABA99-84793  | 2    | 86.9 | 0.03 | 1199  | 0.6  | <0.05 | 12.2 | <1 | <0.5 | 154 | <0.5 | 1    | 0.036  | 13.3 | 77   | 1.5  | 3.4  | 38521   | 15.7           | N.A.            | 3.97        |
| MABA100-84844 | 0.8  | 44.1 | 0.02 | 296.7 | 0.9  | <0.05 | 22   | <1 | <0.5 | 24  | <0.5 | <0.5 | 0.003  | 7.3  | 104  | 1.7  | 1.8  | 47712   | 1.5            | <0.01           | 4.76        |
| MABA119-89561 | 0.5  | 40.1 | 0.02 | 2330  | <0.5 | <0.05 | 30   | <1 | 4.6  | 20  | <0.5 | <0.5 | 0.001  | 9    | 127  | 3.5  | 1.7  | 15811   | 3.7            | N.A.            | 1.57        |
| MABA75-80773  | 2.8  | 39.6 | 0.03 | 2962  | <0.5 | 0.08  | 94.7 | <1 | 0.7  | 8   | 0.8  | <0.5 | <0.001 | 35.7 | 213  | 2.5  | 2.3  | 41837   | 1.4            | <0.01           |             |

#### **Anexo 4. Manuscrito I**

**A Mina de Zinco Extremo Norte de Vazante, MG: Contexto Geológico e  
Caracterização do Minério Não-Sulfetado. (Revista Brasileira de Geociências)**

# A MINA DE ZINCO EXTREMO NORTE DE VAZANTE, MG: CONTEXTO GEOLÓGICO E CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO NÃO-SULFETADO

Mariana Gazire Lemos <sup>(1)</sup>; Lena Virgínia Soares Monteiro <sup>(1)</sup>

(1) Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6152, Rua João Pandiá Calógeras, 51, CEP: 13083-970, Campinas, SP, e-mails: [marianagazire@yahoo.com.br](mailto:marianagazire@yahoo.com.br); [lena@ige.unicamp.br](mailto:lena@ige.unicamp.br)

**Resumo** A Faixa Vazante-Paracatu, NW de Minas Gerais, representa o mais importante distrito zincífero do país. A Mina Extremo Norte de Vazante representa uma continuidade do *trend* de mineralização de Vazante com corpos de minério são hospedados por unidades dolomíticas do Membro Morro do Pinheiro Inferior (Formação Serra do Poço Verde), próximo ao contato com rochas metapelíticas da Formação Serra do Garrote, ambas do Grupo Vazante. O controle da mineralização é estrutural, assim como na Mina de Vazante, mas a zona de falha que a controla a distribuição dos corpos de minério apresenta traço curvo e direção N-S. A mineralização hipógena apresenta predominância de willemita hidrotermal. Altos conteúdos de ferro nas zonas mineralizadas relacionam-se à predominância de hematita nas partes menos profundas do depósito e ao fechamento de lentes de minério com willemita. O minério da Mina Extremo Norte de Vazante é consideravelmente mais empobrecido em elementos traços, tais como Ag, Cd, Ge e Pb em relação ao minério de Vazante. Tal fato pode estar relacionado ao conteúdo mais baixo de sulfetos no minério do Extremo Norte. A partir das relações mineralógicas, químicas e texturais pode-se sugerir que a participação de fluidos metalíferos, quentes e ascendentes, e meteóricos residentes, que representariam o paleoaquífero, seria provável para a formação da mineralização willemítica do Extremo Norte. As condições físico-químicas resultantes da mistura de fluidos seriam aquelas de pH neutro a básico, resultante da maior participação de fluidos meteóricos já aquecidos ou do tamponamento devido às reações com as rochas carbonáticas, sem decréscimo acentuado de temperatura.

*Palavras-chave:* zinco, Grupo Vazante, willemita, minério não-sulfetado.

**Abstract** *THE EXTREMO NORTE ZINC MINE, VAZANTE, MG: GEOLOGICAL SETTING AND CHARACTERIZATION OF THE NON-SULPHIDE ZINC ORE* The Vazante-Paracatu Belt, Minas Gerais state, is the most important Brazilian Zn district. The Extremo Norte Zn Mine represents a continuing trend of the Vazante mineralization. It is hosted by dolomitic units of the Lower Morro do Pinheiro Member (Serra do Poço Verde Formation, Vazante Group), close to the contact with metapelitic rocks of the Serra do Garrote Formation (Vazante Group). The mineralization is structurally-controlled and related to a curved fault with N-S trend. The hypogene ore comprises predominantly hydrothermal willemite. High contents of iron in the mineralized zones are related to the shallowest parts of the deposit and to envelopes around high-grade willemite ore in deeper portions. The ore is relatively depleted in Ag, Cd, Pb and Ge compared with Vazante samples. This may be related to lower sulfide contents in the ore samples of the Extremo Nore than those typical of the Vazante ore. The involvement of meteoric and metalliferous fluids would also be likely in the Extremo Norte area. The physicochemical conditions, resulting from the ideal mixing process for the willemite formation ore, would be those of the basic neutral pH, resulting from participation of heated meteoric fluids or plugging due to reactions with carbonate rocks, without rapid decrease in temperature.

*Keywords:* zinc, Vazante Group, willemite, non-sulphide zinc ore

## INTRODUÇÃO

A Faixa Vazante-Paracatu (Fig. 1), localizada na região noroeste de Minas Gerais, representa o mais importante distrito zincífero do país. Os depósitos de Vazante e Morro Agudo são responsáveis por toda a produção de concentrado de zinco brasileira, ostentando recursos estimados em 7,9 milhões de toneladas medidas com teor médio de 23,4% de zinco (minério willemítico de Vazante); 328 mil toneladas medidas com 15,04% de zinco (minério supérgeno de Vazante, com predominância de hemimorfita) e 2,25 milhões de toneladas medidas com 4,55% de zinco (minério sulfetado de Morro Agudo; Votorantim Metais Zinco, 2008).

Próximo à Mina de Vazante, a noroeste, o depósito de zinco da antiga Mineração Areiense S/A (MASA) começou a ser explorado em 1960 pelo Grupo Ingá. Todavia, em 1997 a mineradora entrou em processo de falência e a massa falida, sindicada pelo Banco de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais, foi leiloadada no ano de 2007, sendo a posse da área da MASA destinada à Votorantim Metais. No início de 2008 a área foi renomeada pela Votorantim Metais de Extremo Norte, em referência à sua localização em relação à Mina de Vazante.

Nos últimos anos, depósitos de zinco não-sulfetados (*non-sulphide zinc deposits* ou *carbonate-hosted willemite deposits*) vêm-se destacando no cenário internacional (Sangster, 2003; Brugger *et al.*, 2003; Hitzman *et al.*, 2003) devido aos teores de zinco mais elevados desse tipo de minério e aos avanços nas tecnologias de processamento mineral, que permitem a produção de concentrados de zinco de alta pureza com menor consumo de energia nos processos de beneficiamento. Tal mudança no cenário internacional justifica estudos detalhados nos distritos zincíferos brasileiros, em especial na Faixa Vazante-Paracatu, uma vez que o depósito de Vazante é considerado o maior exemplo mundialmente conhecido de depósito de zinco não-sulfetado de origem hipógena (Hitzman *et al.* 2003).

Estudos sobre a Mina de Zinco Extremo Norte, que representaria uma continuidade do *trend* mineralizado de Vazante, ainda não são reportados na literatura. Sua caracterização geológica é de fundamental importância para a compreensão dos mecanismos de gênese dessa classe de depósitos, que apresenta particularidades em relação às demais classes de depósitos de Pb-Zn hospedados em rochas carbonáticas, tais como presença de minério de zinco silicático (willemita,  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ) associados a significativos conteúdos de hematita, franklinita e/ou zincita, controle estrutural, associação com brechas hidrotermais e expressivos halos de alteração hidrotermal com intensa silicificação e presença de dolomita esparítica, carbonatos de ferro e clorita (Monteiro, 1997; 2002; Monteiro *et al.*, 1999; 2006; 2007).

## CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

### O Grupo Vazante

Os depósitos minerais do distrito zincífero de Vazante-Paracatu são hospedados por unidades do Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998), que representa uma das unidades metassedimentares do segmento sul da Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967) desenvolvida ao longo da margem oeste do Cráton do São Francisco (Fig. 1). O Grupo Vazante insere-se em um complexo sistema de *nappes* e falhas de empurrão com vergência para o Cráton do São Francisco, apresentando metamorfismo de baixo grau metamórfico.

O Grupo Vazante (Fig. 2) é constituído por uma espessa sequência marinha pelítico-carbonática aflorante em uma faixa N-S de aproximadamente 200 km, em contato tectônico com os grupos Canastra, a oeste, e Bambuí, a leste (Dardenne *et al.*, 1998).

As unidades basais do Grupo Vazante, de composição argilo-carbonática, inclui as formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha e Lagamar. A Formação Santo Antônio do Bonito é constituída por bancos métricos de quartzitos, microconglomeráticos, intercalados a níveis ardósianos e

diamictitos com clastos variados dispostos em matriz pelítica, ligeiramente fosfatada. A Formação Rocinha hospeda os principais depósitos e ocorrências de fosfatos do Grupo Vazante. É composta por metarritmitos com finas intercalações de quartzitos e ardósias e por um pacote espesso de ardósias e metassiltitos, regularmente intercalados a raras lentes de dolomitos rosados e paraconglomerados. A Formação Lagamar inclui delgado pacote de metarritmitos contendo intercalações de conglomerados, dolomitos estromatolíticos e calcários.

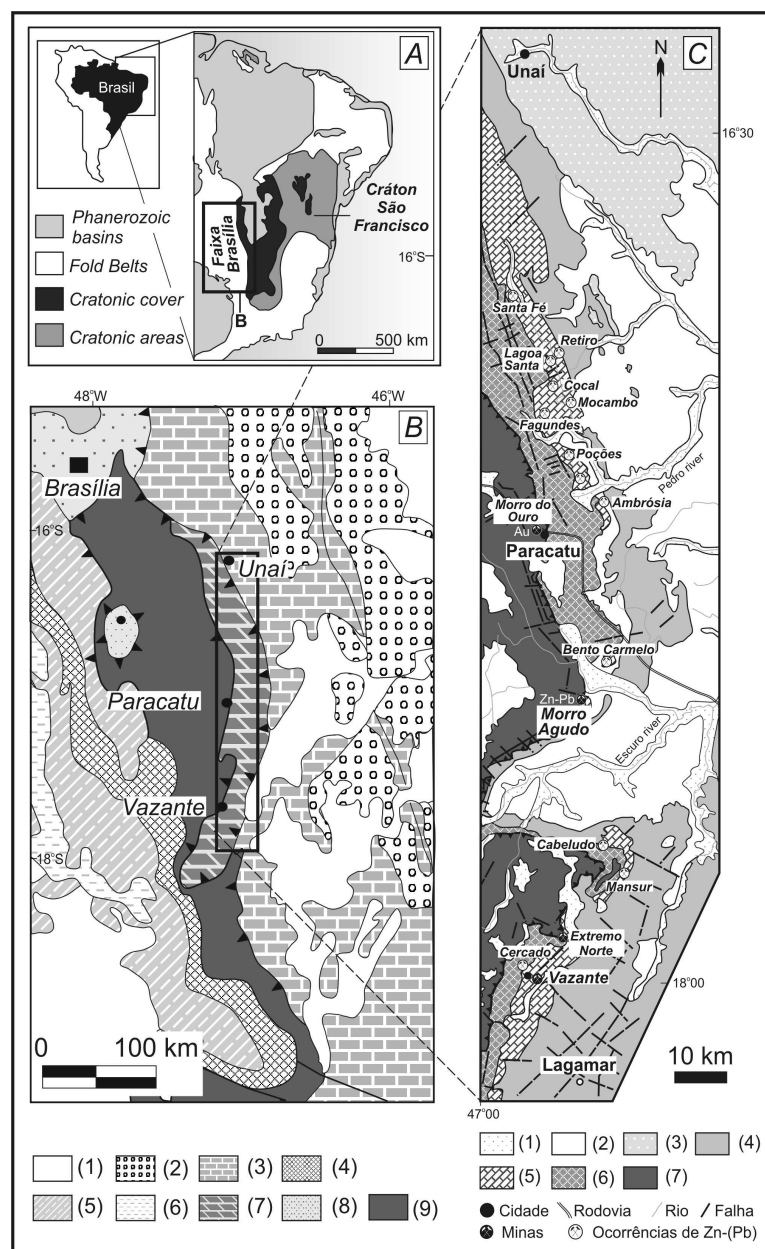


Figura 1. Contexto geológica da área de estudo. A. Localização da Faixa Brasília e Cráton do São Francisco; B. Mapa geológico do segmento sul da Faixa Brasília (Dardenne & Schobbenhaus, 2001): (1) Sedimentos fanerozóicos; (2) Grupo Bambuí, Formação Três Marias; (3) Subgrupo Paraopeba, Grupo Bambuí; (4) Formação Ibiá; (5) Grupo Araxá; (6) Granulitos e ortognaisses; (7) Grupo Vazante; (8) Grupo Paranoá; (9) Grupo Canastra; (C) Mapa geológico do Grupo Vazante e localização das minas de Vazante e Extremo (Votorantim Metais). (1) Aluviões; (2) Sedimentos quaternários; (3) Grupo Bambuí; (4 a 6) Grupo

Vazante: (4) Formação Serra do Garrote; (5) = Formações Morro do Calcário e Serra do Poço Verde; 6 Formação Lapa Formation; (7) Grupo Canastra, Formação Paracatu.

A Formação Serra do Garrote é composta por ardósia carbonosa, com intercalações de metassiltitos, quartzitos e dolomititos. Na região de Vazante, apresenta contato gradacional com dolomititos e ardósias da Formação Serra do Poço Verde, enquanto na região de Paracatu, está em contato com a Formação Morro do Calcário.

As unidades predominantemente dolomíticas do Grupo Vazante incluem a Formação Serra do Poço Verde e a Formação Morro do Calcário (Dardenne *et al.*, 1998). A primeira, subdivida nos membros Morro do Pinheiro Inferior e Superior e Pamplona Inferior e Médio (Fig. 2), é composta por uma sucessão de dolomititos bandados rosados a cinza e metassiltitos com intercalação rítmica de dolomititos rosados/vermelhos com ardósias carbonáticas, metassiltitos e ardósias com lentes de dolomititos, e representa a unidade hospedeira da Mina de Vazante. A Formação Morro do Calcário (Dardenne 1978, 1979; Dardenne *et al.*, 1998) inclui o Membro Pamplona Superior e apresenta na base dolomititos, geralmente cinza, que representam construções estromatolíticas recifais contendo em seus flancos fácies de retrabalhamento compostas por dolarenitos e doloruditos. Dolarenitos e doloruditos são as hospedeiras do depósito de chumbo e zinco da Mina de Morro Agudo (Fig. 2).

A Formação Lapa, superior, é caracterizada por metapelitos carbonáticos/carbonosos, cinza-escuro, laminados com algumas películas grafitosas. São frequentes nódulos geralmente milimétricos de dolomito micrítico impuro e de dolomita e/ou ankerita, lenticulares e alongadas paralelamente à laminação que podem ser de origem diagenética. Aparecem ainda camadas de filito ardoso grafito-carbonoso, preto e rico em pirita, de metassiltito e filito cinza-escuro a esverdeado e de frequentes lentes quartzíticas. Esta formação representaria um ambiente de deposição lagunar com águas calmas de profundidade moderada a rasa, o que seria evidenciado pelo dolomito carbonoso e intercalações de filitos (Dardenne *et al.*, 1998).

A deposição do Grupo Vazante tem sido relacionada ao ambiente de margem continental passiva, no qual teria se desenvolvido uma barreira orgânica, representada pelos recifes estromatolíticos (Dardenne & Schobbenhaus 2001). A idade de deposição do Grupo Vazante, contudo, é polêmica.

Inferências iniciais sobre sua idade basearam-se no reconhecimento da presença de estromatólitos colunares, que seriam característicos principalmente do Mesoproterozóico (*Conophyton metula Kirichenko*, 1350 a 950 Ma, Cloud & Dardenne, 1973). Datações Rb-Sr em filitos do Grupo Vazante indicaram idades de  $600 \pm 50$  Ma (Amaral & Kawashita, 1967) e  $680 \pm 10$  Ma (Couto *et al.*, 1981), que podem representar apenas o último fechamento do sistema isotópico, ou seja, a idade do evento metamórfico Brasileiro que afetou o grupo.

Devido à dificuldade de datação direta das rochas metassedimentares do Grupo Vazante, Babinski *et al.* (2005) e Rodrigues (2008) realizaram estudos geocronológicos em diques máficos que interceptam as rochas da Formação Serra do Poço Verde na área da Mina de Vazante. Contudo, as idades U-Pb em zircão obtidas (2,1 a 2,4 Ga) sugerem que os cristais de zircão analisados representariam xenocristais herdados do embasamento, principalmente em vista das idades modelo Sm-Nd ( $T_{DM} = 1,0$  Ga) obtidas para rocha total.

Estudos de proveniência dos sedimentos do Grupo Vazante apontaram, segundo Pimentel *et al.* (2001), fontes com idades modelo Sm-Nd ( $T_{DM}$ ) entre 2,1 a 1,7 Ga, que são valores intermediários entre os obtidos para o Grupo Paranoá (2,3 a 2,0 Ga) e Grupo Bambuí (1,9 a 1,3 Ga), levando os autores a sugerirem uma idade também intermediária para a deposição das rochas do Grupo Vazante.

Datações Re-Os em folhelhos da base da Formação Lapa ( $993 \pm 46$  e  $1100 \pm 77$  Ma) realizadas por Azmy *et al.* (2008) foram interpretadas como indicativas de idade mesoproterozóica (*ca.* 1000 Ma) para o Grupo Vazante.

Rodrigues (2008) ao analisar pelo método LA-ICP-MS U-Pb cristais de zircão detríticos de diferentes unidades do grupo constatou a contribuição de fontes diversas (935 a 3520 Ma), com predominância de fontes paleoproterozóicas ( $\sim 2,1$  Ga) para a Formação Serra do Garrote e

mesoproterozóicas (1,1 a 1,2 Ga) para as formações Morro do Calcário e Lapa. A população mais jovem de zircão (~ 935 Ma), contudo, foi identificada apenas nas unidades basais do Grupo Vazante, representadas pelas formações Santo Antônio do Bonito, Rocinha e Lagamar, sugerindo que esta fonte foi isolada ou recoberta durante a evolução da bacia (Rodrigues, 2008). Alternativamente, essas formações seriam mais novas, correlatas ao Grupo Bambuí, como proposto por Misi (2010). Essa última hipótese implicaria na colocação tectônica, a partir de cavalgamentos, das unidades mais antigas do Grupo Vazante sobre essas, o que implicaria na redefinição da estratigrafia do Grupo Vazante.

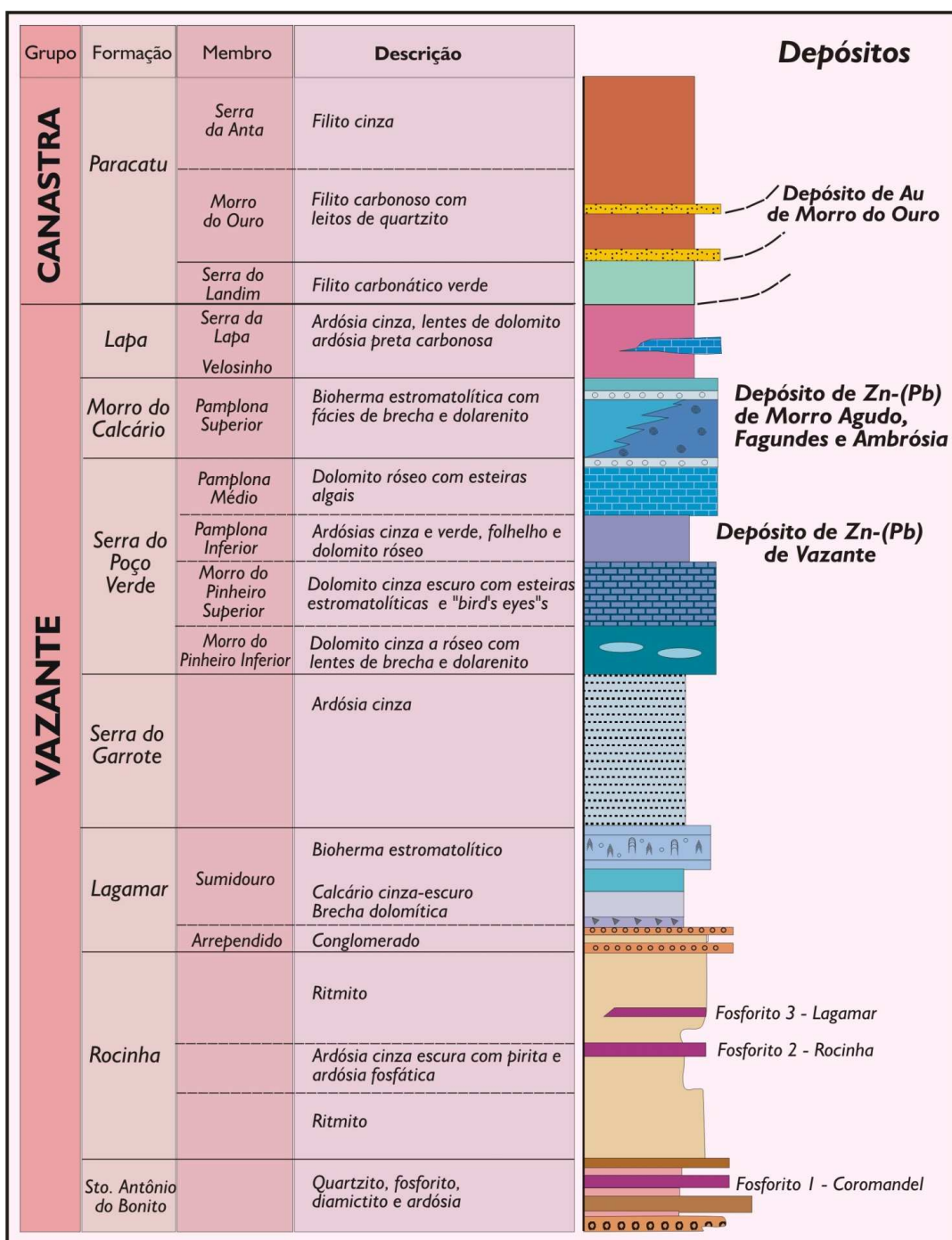


Figura 2. Coluna estratigráfica dos grupos Vazante e Canastra, empurrado sobre Grupo Vazante (Dardenne et al., 1998; Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

### Depósitos de zinco não-sulfetados do Grupo Vazante

O Grupo Vazante hospeda numerosas ocorrências e depósitos de Pb-Zn-(P), destacando-se os depósitos de Morro Agudo (Pb-Zn), Vazante (Zn), Rocinha ( $P_2O_5$ ) e Lagamar ( $P_2O_5$ ). Os principais depósitos de Zn e Pb apresentam predominantemente dois tipos principais de minérios. O primeiro tipo é representado pelo depósito sulfetado de Morro Agudo, com predominância de esfalerita, galena e pirita, e o segundo pela jazida silicatada de Vazante.

A Mina de Vazante corresponde ao principal depósito em exploração de zinco no Brasil, sendo também um dos maiores depósitos mundiais. O minério primário (hidrotermal) é composto por silicatos, principalmente willemita. Calamina supergênica (composta principalmente por hemimorfita) constitui um segundo tipo de mineralização associada a processos de carstificação.

O minério willemítico de Vazante associa-se à Zona de Falha de Vazante (Fig. 3) com atitude aproximada N50E/60NW. Esta tem sido interpretada como uma falha sin-sedimentar, reativada na fase compressional do Evento Brasileiro como uma falha transcorrente sinistrgira e inversa, e posteriormente, no final do Brasileiro, como uma falha normal lístrica (Dardenne, 1979; Pinho, 1990). O depósito de Vazante é hospedado por rochas da Formação Serra do Poço Verde, incluindo na capa metadolomitos, ardósia e filito da (Membro Pamplona Inferior) e na lapa dolomitos cinza (Membro Morro do Pinheiro Superior), além de corpos subordinados de rochas metabásicas, que podem representar diques de diabásio cisalhados e hidrotermalizados.

Na Zona de Falha de Vazante, uma complexa zona de brechas hidráulicas e veios preenchidos por dolomita, ankerita, siderita, jaspe, hematita e clorita, ocorre espacialmente associada aos corpos de minério de zinco (Monteiro, 1997), principalmente na zona de capa. Halos de alteração hidrotermal nos dolomitos da Formação Serra do Poço Verde também podem ser reconhecidos.

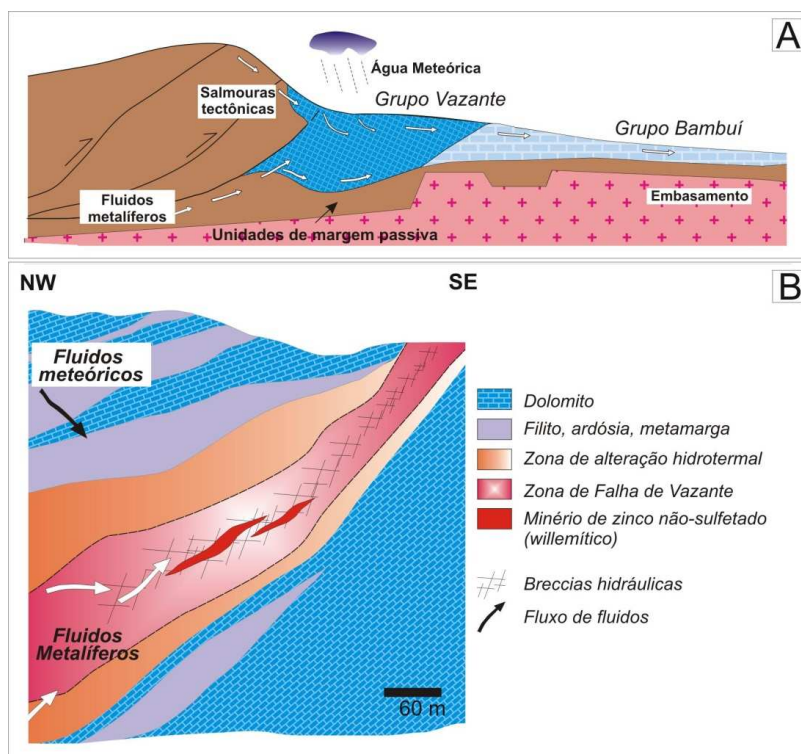


Figura 3. (A) Modelo esquemático de fluxo de fluidos hidrotermais no Grupo Vazante; (B) Modelo de fluxo de fluidos, metalíferos e meteóricos, associados à gênese do minério willemítico de Vazante (Monteiro *et al.*, 2007).

O minério mais importante da Mina de Vazante é predominantemente silicático, sendo constituído por willemita ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ), dolomita, siderita, quartzo e hematita com clorita, franklinita, zincita, magnetita, smithsonita, gahnita, barita e apatita subordinados. Corpos de minério sulfetado, menores, cisalhados, constituídos por esfalerita, e galena, com calcocita, covellita e greenockita associados, são também reconhecidos ao longo da Falha de Vazante (Monteiro, 1997; Monteiro *et al.*, 1999).

Até a década de 90, a origem do minério willemítico foi considerada supérgena (Amaral, 1968; Rigobello *et al.*, 1988). Estudos sobre a evolução estrutural (Pinho, 1990), e características petrológicas, geoquímicas, isotópicas e de inclusões fluidas (Monteiro, 1997; Monteiro *et al.*, 1999; 2006; 2007) confirmam a origem hidrotermal para o minério willemítico, sincrônica ao desenvolvimento da Zona de Falha de Vazante, possivelmente associada à mistura de fluidos metalíferos quentes e ascendentes e fluidos meteóricos, mais frios e menos salinos (Fig. 3).

## MÉTODOS

Os trabalhos de campo na área da Mina Extremo Norte de Vazante foram realizados em duas etapas visando ao detalhamento do contexto geológico, levantamento de medidas estruturais, redescritção dos testemunhos de sondagem e amostragem sistemática. Caracterização das amostras de minério e suas rochas hospedeiras foram realizadas a partir de petrografia em luz refletida e transmitida com uso de microscópio Leica DM EP com câmera digital acoplada a computador com *software* de aquisição e análise de imagem Leica QWin do Laboratório de Microtermometria do IG, UNICAMP. Detalhamento das relações texturais e da mineralogia foram realizadas com uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV- LEO 430i) com microanálise por dispersão de energia (EDS) no IG, UNICAMP e microsonda eletrônica (EDS e WDS – JEOL JXA 890RL) na UFMG. Análises químicas de elementos maiores, traços e ETR foram realizadas no ACME Labs., Vancouver, Canadá, em alíquotas das amostras caracterizadas petrograficamente. Para determinação dos elementos maiores e traços, utilizou-se a abertura das amostras com digestão de 4 ácidos a quente ( $\text{H}_2\text{O}$ , HF,  $\text{HClO}_4$  e  $\text{HNO}_3$ ) e leitura a partir de ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) e ICP-ES (*Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry*). A técnica *fire assay* foi empregada para quantificação de Au e Ag.

## A MINA DE ZINCO EXTREMO NORTE DE VAZANTE: CONTEXTO GEOLÓGICO

### Unidades hospedeiras: relações estratigráficas

A área do depósito de zinco do Extremo Norte é caracterizada por rochas pertencentes às formações Serra de Garrote e Serra do Poço Verde do Grupo Vazante.

#### *Formação Serra do Garrote*

A Formação Serra do Garrote na área é constituída quase que exclusivamente por filitos carbonosos, que se associam com brechas ferruginosas e blocos de hematita. Os filitos carbonosos apresentam cor preta a cinza-chumbo quando frescos, e são coloridos quando intemperizados, além de bastante homogêneos. Os afloramentos dessa unidade ocorrem a norte da área em grandes paredões, esculpidos na encosta dos taludes dentro da cava da mina.

Estes filitos são compostos basicamente por sericita, clorita e quartzo, por vezes com cristais detríticos ou autigênicos de feldspato, turmalina e estilpnomelano. Cristais pseudomorfos de pirita substituída por hidróxido e óxido de ferro, dispostos intersticialmente entre as palhetas irregulares

de sericita e cristais anédricos de quartzo, podem ser reconhecidos localmente. Possuem textura lepidoblástica e ocorrem como rochas finamente foliadas, com alternância de leitos com diferentes cores e granulometria, apresentando espessuras milimétricas a centimétricas, evidenciando seu acamamento sedimentar ( $S_0$ ), que se mantém paralelo a subparalelo a uma clivagem ardosiária ou foliação fílica ( $S_1$ ). Tanto o acamamento como a  $S_1$  são transpostas por uma foliação espaçada, com ângulo de mergulho mediano a alto ( $S_2$ ), bastante persistente e penetrativa.

No contato com a Formação Serra do Poço Verde, observa-se também a presença de minério de calamina contendo hemimorfita, hidrozinca e magnetita.

### *Formação Serra do Poço Verde*

Na área do Extremo Norte, a Formação Serra do Poço Verde é representada pelos membros Morro do Pinheiro Inferior, Morro do Pinheiro Superior e Pamplona Inferior. Os dois primeiros ocorrem a leste da Falha de Vazante, em contato de lapa com a brecha dolomítica hidrotermal e o último a oeste da falha, em contato de capa com a brecha.

O Membro Morro do Pinheiro Inferior ocorre na base da sequência dolomítica da Formação Poço Verde. É formado por dolomitos cinza, por vezes rosados, com esteiras de cianobactérias e raros *bird's eyes*. Ocorrem nesta unidade ainda, doloruditos, caracterizados por exibir clastos carbonáticos angulosos a subarredondados, de tamanhos variados, dispostos em uma matriz micrítica.

Os dolomitos com esteiras e os doloruditos são compostos quase que exclusivamente por dolomita, e alguns raros cristais de opacos e quartzo. Mostram-se localmente silicificados, e apresentam vênulas de Fe-dolomita, quartzo e dolomita. Estruturas de dissolução e preenchimento de cavidades, tais como os *stromatactis*, representados por cavidades preenchidas por cristais bem desenvolvidos de dolomita esparítica, com quartzo ao centro são frequentes neste membro.

O Membro Morro do Pinheiro Superior é representado por metadolomito fino, com granulação de fração argila a silte, micrítica a microesparítica, exibindo estrutura maciça a levemente laminada. Mostra-se praticamente isento de influência de alteração hidrotermal, mantendo-se sempre com sua cor cinza claro e/ou escura inalterada, e suas estruturas primárias preservadas, que são representadas por *bird's eyes* e esteiras estromatolíticas.

O metadolomito apresenta lentes de brechas intraclásticas, com clastos angulosos, de tamanhos variados (0,2-10cm), envoltos por matriz dolomítica micrítica, idêntica à descrita anteriormente. Também se associa às camadas de metapelitos de cor cinza a esverdeada, com espessuras médias em torno de 2 a 3 m, onde é possível observar claramente duas foliações metamórficas, uma contínua, caracterizada por uma clivagem ardosiária ( $S_1$ ), e outra espaçada, por vezes gerando uma crenulação na rocha ( $S_2$ ).

Situado a oeste da Falha de Vazante, o Membro Pamplona Inferior, está contido no bloco que foi rebaixado pela Falha de Vazante. É constituída por dolomito que exhibe tonalidade rosada, granulação fina, e apresenta esteiras estromatolíticas, que definem seu acamamento sedimentar. Possui níveis margosos, de cor roxa a esverdeada, nos quais é possível a identificação de duas foliações metamórficas.

Esta rocha foi mais fortemente afetada pelo processo de alteração hidrotermal, fato comprovado pela modificação da cor mais clara da rocha e pela frequente ocorrência de vênulas de siderita, hematita e ankerita e brechações locais associadas. Por vezes, apresenta-se totalmente silicificada, exibindo, nestes casos, estrutura maciça.

Ao microscópio, é possível verificar que os cristais de dolomita apresentam textura micrítica, às vezes microesparítica. Em vênulas também pode ser observada uma geração bastante fina de dolomita. A dolomita esparítica pode ocorrer também em texturas de preenchimento de espaços abertos formando estruturas tipo pente, as quais demonstram que os cristais tiveram crescimento da borda para o centro da cavidade.

## Metadolomitos Brechados e Brecha Hidrotermal

Os metadolomitos brechados estão contidos em uma faixa de direção NS associada à Falha de Vazante, e cortam a área da Mina do Extremo Norte, exibindo um espessamento próximo ao contato com a Formação Serra de Garrote. Essa porção de rocha exhibe cor rosa a avermelhada, que pode ser atribuída à interação com os fluidos hidrotermais, e não preserva estruturas primárias que possam evidenciar o acamamento sedimentar, além de mostrar-se intensamente venulada, com espessos veios de siderita, ankerita e dolomita. Os clastos na brecha são arredondados a subarredondados devido à assimilação parcial relacionada com a passagem dos fluidos hidrotermais aquecidos, e mostram-se dispostos caoticamente em matriz constituída por dolomita branca esparítica, totalmente recrystalizada, exibindo estrutura em pente e preenchimento por carbonatos de ferro (Fig. 4). A matriz é cortada por vênulas de hematita e apresentam clastos imersos de dolomito micrítico, raramente contendo recrystalização.

São caracterizados por intensa deformação dúctil-rúptil a rúptil, evidenciada por microfalhas, por vezes preenchidas com hematita, além de zonas deformadas limitadas por estilólitos e substituídas por dolomita branca hidrotermal (Fig. 5).



*Figura 4. Brecha hidrotermal que hospeda o minério willemítico, com fragmentos de rocha dolomítica rósea cimentados por fases hidrotermais, tais como dolomita branca esparítica, carbonatos de ferro (Fe-dolomita, ankerita e siderita) e, localmente, jaspe.*

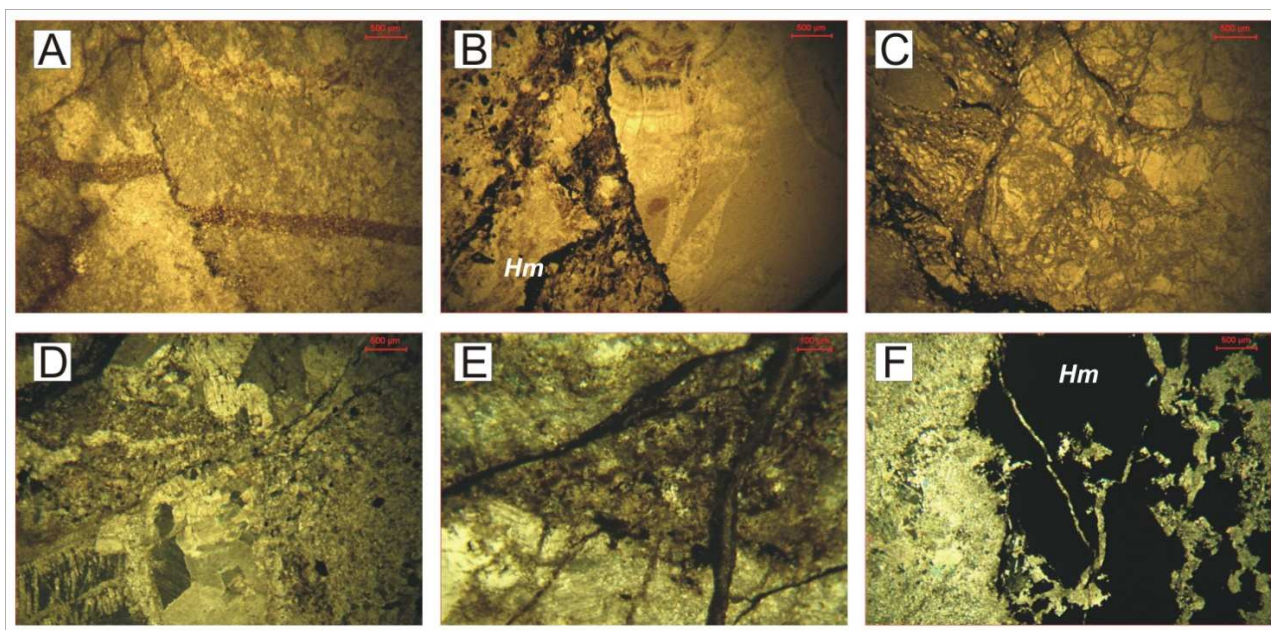


Figura 5. Aspectos petrográficos em luz transmitida dos dolomitos brechados e brechas hidrotermais. (A) Dolomicroesparito com zonas mais claras com cimentação esparítica e com estilólitos desenvolvidos após vênulas com carbonatos de ferro (polarizadores descruzados); (B) Estilólitos juxtapondo dolomicroesparíticos mais preservados com cimentação esparítica diagenética (direita) e dolomito substituído por dolomita esparítica, hidrotermal, e hematita (polarizadores descruzados); (C) Dolomito brechado em zona deformada (polarizadores descruzados); (D) Substituição do dolomito hospedeiro por dolomita esparítica grossa, hidrotermal (canto esquerdo inferior, polarizadores cruzados); (E) Fraturas e microfalhas preenchidas com hematita e dolomita em rocha dolomítica brechada (polarizadores cruzados); (F) Hematita substituindo dolomito e cortada por vênulas também constituídas por dolomita (polarizadores cruzados). Abreviações: Hm = hematita.

## Geologia estrutural

As principais estruturas reconhecidas na área do Extremo Norte são representadas pelo acamamento sedimentar e bandamento composicionais ( $S_0$ ), foliações metamórficas ( $S_1$  e  $S_2$ ), planos de falhas conjugados relacionados à Falha Vazante, estruturas de baixo ângulo associadas a cavalgamentos, assim como falhas rúpteis tardias de direção NW (Figs. 6 e 7).

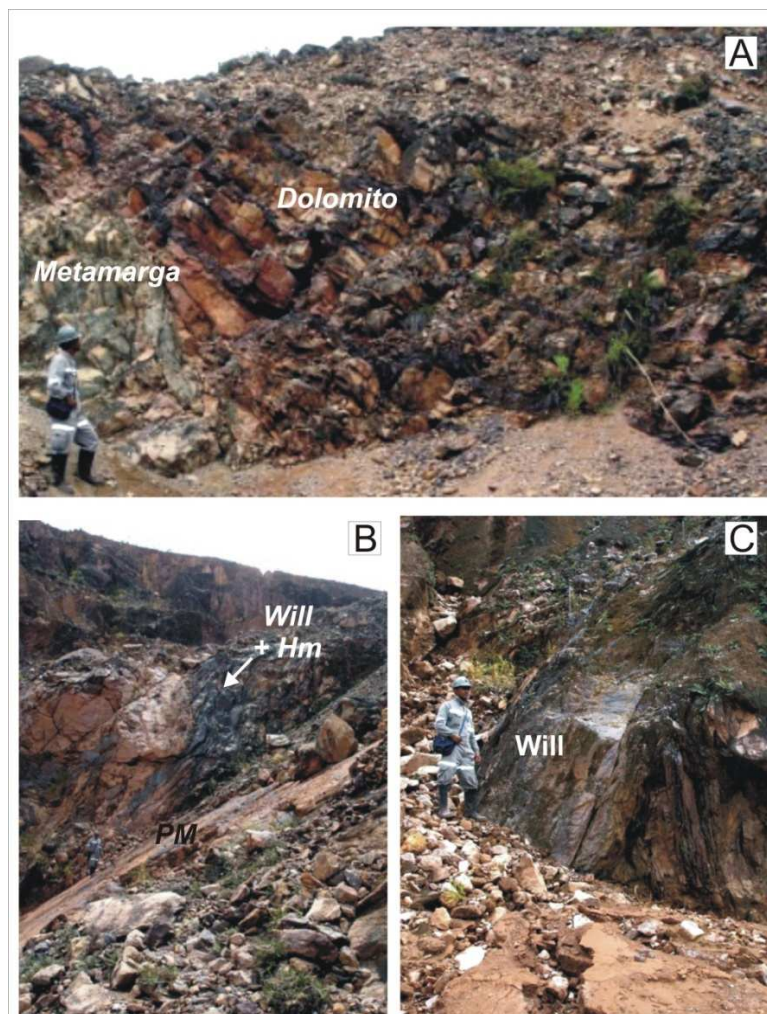


Figura 6. Aspectos estruturais da Mina Extremo Norte. (A) Foliação metamórfica em metamargas intercaladas a dolomitos róseos, ambos da Formação Serra do Poço Verde (Membro Pamplona Inferior); (B) Corpos sigmoidais de minério willemítico balizados por plano de falha (PM) associado a Zona de falha de Vazante; (C) Corpo aflorante de minério willemítico limitado por planos de falha. Abreviações: Will = willemita; Hm = hematita.

O bandamento é de origem sedimentar e marcado principalmente nos dolomitos (rosa e cinza), pela diferença composicional entre bandas margosas e metapelíticas e bandas dolomíticas ( $S_0$ ). O acamamento sedimentar ( $S_0$ ) é reconhecido com maior facilidade nos metadolomitos da Formação Serra do Poço Verde, sendo representado por estruturas primárias preservadas, tais como laminações, marcas de onda, e também pela alternância de camadas com diferenças estruturais, texturais e de cor. Nos filitos este é marcado predominantemente pela alternância de leitos com diferentes cores e granulação, porém ocorre de forma mais discreta. Em geral, o acamamento sedimentar apresenta atitude média de 270/25, podendo variar, principalmente próximo ao contato da Formação Serra do Poço Verde com a Formação Serra do Garrote (Fig. 7A e B).

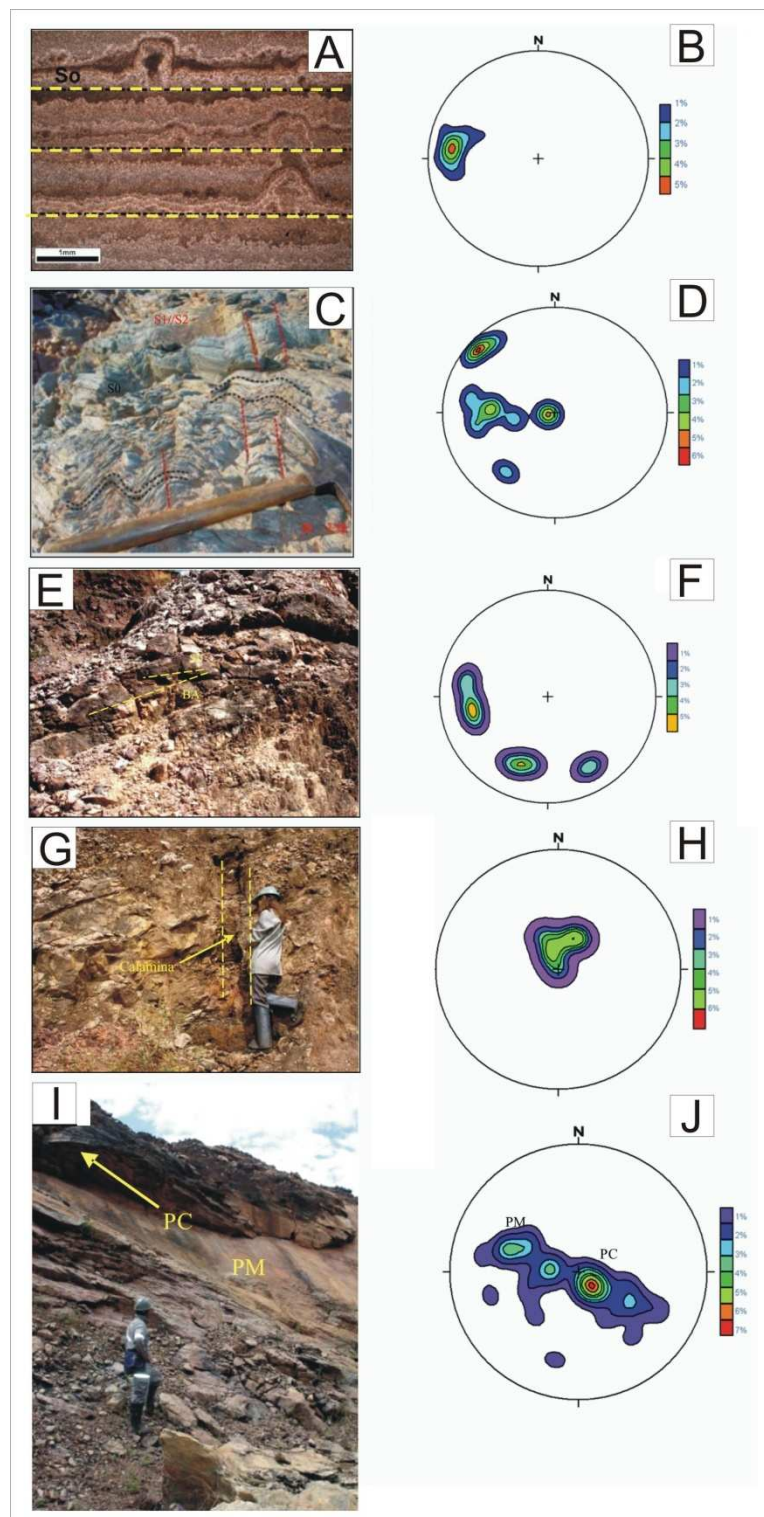


Figura 7. Representação das estruturas identificadas na Mina Extremo Norte de Vazante. A. Fotomicrografia mostrando as esteiras de cianobactérias que representam o  $S_0$  em metadolomito da Formação Serra do Poço Verde (Escala 1mm, Votorantim Metais, 2008). B. Estereograma de contorno com atitude do  $S_0$  da área do Extremo Norte ( $N=16$ ). C. Relação entre  $S_0$  -  $S_1/S_2$ ; D. Estereograma de contorno com atitude do  $S_1$  e  $S_2$  da área do Extremo Norte ( $N=18$ ). E. Estruturas de baixo ângulo em metadolomito. F. Estereograma de contorno com atitude da família BA da área do Extremo Norte ( $N=6$ ); G. Falhas NW preenchidas por

calamina. H. Estereograma de contorno com atitude da família NW da área do Extremo Norte (N=7). I. Plano conjugados associados aos corpos de minério com willemita e hematita. J. Estereograma de contorno com atitude da família PM e PC da área do Extremo Norte (N=41).

As foliações metamórficas (Fig. 6A e 7C) apresentam-se aproximadamente paralelas ao bandamento. São representadas por duas feições planares penetrativas subparalelas que caracterizam as foliações metamórficas  $S_1$  e  $S_2$  na área de estudo, e são identificadas com maior facilidade nas litologias enriquecidas em minerais filossilicáticos, tais como os filitos da Formação Serra do Garrote e nos metapelitos e metamargas das Formações Serra do Poço Verde. Essas foliações apresentam atitudes médias entre  $270 - 240/30 - 70$  e a partir dos estereogramas é possível diferenciá-las pelo caimento (Fig. 7d), visto que suas direções são bastante próximas. A foliação  $S_1$  é definida pela recristalização de filossilicatos de baixo grau metamórfico, tais como, sericita e clorita, enquanto a  $S_2$  é oblíqua a  $S_1$ , também gerada por recristalização de micas de baixo grau metamórfico.

O levantamento de detalhe ao longo do contato entre a Formação Serra do Poço Verde e Formação Serra do Garrote comprovou que as fortes sinuosidades observadas estão associadas a um complicado padrão de dobras, que afetam o  $S_0$  e a foliação  $S_1$ , e estão associadas à inflexão, implicando, desta forma, que estas estruturas estão geneticamente relacionadas a uma fase de deformação pós- $D_1$  (Rostriolla *et al.* 2002). Além disso, são também observadas falhas de empurrão e estrias que evidenciam cavalgamento da Formação Serra do Poço Verde sobre a Formação Serra do Garrote.

As estruturas rúpteis-dúcteis a rúpteis relacionadas à Falha Vazante na área do Extremo Norte são identificadas principalmente nos limites dos corpos de minério com willemita-hematita e na brecha hidrotermal e, comumente, apresentam concentrações de hematita e clorita. Apresentam direção N-S, com atitude média  $275/55$ , diferentemente das direções levantadas na Mina de Vazante, que apresentam direção NE-SW e atitudes  $315/55$  (Bhering, 2009). Os planos de falha interceptam e transpõem as foliações  $S_1$  e  $S_2$ , indicando que seu desenvolvimento e/ou reativação foi relativamente tardio em relação ao estágio compressivo brasileiro (Fig. 7I e 7J).

As medidas de estrias no plano de falha (*down dip*) e a análise dos *steps* mostram que a Falha de Vazante teve um deslocamento preferencial na vertical, que indicam um padrão de falhamento normal (Votorantim Metais, 2008), que foi atribuído à sua reativação (Pinho, 1990).

Com caimento contrário aos planos mineralizados, ocorre a família denominada de PC (Bhering, 2009). Esses planos formam pares conjugados e na área do Extremo Norte estão preenchidas por hematita. Segundo Rostriolla *et al.* (2002), ambas estruturas seriam relacionadas à fase  $D_3$ .

Falhas de baixo ângulo (Fig. 7e e 7f) ocorrem com grande frequência na mina principalmente nos dolomitos e, mais raramente, nos corpos de hematita e willemita. São relacionadas a empurrões (falhas inversas), que parecem aproveitar a fraqueza da descontinuidade representada pelo bandamento e acamamento, sendo paralela a essas estruturas (atitude média  $225/30$ ). São responsáveis por deslocamentos do bandamento composicional, podendo formar rejeitos métricos, e também deslocam os corpos de minério, sendo consideradas posteriores ao desenvolvimento da Falha Vazante. Possivelmente relacionam-se às falhas ( $D_4$ ) de Rostriolla *et al.* (2002).

As principais descontinuidades condutoras de água, importantes para a compreensão da dinâmica hidrogeológica na área da mina, são pertencentes à família de fraturas NW (Fig. 7G e 7H), com atitude preferencial  $030/70$ , em média (Bittencourt, 2008). Estas se encontram frequentemente com feições de dissolução, carstificadas, e muitas vezes representam controles estruturais para a mineralização de calamina, supérgena. De acordo com os estudos de Rostriolla *et al.* (2002), essas estruturas seriam pertencentes à fase  $D_5$ , essencialmente rúpteis.

## TIPOS DE MINÉRIO DE ZINCO DA MINA EXTREMO NORTE

Na Mina Extremo Norte de Vazante tipos principais de minério são caracterizados, sendo um constituído predominantemente por calamina (hemimorfita) e outro, observado principalmente em testemunhos de sondagem, constituído por willemita.

### **Minério com Calamina**

O termo calamina é usado para distinguir minérios de zinco contendo minerais secundários, tais como hemimorfita, smithsonita e hidrozincita. No Extremo Norte, os corpos de minério com calamina ocorrem com frequência em superfície, podendo ser dividido em dois subtipos principais:

#### *Minério com calamina rico em Fe*

Os corpos de minério com calamina rica em Fe ocorrem no norte da área em estudo e são caracterizados pela presença abundante de veios de hematita associados à dolomitos alterados e cavidades preenchidas por calamina. Geralmente, o minério aparece bastante friável, com coloração amarronzada escura, aparência terrosa e é constituído por hemimorfita, argilominerais, hidrozincita e hematita. Esta última ocorre em veios bastante fraturados, os quais bordejam as porções ricas em hemimorfita e hidrozincita.

#### *Minério com calamina associado às falhas NW*

Nestes corpos de minério é possível verificar que os controles para sua formação podem estar associados aos ciclos hidrogeológicos da região, uma vez que a calamina ocorre associada a planos de falha NW e a estruturas formadas por carstificação. Além disso, esta tipologia aparece em pacotes mais contínuos que a calamina associada a veios de hematita. Os corpos de calamina representados por essa tipologia foram extraídos em cavas mais profundas e de maior extensão da antiga Mina da MASA (S. Nunes, comunicação verbal). O minério é constituído por hemimorfita bem cristalizada e argilominerais. Outra particularidade deste tipo de minério é a sua associação com metamargas, que ocorrem intercaladas aos corpos de calamina e a dolomito com feições de dissolução e preenchimento de cavidades por calamina.

### **Minério willemítico**

O minério willemítico não é aflorante em grande parte da mina, sendo apenas interceptado por testemunhos de sondagem. Os teores de Fe, altos e mais elevados que aqueles do minério willemítico da Mina de Vazante, foram considerados um dos principais parâmetros para a distinção dos tipos de minérios willemíticos. Portanto, os tipos de minério foram divididos em minério willemítico rico em ferro (teores de Fe > 20% e Zn > 5%) e willemítico (Fe < 20% e Zn > 5%), considerando-se o teor de corte de zinco (Zn > 5%) por esse um dos critérios utilizados na alimentação da planta metalúrgica de Vazante.

#### *Minério de willemita rico em ferro (teores de Fe > 20% e Zn > 5%)*

Esta tipologia ocorre em profundidades próximas a 200 m, em pacotes pouco espessos, mas contínuos. Também pode ser identificada em profundidades maiores que 400 m, em geral na borda dos corpos willemíticos com menores teores de ferro (Fe < 20%), em níveis bastante delgados.

As amostras são constituídas por hematita (44%), willemita (25%), dolomita e dolomita com ferro (15%) e clorita zincífera (7%). Pequenos cristais de franklinita inclusa em willemita ou hematita, limonita (com conteúdos de Zn, Si e Al) e carbonatos de Fe ocorrem subordinados.

Amostras do minério willemítico rico em ferro apresentam textura cataclástica, são fraturadas, e às vezes, apresentam veios anastomosados de hematita cortando os cristais de willemita, dolomita e calcita. A hematita, mais comumente, forma uma massa ao redor de relíquias de cristais de willemita. Frequentemente, são observados cristais de hematita com hábito acicular e pseudomorfos de magnetita/franklinita imersos em hematita maciça.

Os cristais de willemita prismáticos, fibrosos ou radiados apresentam-se fraturados, corroídos e intensamente substituídos por uma geração de willemita mais fina ou por clorita. Esta última apresenta-se também em veios cortando a massa constituída por hematita. Frequentemente, no contato da willemita com a massa de hematita, ocorrem cristais de limonita.

Em raras amostras foram observadas cristais de sulfetos, tais como galena e sulfetos de Cu e/ou Ag. Porém, quando estes estão presentes, ocorrem como pequenas inclusões (50 a 10µm) na willemita.

#### *Minério com willemita (Fe < 20% e Zn > 5%)*

Em geral, esta tipologia assemelha-se com as encontradas na Mina de Vazante. As amostras são constituídas por willemita (51%), hematita (25%) dolomita/calcita (10%), clorita (6%) e quartzo (2%) com barita, gahnita, covellita, greenockita, monazita, sulfetos de prata (jalpaita-mckinstryita (Ag, Cu)<sub>2</sub>S), apatita, galena, franklinita/magnetita, limonita e carbonatos de ferro subordinados. A partir das descrições petrográficas, foi possível definir três formas de ocorrência da willemita (Fig. 8a, 8b e 8c):

- Cristais de willemita granoblásticos, grossos e semelhante aos presentes no minério da Mina de Vazante;
- Cristais fibrorradiais semelhantes aos encontrados na Mina de Vazante;
- Cristais finos de willemita, que substituem cristais grossos e ocorrem nas amostras mais deformadas.

Nenhum destes tipos de willemita apresenta diferença em sua composição química e os cristais de willemita apresentaram-se puros (Zn, Si e O), ou com ligeira indicação de Fe na estrutura.

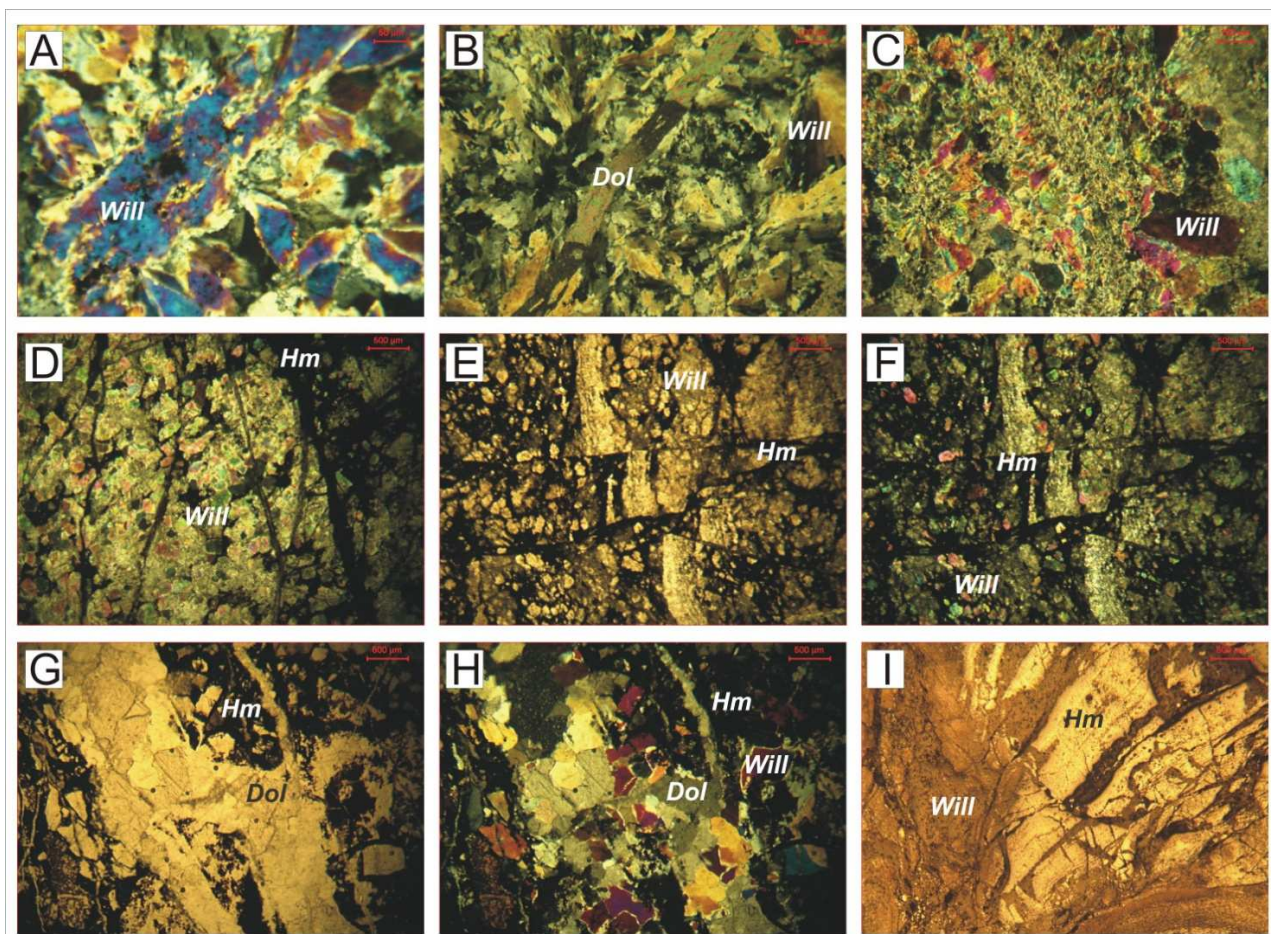


Figura 8. Fotomicrografias do minério willemítico em luz transmitida (LT) e refletida (LR). (A) Cristais de willemita grossos em amostra de minério com baixo conteúdo de ferro (LT, polarizadores cruzados); (B) Cristais fibrorradioados de willemita cortados por vênula de dolomita (LT, polarizadores cruzados); (C) Cristais grossos de dolomita cortados por uma geração de willemita mais fina (LT, polarizadores cruzados); (D) Willemita com textura granoblástica cortada por fraturas e microfalhas preenchidas com hematita (LT, polarizadores cruzados); (E) Aspecto de fragmentação e cataclase do minério willemítico (LT, polarizadores descruzados); (F) Idem, mostrando a presença de hematita em fraturas e microfalhas, truncando cristais de willemita (LT, polarizadores cruzados); (G) Vênula com dolomita esparítica e willemita grossa cortando rocha rica em hematita (LT, polarizadores descruzados); (H) Idem com polarizadores cruzados; (I) amostra de minério willemítico rico em ferro com hematita com textura coloforme (luz refletida). Abreviações: Dol = dolomita; Hm = hematita; Will = willemita.

Este tipo de minério também se mostra bastante deformado, apresentando hematita ao longo da foliação milonítica e em planos de fraturas (Fig. 8d a 8i). Amostras intensamente deformadas e substituídas por hematita representam a transição para o minério willemítico rico em Fe (Fig. 8i).

Os cristais de willemita foram observados substituindo a dolomita, com exceção dos fibrorradiais. Em amostras com grau de deformação alto, também se observa a willemita fina e a clorita substituindo cristais também de willemita, grossos e granoblásticos. O silicato de zinco é cortado por veios e vênulas de hematita e carbonatos de Fe (ankerita e ferro dolomita), porém também podem ser observadas vênulas com dolomita e willemita (Fig. 8G e 8H) cortando hematita, implicando em recorrência de pulsos de mineralização.

A partir das análises de microscopia eletrônica de varredura, foi possível verificar inclusões de sulfeto, sulfatos, fosfatos e óxidos da ordem de 20  $\mu\text{m}$  em cristais de willemita. Estes minerais ocorrem disseminados nos cristais e são representados por fosfatos de terras raras (monazita),

apatita, sulfetos de Ag e Cu, covellita/calcocita, barita, franklinita e galena. Grãos de limonita também ocorrem disseminados ou próximos ao contato da willemita com veios de hematita.

## CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA

### Rocha Hospedeira Alteradas

As rochas que hospedam o minério do Extremo Norte são representadas por brechas hidrotermais e metadolomitos deformados. Essas rochas apresentam teores médios de Zn e Fe de 2,0% e 25%, respectivamente, e razão média Ca/Mg igual a 1,96.

A partir da análise petrográfica, foi possível dividir dois tipos de brechas, sendo uma enriquecida em ferro (teores de Fe > 20%), constituída principalmente por hematita, e outra de coloração avermelhada, semelhante às encontradas na Mina de Vazante, com menor conteúdo de ferro (teores de Fe < 20%) e composta por clorita, quartzo e minerais carbonáticos.

As comparações realizadas entre brechas hidrotermais (brecha rica e pobre em Fe) e metadolomitos não alterados mostram, em geral, enriquecimento em Fe, Zn e Pb e diminuição relativa dos conteúdos de Ca, Mg e Al nas brechas. Tais mudanças evidenciam a dissolução dos minerais carbonáticos e a formação de minerais hidrotermais que incorporam Fe, Zn e Pb na sua estrutura.

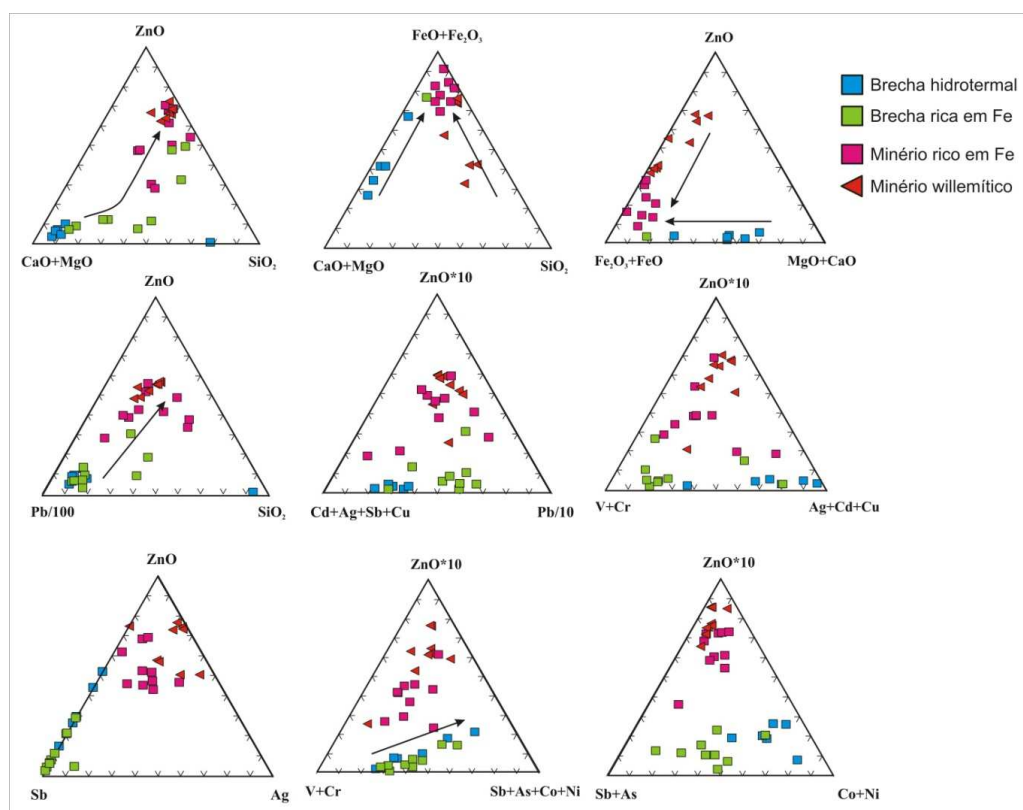


Figura 9. Diagramas ternários mostrando variações composicionais entre brechas hidrotermais com maior e menor conteúdo de ferro e amostras de minério willemítico com conteúdos mais baixos de ferro (Fe < 20%) e mais elevados (Fe > 20%). Óxidos em porcentagem e elementos em ppm.

A brecha com menor conteúdo de Fe também é mais enriquecida em Pb que a brecha rica em Fe, sugerindo interações com os fluidos hidrotermais em condições relativamente diferentes na substituição das hospedeiras da mineralização. Em geral, o conteúdo de Fe presente em ambos os

tipos de brechas relaciona-se à formação de hematita e, em menor quantidade, de franklinita, limonita, carbonatos de Fe e magnetita. O Pb aparece em sulfetos, tal como a galena, enquanto o zinco pode ser incorporado aos minerais carbonáticos hidrotermais e, principalmente, na willemita (Fig 9).

As ocorrências das brechas ricas em Fe também são relacionadas com a profundidade, sendo de ocorrência comum em níveis próximo a 200 m ou em fechamento de lentes de willemita em profundidades maiores que 200 m. As brechas com menor teor de Fe e os metadolomitos alterados são comumente observadas em profundidades superiores a 300 metros e aparecem em pacotes mais contínuos.

Em relação ao conteúdo de  $\text{SiO}_2$ , nas brechas não são observadas correlações com elementos de contribuição clástica, exceto possivelmente o Al. Nestes diagramas binários é notável o maior conteúdo de  $\text{SiO}_2$  associado à mineralização, decorrente da dissolução dos minerais carbonáticos e precipitação do silicato de zinco. Portanto o  $\text{SiO}_2$  marca claramente campos de diferenciação entre as amostras das rochas hospedeiras, representadas pelas brechas, e das amostras mineralizadas (Fig 10). O enriquecimento em  $\text{SiO}_2$  nas brechas e corpos de minério não é progressivo, isto é, não define um mesmo *trend* de enriquecimento. Isso pode implicar que a precipitação do silicato de zinco ocorreu em sítios favoráveis, controlados estruturalmente, e não resultou de um processo gradacional de dissolução e preenchimento das rochas hospedeiras.

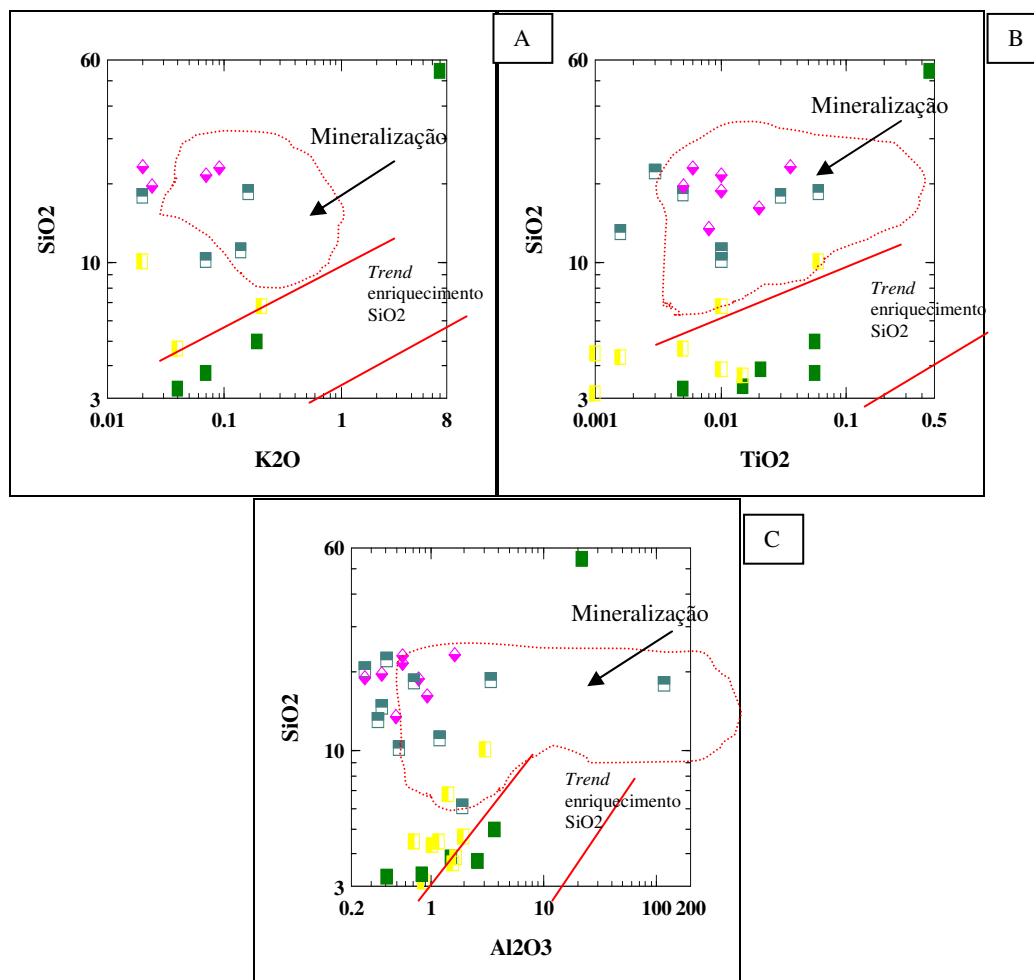


Figura 11. Correlação entre  $\text{SiO}_2$ (%) e: A.  $\text{K}_2\text{O}$  (ppm). B.  $\text{TiO}_2$ (ppm). C.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ppm). Legenda: ■ Brechas pobres em Fe, □ Brechas ricas em Fe, ■ Mineralização rica em Fe e ♦ Mineralização pobre em Fe.

**Mineralização willemítica**

As rochas mineralizadas ricas em Fe apresentam teores médios de Fe e Zn iguais a 30 e 19%, respectivamente, enquanto o minério willemítico com menor conteúdo de ferro apresenta conteúdos médios de 15% de Fe e 36% de Zn.

Em geral, quando se compara a mediana dos resultados geoquímico das amostras mineralizadas (independente do teor de Fe) com das brechas e metadolomitos deformados, observa-se que os enriquecimentos em Pb, Ni, P e Fe foram semelhantes. Porém, nas porções mineralizadas, existe uma elevação nos teores de Ag, As, Cr, Cu e Ba (Fig. 12a), portanto, implicam que este conjunto de elementos pode estar definindo a assinatura geoquímica.

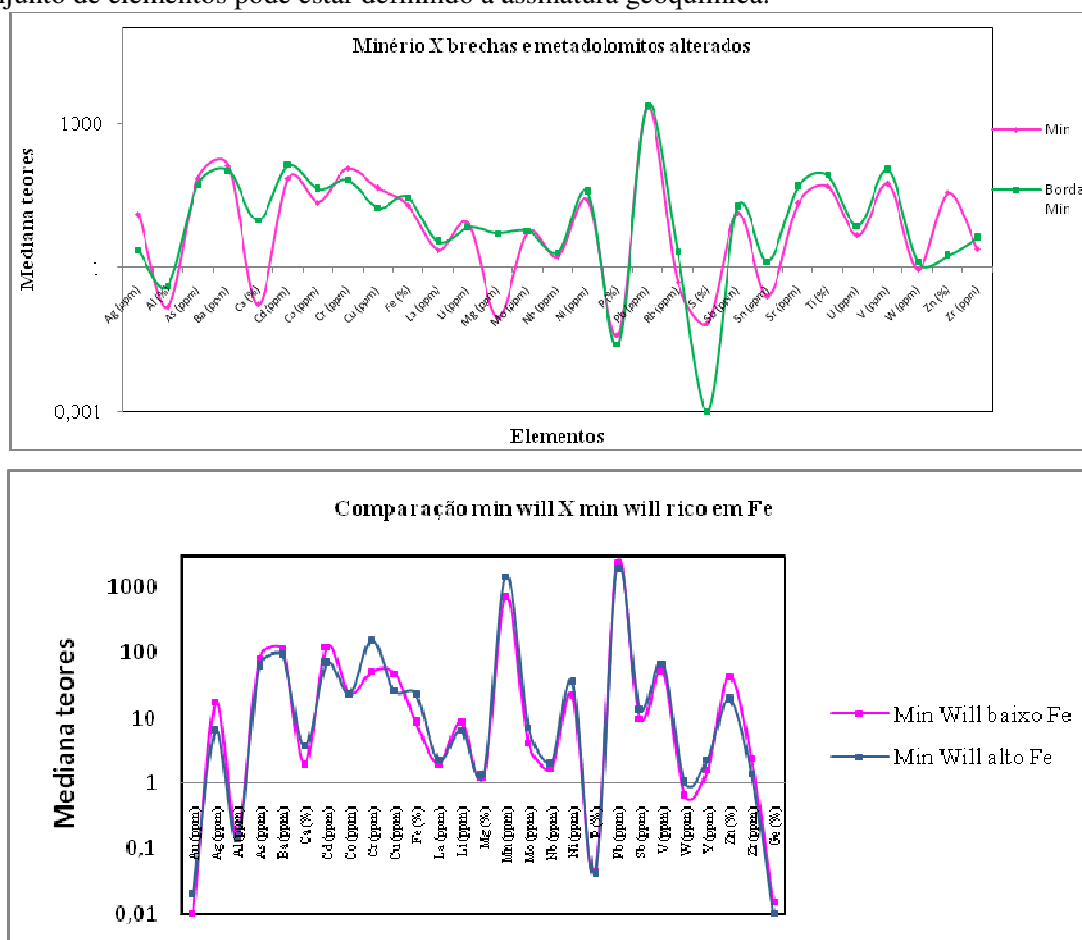


Figura.12 (A) Comparação entre as medianas das amostras de minério ricas e pobres em Fe (elementos em ppm); (B) Comparação entre as medianas dos elementos das brechas/ metadolomitos alterados e amostras de minério.

Separando as amostras pelo mesmo critério usado na caracterização mineralógica, observa-se que a correlação entre os elementos apresentam, em geral, a mesma tendência para as duas tipologias. Para o minério menos enriquecido em Fe ( $Zn > 5\%$  e  $Fe < 20\%$ ), pode-se verificar que os elementos Ag, As, Cd, Cu, Li e Zn são importantes para a definição de assinaturas geoquímicas (Fig. 12b). Os elementos Ag, Pb, As, Cd e Pb estão relacionados a sulfetos presentes em finas inclusões nas massas de willemita, enquanto o Zn ocorre predominantemente no silicato de Zn.

Para minérios com  $Fe > 20\%$ , Mn, Ni, V e Cr se destacam. O Mn e V são associados principalmente à presença da hematita, enquanto o Cr à presença da franklinita e, subordinadamente, magnetita.

Para ambos os tipos de minérios, observa-se correlação positiva do Zn com Si devido à influência dos fluidos mineralizantes, rico nesses elementos. Além disso, também são verificadas

correlações negativas do Zn com Fe e Ca, sendo que com este último a relação é clara apenas para amostras de minério rico em Fe (Fig 13). Em geral, esta relação negativa, assim como a mineralogia, sugere que o enriquecimento em Fe foi posterior à mineralização willemítica. Os diagramas ZnO vs SiO<sub>2</sub> e Zn vs Cr marcam a diferenciação entre os dois tipos de minério.

Os diagramas ternários (Fig. 9) sugerem um *trend* de aumento dos conteúdos de ZnO e SiO<sub>2</sub> contínuo das brechas hidrotermais com menor conteúdo de ferro até o minério willemítico com baixo conteúdo de ferro. No entanto, quando se considera os conteúdos de FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, observa-se tendências distintas de enriquecimento em ferro entre brechas e o minério willemítico.

Nas brechas hidrotermais que apresentam conteúdos consideravelmente mais baixos de zinco em relação às amostras de minério, a presença de outros metais (Pb, Cd, Sb, Cu, Sb, Co e Ni) destaca-se. Isso não significa que seus conteúdos são mais elevados que nas amostras de minério, mas que comparativamente ao zinco, as brechas apresentaram enriquecimentos significativos desses metais. Isso evidências a influência dos fluidos metalíferos na formação de tais brechas e alteração dos dolomitos. Diferentemente desses metais, apenas as amostras de minério apresentam conteúdos significativos de Ag (13 a 20 ppm). As brechas mais ricas em ferro também são significativamente enriquecidas em V, Cr, Sb e As em relação às brechas mais empobrecidas em Fe.

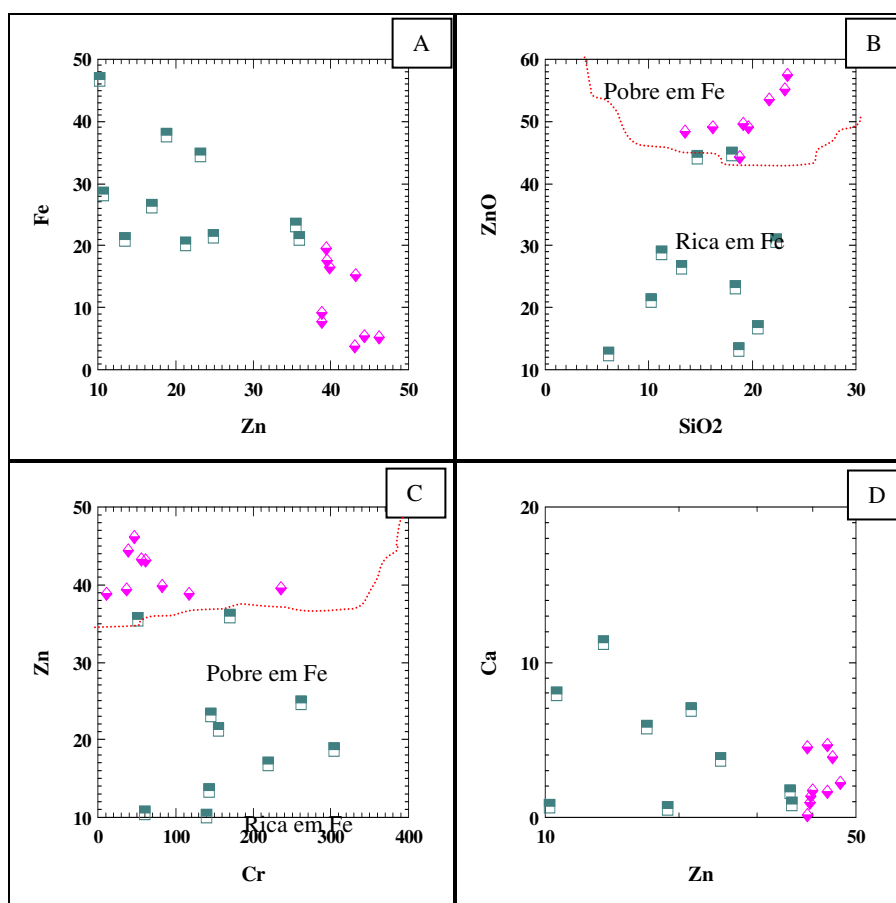


Figura 13. Correlação entre: A. Fe vs Zn (%). B. ZnO vs. SiO<sub>2</sub>(%). C. Zn (%) vs Cr (ppm). D. Ca vs Zn (ppm). Legenda Mineralização rica em Fe ■ e Mineralização pobre em Fe ◆

## DISCUSSÕES

Os depósitos de zinco não-sulfetados têm sido explorados mundialmente há centenas de anos, especialmente os de origem supérgena, no entanto, recentemente esses depósitos tornaram-se importantes alvos da exploração mineral em detrimento dos depósitos sulfetados (Sangster, 2003). Isso se deve principalmente a avanços nas tecnologias de processamento mineral que permitem a produção de concentrados de zinco de alta pureza com menor consumo de energia nos processos de beneficiamento. Adicionalmente, os depósitos de zinco não-sulfetados apresentam caracteristicamente teores de zinco mais elevados, pequena quantidade de elementos deletérios, tais como chumbo e enxofre, e a mineração desses depósitos causa menor impacto ambiental devido à escassez de sulfetos que podem gerar drenagem ácida (Brugger *et al.*, 2003). Entretanto, a prospecção desses depósitos requer mudanças nas técnicas exploratórias, uma vez que métodos geofísicos não fornecem boas indicações de alvos. Desta forma, novos modelos que considerem controles geológicos e parâmetros metalogenéticos específicos são de fundamental importância para a exploração desses depósitos.

Os depósitos de zinco não-sulfetados têm sido tradicionalmente considerados como de origem supérgena, entretanto recentes mudanças nos conceitos genéticos relativos a esses depósitos apontam para uma origem primária, hidrotermal, para depósitos cujo minério é constituído principalmente por willemita ( $\text{ZnSiO}_4$ ), tais como Vazante no Brasil, Beltana e Aroona na Austrália, Berg Aukus e Abenab na Namíbia e Star Zinc e Kabwe na Zâmbia (Monteiro, 1997; 2002; Monteiro *et al.*, 1999; Carman, 2003; Brugger *et al.*, 2003; Groves *et al.*, 2003; Hitzman *et al.*, 2003). Esses depósitos são agora incluídos em uma nova classe de depósitos (*carbonate-hosted willemite deposits* ou *non-sulfide zinc deposits*), definida por Hitzman *et al.* (2003). Tais mudanças nos modelos genéticos foram, em parte, possíveis devido às estimativas dos fatores de fracionamento dos isótopos de oxigênio entre willemita e outras fases minerais (Zheng, 1996), que permitem cálculos de temperatura de formação da willemita, e estudos termodinâmicos sobre estabilidade da willemita em diversas condições (Brugger *et al.*, 2003).

A gênese do depósito de Vazante é considerada como relacionada à mistura de um fluido metalífero, e o outro meteórico, resultando em variações de pH, temperatura, salinidade e fugacidade de oxigênio dependendo da proporção de participação de cada fluido durante evolução (Monteiro, 1997; Monteiro *et al.*, 1999). Segundo Appold & Monteiro (2009), em Vazante, o fluido metalífero seria quente, redutor, de alta salinidade, com baixo pH e rico em metais. O fluido meteórico seria frio, com alto pH e oxidante.

A solubilidade da esfalerita e galena é bastante sensível a mudanças de temperatura, o que resulta em precipitação desses minerais com o seu decréscimo (Fig. 11). Insensível à temperatura, a solubilidade da willemita é especialmente controlada por mudanças do pH (Fig. 11; Brugger *et al.*, 2003; Appold & Monteiro, 2009).

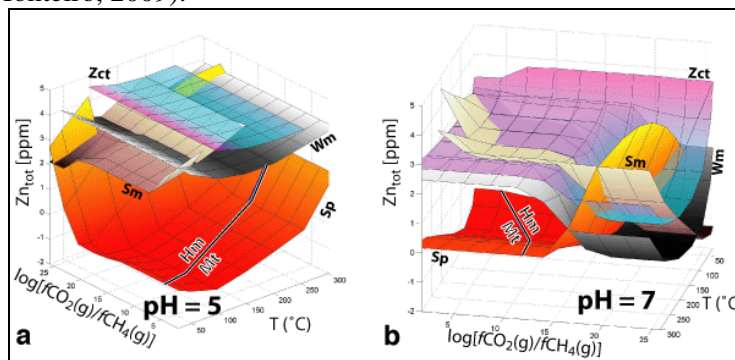


Figura 14. Diagrama mostrando solubilidade da esfalerita, willemita, smithsonita e zincita em função da temperatura e redox em condições ácidas ( $\text{pH} = 5$ ) e neutras ( $\text{pH} = 7$ ). Escala redox é expressa em unidades de  $\log (f\text{CO}_2(\text{g})/f\text{CH}_4(\text{g}))$  (Brugger *et al.*, 2003).

Em amostras da Mina Extremo Norte de Vazante, a ocorrência de sulfetos ou sulfossais de Ag e Cu é raramente observada. Estes quando presentes estão na forma de pequenas inclusões na massa willemítica, diferentemente do depósito de Vazante, onde é possível verificar corpos sulfetados, constituídos por esfalerita com galena subordinada, centimétricos a métricos, imbricados nos willemíticos (Monteiro, 1997). A presença da associação mineral quartzo-willemita-franklinita é observada em amostras semelhantes a algumas amostras do depósito de Vazante, que também não apresentam esfalerita. Além disso, em algumas amostras, a hematita é o mineral mais abundante, o que sugere que as condições fluidais foram bastante oxidantes.

A precipitação de willemita, sem esfalerita associada, seria favorecida em condições de pH neutro, oxidantes (acima da linha de estabilidade da magnetita-hematita) e em temperaturas superiores a 100 °C, mas inferiores a 300 °C. Como a participação de fluidos metalíferos e meteóricos seria também provável no caso da Mina Extremo Norte, as condições físico-químicas resultantes do processo de mistura ideais para a formação do minério willemítico seriam aquelas de pH neutro a básico, resultante da maior participação de fluidos meteóricos já aquecidos ou do tamponamento devido às reações com as rochas carbonáticas, sem decréscimo acentuado de temperatura. Tais condições seriam também favoráveis à formação de zincita e, possivelmente, da franklinita que ocorre associada com a willemita. Acredita-se também, que a hematita, possivelmente foi precipitada em quantidades significativas em estágios tardios em relação à formação da willemita.

## 7. CONCLUSÕES

O contexto geológico da área do Extremo Norte é semelhante ao da Mina de Vazante, porém ocorrem particularidades importantes a serem destacadas. Estratigraficamente é possível verificar a ocorrência da Formação Serra do Garrote e do Membro Morro do Pinheiro Inferior, Formação Serra do Poço Verde (Grupo Vazante), aflorantes na região da antiga Mina da MASA. Na Mina de Vazante, são aflorantes apenas os membros Morro do Pinheiro Superior e Pamplona Inferior da Formação Serra do Poço Verde. Dessa forma, os corpos de minério do Extremo Norte ocorrem ao longo da zona de falha que intercepta nessa área unidades estratigraficamente inferiores àquelas expostas na área da Mina de Vazante.

A Zona de Falha no Extremo Norte mostra um *trend* preferencial N-S, com consequente caimento dos planos mineralizados para oeste. Tal fato comprova que a Falha Vazante apresenta traço curvo à medida que se avança para norte, como apresentado por Barros (2007). Assim, como na Mina de Vazante, a Falha Vazante baliza a localização dos corpos de minério willemítico, representando um importante controle estrutural para a mineralização willemítica. Adicionalmente, os caimentos dos planos da família de falhas rúpteis NW apresentam-se menos inclinados em relação à Vazante, e representam controles para a mineralização com calamina (hemimorfita) e para a carstificação desenvolvida nos metadolomitos da Formação Serra do Poço Verde.

Os corpos de minério com willemita da Mina Extremo norte, assim como na Mina de Vazante, são hospedados por dolomitos brechados e brechas hidrotermais, que possivelmente evidenciam sobrepressão dos fluidos na zona de falha. Quimica e mineralogicamente, as brechas hidrotermais também podem ser divididas em tipos, sendo uma rica em Fe e outra não. Esta primeira ocorre frequentemente em profundidades próximas a 200 m ou em fechamento de lentes do minério com willemita mais profundas e é empobrecida em Mg em relação as demais hospedeiras. Em Vazante, a ocorrência desta brecha pode ser verificada no segmento sul.

As diferenças principais nos tipos de minérios willemítico são relacionadas com a quantidade de hematita associada à mineralização, levando à classificação de uma tipologia de minério rica em Fe, em decorrência das expressivas quantidades de hematita. Este tipo de minério, que também apresenta quantidades de limonita consideráveis, pode ser apenas comparado à ocorrência restrita ao seguimento sul da Mina de Vazante, conhecida como Lumiadeira, sendo, portanto bastante diferenciadas dos outros segmentos da mina, tais como Sucuri e Morro da Usina.

O minério willemítico com menores conteúdos de ferro ( $\text{Fe} < 20\%$ ), apresenta os teores mais elevados de zinco e de outros metais (Pb, Cd, Cu e Ag), associados à presença de willemita em cristais fibrosos, radiados e prismáticos. Amostras muito deformadas, texturalmente bastante finas, são também constituídas por uma geração tardia de willemita que substituí relíquias de cristais maiores de willemita. Essa tipologia de minério não havia sido reconhecida na Mina de Vazante.

O minério willemítico com maiores teores de ferro ( $\text{Fe} > 20\%$ ) apresenta grandes quantidades de hematita, em geral, com texturas que evidenciam ser sua deposição posterior à da willemita mais grossa. Hematita concentra-se também em planos de falha que limitam os *pods* de minério willemítico mais pobre em ferro, representando envelopes às zonas de minério com mais alto teor de zinco.

Outra diferença notável na área do Extremo Norte é a ausência de corpos expressivos constituídos por sulfetos, tais como esfalerita e galena, que ocorrem imbricados aos corpos de minério willemítico ao longo da Zona de Falha de Vazante, na área da Mina de Vazante. Os sulfetos e franklinita/magnetita, quando presentes, ocorrem como diminutas inclusões disseminadas em massa willemítica.

Adicionalmente, enquanto na Mina de Vazante, conteúdos significativos de magnetita podem ser reconhecidos em profundidade, na área de Extremo Norte a presença de hematita é característica. Embora seja possível supor que a área do Extremo Norte represente uma porção distinta de um mesmo sistema hidrotermal, as condições físico-químicas predominantes nessa área podem ter sido um pouco distintas em relação à Vazante.

Dessa forma, a Mina de Vazante pode representar um certo zoneamento no qual maiores quantidades de sulfetos e magnetita seriam esperadas nas partes mais profundas do depósito. A predominância dos corpos de minério com willemita, franklinita, zincita e hematita na Mina Extremo Norte, contudo, não reflete necessariamente as porções mais frias do sistema. A associação de minério dessa área refletiria condições físico-químicas resultantes do processo de mistura entre fluidos metalíferos, quentes e ascendentes, e o fluido meteórico residente na bacia (paleoaquífero), mais frio, que seriam ainda relativamente quentes ( $150\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mas sob condições de pH neutro. Isso poderia refletir influxo ao longo de falhas e permanência relativamente longa do fluido metalífero quente no paleoaquífero alimentado por fluidos de origem meteórica, que estariam em equilíbrio com as rochas hospedeiras carbonáticas. A evolução dos fluidos teria favorecido a maior precipitação de hematita nos estágios finais de desenvolvimento da Falha de Vazante, resultando em substituição parcial dos corpos willemíticos já formados.

## **Agradecimentos**

As autoras agradecem a Votoratim Metais S/A – Unidade Vazante, pelo apoio logístico e científico, em especial a equipe de geologia de exploração e geologia de mina.

## Referencias Bibliográficas

- Alkmim, F.F. & Marshak, S., 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic Collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29– 58.
- Almeida, F.F.M., 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, *Bol. DNPM*, v. 243, 36p.
- Amaral, G., 1968. *Geologia e depósitos de minério na região de Vazante, Estado de Minas Gerais*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade de São Paulo, 133p.
- Appold, M.S. & Monteiro, L.V.S. 2009. Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil. *Geofluids*, **9**, 96–115.
- 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.
- Babinski, M.; Monteiro, L.V.S.; Fetter, A.H.; Bettencourt, J.S.; Oliveira, T.F. 2005. Isotope geochemistry of the mafic dikes from the Vazante nonsulfide zinc deposit, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2005):293-304
- Barros, F.C. D., 2007. *Investigação da Possível Continuidade da Falha Vazante a Norte da Mina da Masa*. Monografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- Bhering, A.P., 2009. *Classificação do Maciço Rochoso e Caracterização das Brechas da Mina Subterrânea de Vazante – MG*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.
- Bittencourt, C., 2008. *Carstificações Hipogênicas e Epigênicas – Influência sobre a exploração de minério de zinco da Mina de Vazante- MG*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- Brugger, J., McPhail, D.C., Wallace, M., Waters, J., 2003. Formation of willemite in hydrothermal environments. *Econ. Geol.*, **98**:819–836.
- Carman, C.E., 2003. *The Aroona Willemite Trend, North Flinders Ranges, South Australia: Sedimentary, Structural, and Economic Geology*. Master Thesis. Colorado School of Mines.
- Cloud, P. E. & Dardenne, M. A. 1973. Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84:1673 - 1676.
- Couto, J. G. P; Cordani, U. G.; Kawashita, K.; Iyer, S. S.; Moraes, N.M.P. 1981. Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, p. 5 - 16.
- Dardenne, M.A, 1979. *Les minéralisations plomb-zinc du Groupe Bambui et leur contexte géologique*. Thèse de Doct. Etat., Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), 275 p.
- 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: Congr. Bras. Geol., 40., *Resumos*, SBG, p. 26.
- Dardenne, M.A.; Schobbenhaus, C.S., 2001. *Metalogênese do Brasil*. Brasília, Editora UnB/CNPq. 392 p.
- Groves, I.M., Carman, C.E., Dunlap, W.J., 2003. Geology of the Beltana willemite deposit, Flinders Ranges, South Australia. *Econ. Geol.*, **98**: 797–818.
- Hitzman, M.W.; Reynolds, N.; Sangster, D.F.; Allen, C.R.; Carman, C., 2003, Classification, Genesis, and Exploration Guides for Non-Sulfide Zinc Deposits. *Econ. Geol.*, **98**:685–714.
- Misi, A. 2010. Comparing metallogenic and phosphogenic events in the intracratonic and passive margin Proterozoic basins of the SF Craton: The Bambuí/Una and Vazante Groups. IV Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Mémoires [CD-ROM]
- Misi, A., 2001. Estratigrafia isotópica das seqüências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Idades e correlações. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Minerais*. SBG/MG, p. 67 – 92.
- Monteiro, L.V.S., 1997. *Contribuição à gênese das mineralizações de Zn da Mina de Vazante, Vazante, MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Monteiro, L.V.S., 2002. *Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, IG - Universidade de São Paulo.

- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Spiro, B., Graça, R., Oliveira, T.F. de, 1999. The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil: Constraints on willemite mineralization and fluid evolution. *Exploration Mining and Geology*, 8:21–42.
- 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.
- Monteiro, L.V.S.; Bettencourt, J.S.; Juliani, C.; Oliveira, T.F., 2007. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. *Gondwana Research*, 11:362-381.
- Pimentel, M.M.; Dardenne, M.A.; Fuck, R.A.; Viana, M.G.; Junges, S.L.; Fischel, D.P.; Seer, H.; 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.
- Pinho, J.M.M., 1990. *Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 115p.
- Rigobello, A.E.; Branquinho, J.A.; Dantas, M.G. da S.; Oliveira, T.F.; Neves Filho, W., 1988. Mina de Zinco de Vazante. In: Shobbenhaus, C. & Coelho, C.E.S. (coords). *Principais depósitos minerais do Brasil*. DNPM, v.3, pp. 101-110.
- Rostirolla, S.P., Mancini, F., Reis Neto, J.M., Figueira, E.G., Araújo, É.C. 2002. Análise Estrutural da Mina de Vazante e Adjacências: Geometria, Cinemática e Implicações para a Hidrogeologia. *Revista Brasileira de Geociências*, 1( 32): 639-647.
- Sangster, D.F., 2003. A Special Issue Devoted to Nonsulfide Zinc Deposits: A New Look. *Econ. Geol.*, **98**:683-684.
- Votoratim Metais, 2008. Relatório de Avaliação de Recursos. Relatório Interno, 72p.

## **Anexo 5. Manuscrito II**

**Caracterização Tecnológica do Minério de zinco do Extremo Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais (Revista da Escola de Minas – REM).**

# Caracterização Tecnológica do Minério de zinco do Extremo Norte da Mina de Vazante, Minas Gerais

Lemos, M.G.,<sup>a</sup> Monteiro, L.V.S.<sup>a</sup>

a – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

## Abstract

*The Vazante-Paracatu Belt, located in the northwest portion of the Minas Gerais state, is the most important Brazilian Zn district. In recent years, non-sulphide zinc deposits, such as the Vazante mine, has been highlighted in the international zinc scenario due to its higher levels than sulphide ores and mineral processing advances. Mineralogy and geochemistry studies of the Extremo Norte orebody (former Mineração Aeirense S/A), which represents a continuing trend of mineralization in relation to that of Vazante; aim to identify the form of occurrence and distribution of useful elements such, Zn and byproducts. High contents of iron in the mineralized zones, also a main feature of the area, have been used to classify ore subtypes. According to the technological characterization, it is observed that the subtypes of willemite ore with Fe-rich, show similar trends in relation to their size distribution. This study may provide insights for future geometallurgical studies, assisting in the predictability of the ore behavior in the plant and optimizing the efficiency in metallurgical plant.*

*Keyword: zinc deposits, technological characterization, Vazante-Paracatu Belt*

## Resumo

A Faixa Vazante-Paracatu, localizada na porção noroeste de Minas Gerais, representa o mais importante distrito zincífero do país. Nos últimos anos, os depósitos de zinco não-sulfetados, como o de Vazante localizado nessa faixa, vem se destacando no cenário internacional devido aos teores de zinco mais elevados em relação aos de minérios sulfetados, ao aumento do consumo de Zn perante o mercado mundial e aos avanços nas tecnologias de processamento mineral. Estudos de caracterização mineralógica e geoquímica do corpo de minério Extremo Norte (Antiga Mineração Aeirense S/A), que representa uma continuidade do *trend* de mineralização de Vazante, visam à identificação da forma de ocorrência e distribuição de elementos úteis que poderão vir a ser aproveitados, tais como Zn e seus possíveis subprodutos. Altos conteúdos de ferro nas zonas mineralizadas, também uma particularidade da área, foram usados na classificação de subtipos de minérios de calamina e willemita. De acordo com a caracterização tecnológica, observa-se que os subtipos de minério com willemita e rico em Fe, mostram tendências semelhantes em relação a sua distribuição granulométrica e na liberação do mineral minério. Espera-se poder fornecer subsídios para futuros estudos geometalúrgicos, auxiliando na previsibilidade do comportamento do minério na Usina e na otimização do rendimento da planta metalúrgica.

Palavras chaves, Depósitos de zinco, caracterização tecnológica e Faixa Paracatu-Vazante.

## **Introdução**

A Faixa Vazante-Paracatu, localizada no noroeste de Minas Gerais, representa o mais importante distrito zíncífero do país. Os depósitos de Vazante e Morro Agudo são responsáveis por toda a produção de concentrado de zinco brasileira. Os depósitos minerais deste distrito, são hospedados em rochas do Grupo Vazante (Dardenne et al., 1998), constituído, em geral, por metaritmitos, metapelitos e metadolomitos e que representa uma das unidades metassedimentares do segmento sul da Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967).

O consumo mundial de zinco vem se destacando de forma significativa, o que resultou em crescente produção na última década. Em termos de produção de zinco contido de concentrados, se todas as minas atuais estivessem operando em plena carga, o mundo estaria produzindo 13 milhões de toneladas. Mas o atual consumo em 2010 está em 11 milhões de toneladas de zinco contido (Deller, 2010). No Brasil, a Votorantim Metais S/A é responsável pela total produção de concentrados de silicato e em 2010 contabilizou uma produção de 165mil toneladas de zinco contido, sendo que existe uma previsão em aumentar a produção para 200 mil no ano de 2014 (Souza, 2011 – nota proveniente de Votorantim). Portanto, é de fundamental importância a aplicação das técnicas de caracterização tecnológica para alvos que poderão contribuir para o aumento na produção, identificando as principais características dos minérios e gerando informações para previsibilidade e otimização dos processos da planta de beneficiamento e metalurgia.

Diante do crescimento desta *commodity* perante o mercado mundial, propõe-se neste estudo a caracterização do minério com willemita do Extremo Norte da Mina de Vazante.

A área estudada (Figura 1a) localiza-se a norte da Mina de Vazante. O depósito foi explorado pelo Grupo Ingá e foi conhecido por Mineração Aereinse S/A (MASA). Todavia, em 1997 a mineradora entrou em processo de falência e a massa falida, sindicada pelo Banco de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais, foi leiloada no ano de 2007, sendo a posse da área destinada à Votorantim Metais. No início de 2008 a área foi renomeada para Extremo Norte.

## **Breve descrição sobre tratamento de minérios de Zn na Mina de Vazante**

Na mina de Vazante, os minérios de willemita e calamina, são extraídos e tratados em plantas de concentração por meio de processo de britagem, moagem e flotação, resultando

em um concentrado silicatado com teores de zinco próximos a 45% e com recuperação de 87% (Silva, 2006; Ferreira, 2008. Figura 1b). Este último alimenta a planta hidrometalúrgica de Três Marias, que é a única no mundo que trata estes tipos de concentrado (patentes pertencente a Votorantim Metais S/A) e juntamente com o concentrado sulfetado da mina Morro Aguda (localizada em Paracatu), obtêm variados produtos como: lingote, ligas metálicas, óxido de zinco, ácido sulfúrico, óxido de zinco e matérias primas para indústria de micronutrientes (Reis, 2001 *in* Silva, 2006).

A concentração de minerais de zinco por meio de flotação basicamente envolve a afinidade ou não de determinados constituintes minerais pelos reagentes químicos adicionados durante o processo (Silva, 2006). Porém, é importante destacar que para um bom desempenho do processo é necessário total controle de variáveis que podem interferir como: diversidade de gangas, teores do minério e presença de lama. Além disso, Para uma operação eficiente, o mineral minério deve apresentar-se liberado, ou seja, livre das partículas da ganga e para isso existem frações granulométricas ótimas onde ocorre a liberação. A consequência de tal fato é uma maior recuperação do elemento do mineral de interesse, no caso a willemita e/ou hemimorfita, sendo, portanto, importante a definição do grau de liberação do mineral de interesse e em quais frações granulométricas.

A quantidade elevada de hematita, argilominerías e dolomita em minérios de zinco podem prejudicar o processo como a geração de finos (lama) e baixa liberação do mineral minério. Além disso, um dos maiores problemas relacionados ao tratamento de minério de zinco brasileiro é o fenômeno conhecido por *slime coating*, ou seja, recobrimento das partículas maiores pelos finos ou lamas, causados pela presença de lamas dolomíticas na polpa do minério (Silva, 2006). Esses finos alteram as características das superfícies das partículas causando elevação considerável no consumo de reagentes da flotação (Galery et al. *in* Silva, 2006). Este efeito é bastante comum nos minérios willemíticos que ocorrem próximo a zonas alteradas pela presença de água que percola em fraturas de direção NW e em fendas e nos minérios de calamina explorados em superfície.

A quantidade elevada de sulfetos também pode prejudicar a interação entre as partículas de silicato de Zn e reagentes, atingindo diretamente a recuperação do Zn. Porém, a presença destes sulfetos, como a galena, esfalerita e sulfetos de Cu e Ag, podem ser

potenciais para aproveitamento como subproduto agregado aos silicatos de zinco, sendo interessante estudá-los.

A dolomita, quando ocorre em excesso nos concentrados de Zn, pode ocasionar perdas nos processos de lixiviação ácida, realizada em Três Marias. Esta perda é decorrente da produção excessiva de CO<sub>2</sub> pelos carboantos. Além disso, para alimentação da usina usa-se o *cut off* para Zn igual a 5%, ou seja, a partir deste teor de corte a operação da usina e lavra sejam economicamente viáveis.

Portanto, a planta de beneficiamento deve apresentar teores limites e padrão granulométrico para alimentação. Em Vazante, em média, são usados os seguintes parâmetros químicos para alimentação da planta de tratamento do minério willemítico: 15% de Zn, até 10% de Fe, 0,40% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15%, 0,20% de S de CaO e 17% de MgO. A granulometria utilizada para alimentação da flotação, onde ocorre a liberação da willemita e/ou hemimorfita, são nas frações 150, 38 e -38mm (100#, retido em 400# e passante em - 400#).

#### **Tipos de minérios com willemita**

Apesar dos teores de Fe do Extremo Norte serem altos e maiores do que da Mina de Vazante, foram considerados um dos fatores principais para a separação dos tipos de minérios willemíticos. Além disso, auxiliaram também na classificação a distinção de texturas e os tipos e concentrações de minerais, descritos na caracterização petrográfica.

Os tipos de minério refletem as variações do teor de Fe e condições requeridas para o processo de beneficiamento, uma vez que na Mina de Vazante, os limites para o Fe podem chegar ao máximo de 10%.

Portanto, os tipos de minério foram divididos em minério willemítico rico em ferro (teores de Fe > 20% e Zn > 5%) e willemítico (Fe < 20% e Zn > 5%). A condição Zn > 5% é também um dos critérios utilizado na alimentação da planta metalúrgica de Vazante.

Além disso, as amostras apresentam-se mais intensamente deformadas, cisalhadas e fraturadas, em relação às amostras da Mina de Vazante, mostrando também forte influência da Zona de Falha de Vazante.

#### ***Minério de willemita rico em ferro***

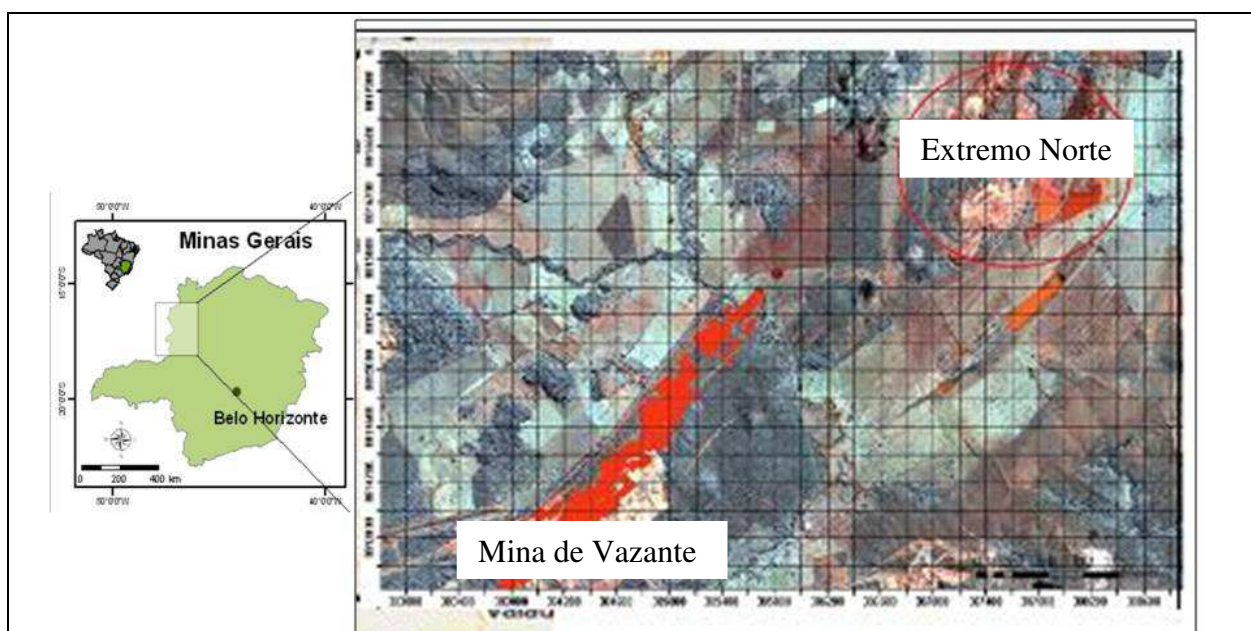
Este tipo de minério é caracterizado pela presença de uma massa de hematita envolvendo cristais de willemita. Em geral, as amostras apresentam uma textura

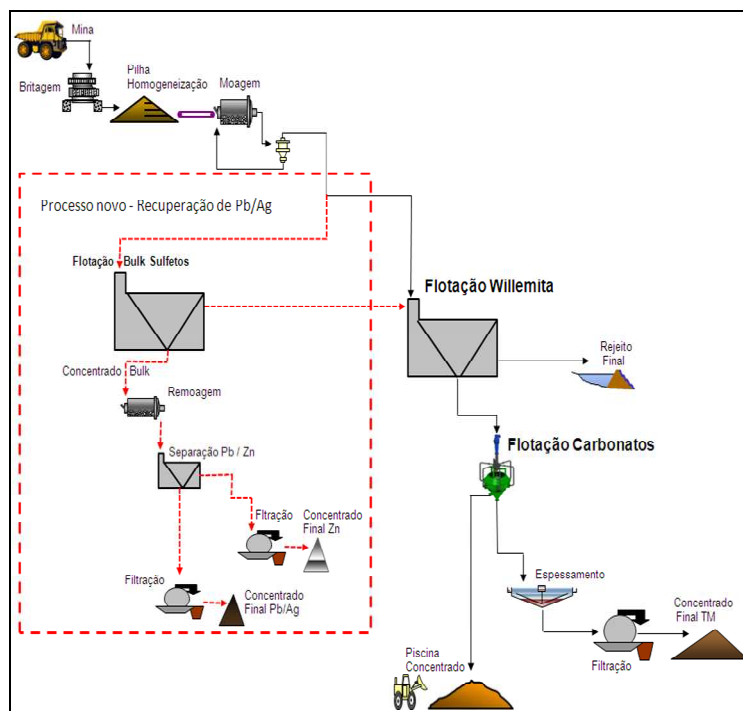
cataclástica, fraturada e às vezes com veios anastomosados de hematita envolvendo os cristais de willemita, dolomita e calcita, estando, portanto bastante deformadas.

Esta tipologia ocorre em profundidades próximas a 200m, em pacotes pouco espessos, mas contínuos. Porém, a profundidades maiores que 400m, aparecem na borda da mineralização willemítica de teores de  $Fe < 20\%$ , em níveis bastante delgados.

As amostras do minério willemítico rico em ferro são constituídas por hematita (44%), willemita (25%), dolomita e dolomita com ferro (15%) e clorita zincífera (7%). Pequenos cristais de franklinita inclusa em willemita ou hematita, limonita (com conteúdos de Zn, Si e Al) e carbonatos de Fe ocorrem subordinados.

A dolomita forma uma massa que bordeja relíquias de cristais de willemita. Frequentemente, observam-se cristais de hematita com hábito acicular e pseudomorfos de magnetita/franklinita imersos em hematita maciça.





**Figura 1. a. Localização da área de estudo. b. Desenho esquemático mostrando o fluxograma do processo de tratamento dos minério da Mina de Vazante (modificado de Ferreira, 2008)**

Os cristais reliquiais de willemita apresentam-se fraturados, corroídos e intensamente substituídos por uma fase willemítica mais fina ou por clorita (Figura 2d). Esta última apresenta-se também em veios cortando a massa constituída por hematita. Frequentemente, no contato da willemita com a massa de hematita, ocorrem cristais de limonita.

#### *Minério com willemita*

Em geral, esta tipologia assemelha-se com as encontradas na Mina de Vazante. As amostras são constituídas por willemita (51%), hematita (25%) dolomita/calcita (10%), clorita (6%) e quartzo (2%) com barita, gahnita, covellita, greenockita, monazita, sulfetos de prata (jalpaita -mckinstyrita ( $\text{Ag, Cu})_2\text{S}$ ), apatita, galena, franklinita/magnetita, limonita e carbonatos de Fe subordinados. A caracterização dos tipos de sulfetos de Ag, presentes nas amostras de minério, foram baseadas também na correlações entre estas análises e com outras realizadas com amostras da mina de Vazante.

A partir das descrições petrográficas, foi possível definir três formas de ocorrência da willemita:

- Cristais de willemita granoblásticos, grossos e semelhante aos presentes no minério da Mina de Vazante (Figura 4b);
- Cristais fibroradiais semelhantes aos encontrados na Mina de Vazante (Figura 4c);
- Cristais finos de willemita, que substituem cristais grossos e ocorrem nas amostras mais deformadas (Figura 4d).

Em nenhum destes tipos de willemita foi verificada diferença na sua composição química. Aleatoriamente, os cristais apresentaram-se puros (Zn, Si e O), ou com ligeira indicação de Fe na estrutura.

Este tipo de minério também mostra-se bastante deformado, apresentando hematita ao longo da foliação milonítica, visível em lamina delgada-polida. Estes planos deslocam cristais e veios de willemita com frequência.

Os cristais de willemita foram observados substituindo a dolomita, com exceção dos fibroradiais. Em amostras com grau de deformação alto, também se observa a willemita fina e a clorita substituindo cristais também de willemita, grossos e granoblásticos. O silicato de Zn é cortado por veios e vênulas de hematita e carbonatos de Fe (ankerita e ferro dolomita). Em algumas amostras este último pode substituir outros cristais de willemita.

A partir das análises de microscopia eletrônica, foi possível verificar inclusões de sulfeto, sulfatos, fosfatos e óxidos da ordem de 20  $\mu\text{m}$  em cristais de willemita (Figura 4 e). Estes minerais ocorrem disseminados nos cristais e são representados por fosfatos de terras raras (monazita), apatita, sulfetos de Ag e Cu, covellita/calcocita, barita, franklinita e

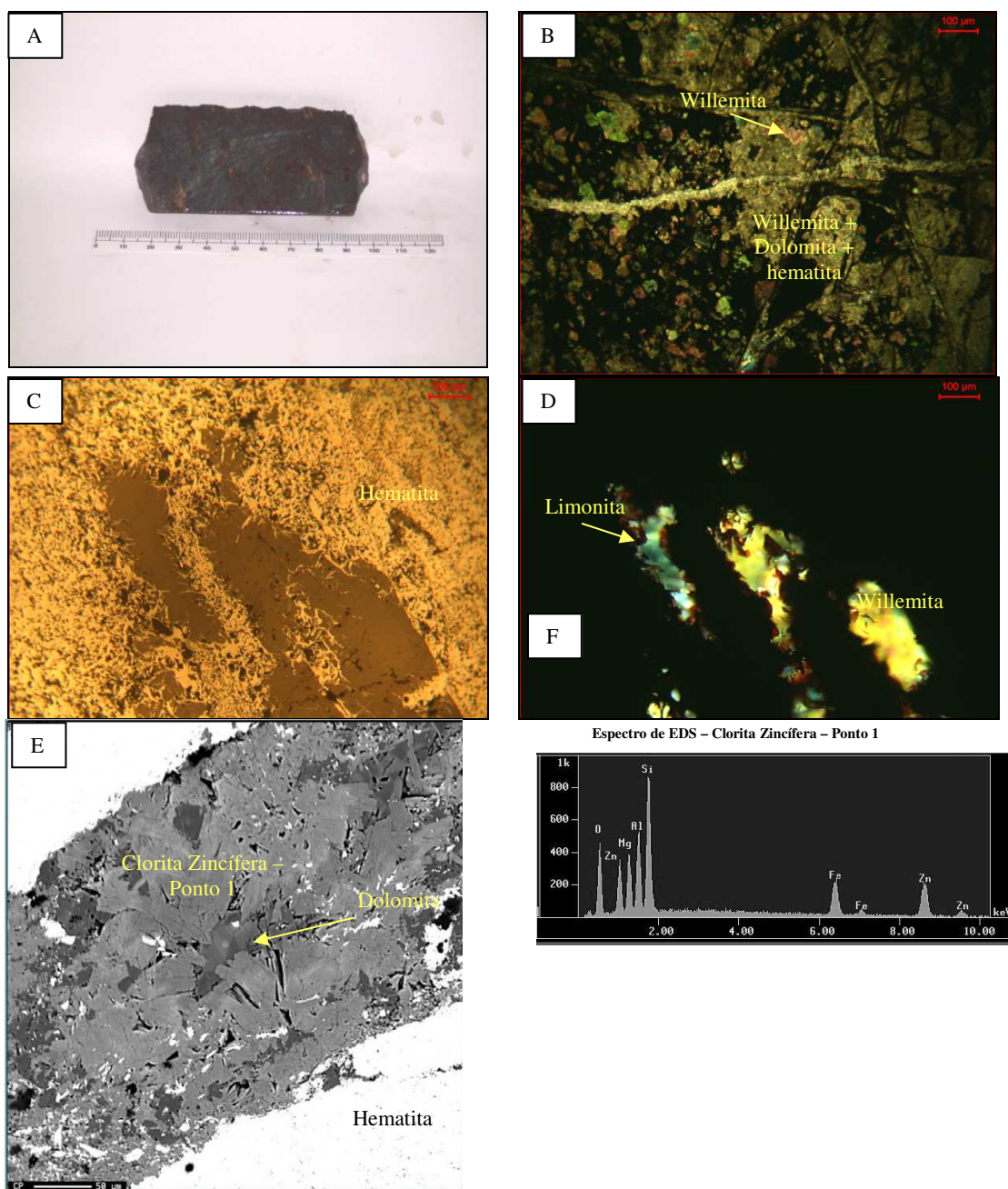


Figura 2. Tipos de minério com willemita e rico em ferro.

- A. Amostra de testemunho de sondagem do minério willemítico rico em Fe – Amostra MASA20. B. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de lamina polida da amostra MASA20 – A hematita (opaca) ocorre corroendo cristas de willemita. Observa-se também massa de carbonatos e willemita de granulação mais fina sendo também corroídas por massa de hematita. No centro da imagem ocorrem vênulas de carbonatos (Escala 100 µm). C. Imagem em luz refletida de massa de hematita ao redor de cristais reliquias de willemita (Escala 100 µm). D. Imagem anterior, porém em luz transmitida com nicóis cruzados. Destaque para limonita na borda dos cristais de willemita (Escala 100 µm). E. Micro veio preenchido por clorita zincífera e carbonatos (Escala 50 µm). F. Espectro de EDS da clorita zincífera da imagem a esquerda.

galena. Grãos de limonita também ocorrem disseminados ou próximos ao contato da willemita com veios de hematita.

### **Caracterização tecnológica dos tipos de minério com willemita**

Para caracterização tecnológica dos tipos de minérios com willemita foram escolhidas alíquotas de amostras referentes à classificação usada na petrografia. O objetivo principal é a distribuição granulométrica e conseqüente definição das características dos grãos, suas associações e estimativa dos minerais presentes, bem como a liberação da willemita de acordo com os subtipos definidos.

A composição química das amostras estudadas está disposta na tabela 1.

**Tabela 1. Composição química das amostras**

| <b>Amostra</b> | <b>Zn<br/>(%)</b> | <b>Fe<br/>(%)</b> | <b>Al<br/>(%)</b> | <b>CaO<br/>(%)</b> | <b>Mg<br/>(%)</b> | <b>S<br/>(%)</b> | <b>Ag<br/>(ppm)</b> | <b>Cd<br/>(ppm)</b> | <b>Cu<br/>(ppm)</b> | <b>Pb<br/>(ppm)</b> |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Masa 115       | 23,22             | 34,61             | 0,32              | 2,38               | 1,32              | 0,05             | 18,00               | 56,80               | 46,06               | 1576                |
| Masa 124       | 39,50             | 14,61             | 0,10              | 1,95               | 1,04              | 0,08             | 40,00               | 64,00               | 42,30               | 2530                |

A amostra Masa 115 apresenta menor teor de Zn e maior de Fe, sendo que pela mineralogia e textura é classificado como subtipo de minério com willemita e rico em Fe. Enquanto a amostra Masa 124 apresenta maior teor de Zn e menor teor de Fe, se encaixando no subtipo minério com willemita. Além disso, a segunda amostra apresenta teores mais altos de Ag e Pb.

Uma comparação entre as análises granulométricas para as duas amostras estudadas podem ser visualizadas no gráfico de distribuição em massa acumulada no passante (Figura 3)

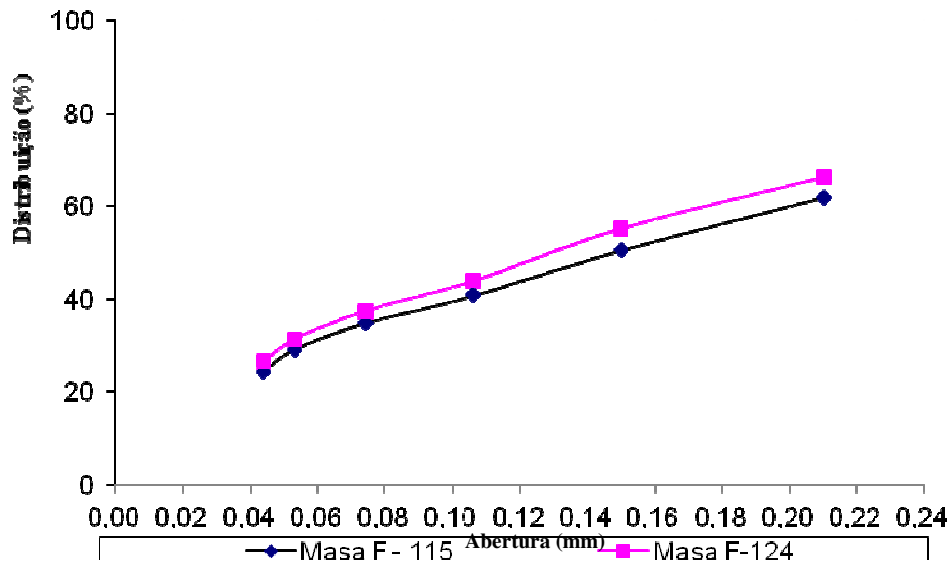


Figura 3. Comparação das análises granulométricas dos subtipos de minério com willemita

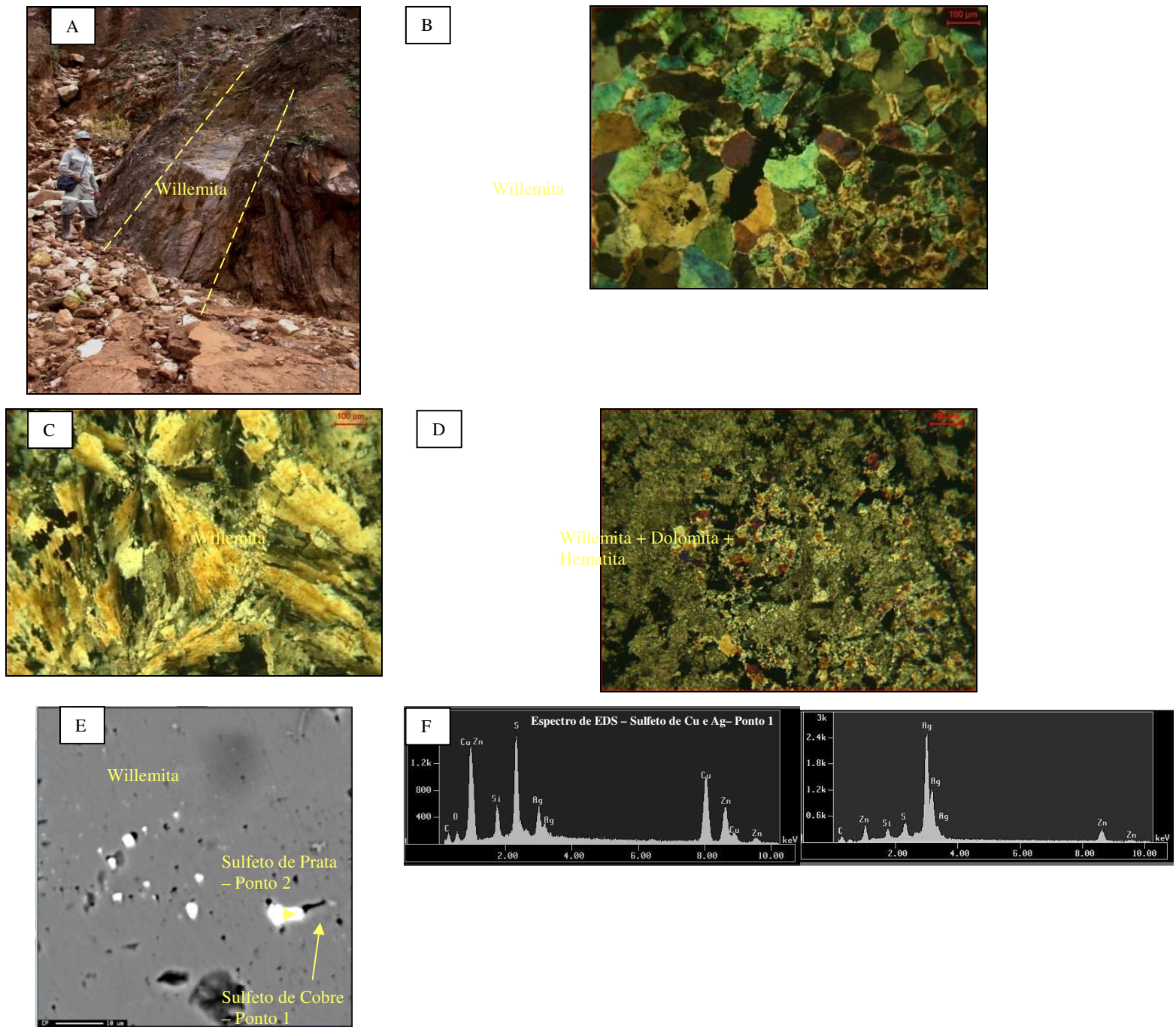
*Distribuição granulométrica, mineralógica e liberação do minério de willemita rico em Fe*

Os resultados da distribuição granulométrica estão dispostos na tabela 2.

A análise granulométrica indica que 38,03% em massa da amostra estão retidas em 0,15mm, enquanto que 24,47% em massa constituem material passante em 0,038mm.

O teor de Zn na fração acima de 0,038mm situa-se entre 18 e 28,90 %, com tendência de acréscimo para os finos abaixo de 0,15mm. Na fração -0,038mm o teor de zinco corresponde a 24,90% (26,24% do total da amostra contida). Em 0,15mm o teor de Zn é igual a 18% o que representa 29,47% da amostra. A partir desta análise é possível verificar que a distribuição de Zn em relação a massa ocorre nos extremos das frações granulométricas.

O teor de Fe acima de 0,15mm encontra-se igual a 43,90, o que corresponde 48,24 do total de Fe da amostra. Em geral observa-se uma diminuição no teor de Fe em direção aos finos indicando que a hematita, principal mineral portador de Fe, permanece nas frações mais grosseiras.



**Figura 4. Tipos de minério com willemita.**

A. Lente de willemita aflorante. B. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de cristais de willemita granoblástica (Escala 100 µm). C. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de cristais fibrorradiados de willemita (Escala 100 µm) D. Imagem em luz transmitida com polarizadores cruzados de willemita fina substituindo cristais mais grossos de willemita (Escala 100 µm). E. Imagem de elétrons retroespalhados de willemita inclusa por micro cristais de sulfetos de cobre e prata(Escala 10 µm). F. Espectro EDS dos sulfetos de Cu e prata.

Os teores de CaO e MgO apresentam comportamento semelhantes com tendência de aumento a medida que a granulometria diminui. O teor de CaO varia entre 1,94 e 4,37 nas frações abaixo de 0,15mm; enquanto os de MgO encontram-se entre 1,07 e 2,44. Abaixo de 0,038mm, estes elementos estão contidos em 45% do total da amostra.

Os teores de Pb e Ag também aumentam a medida que a granulometria se torna mais fina. Enquanto os de Cd e Cu permanecem, em geral, constantes. Os valores de S variam de 0,01 a 0,05%.

Em geral, este subtipo é constituído por hematita (44%), willemita (25%) e secundariamente por dolomita (10%), clorita que pode conter Zn em sua estrutura (7%), carbonatos de Fe e/ou dolomita férrica (5%). Além disso, foram verificados outros minerais que ficaram em porcentagem abaixo de 0,5% como galena, apatita, barita, raros sulfetos de prata e/ou cobre, limonita e argilominerais.

Os grãos de willemita apresentam-se fraturados, por vezes porosos e com recobrimento superficial em frações, principalmente nas frações mais finas. Frequentemente, são observadas as seguintes associações dos grãos de willemita (Figura 6 b):

- Intercrescida ou envolvida pela hematita;
- Justaposta ou intercrescida com a dolomita e/ou carbonatos de ferro;
- Com inclusão submicrométricas de limonita e franklinita sendo esta frequência diminuída em direção aos finos.

A liberação global da willemita para este subtipo de minério acima de 0,053mm corresponde a 60%; liberação superior a 75% só é atingida para frações abaixo de 0,053mm, chegando a 77% na fração passante em 0,044mm (Figura 5 a).

#### *Distribuição granulométrica, mineralógica e liberação do minério de willemita*

Os resultados da distribuição granulométrica para este subtipo de minério estão dispostos na tabela 3.

A análise granulométrica indica que 33,73% em massa da amostra estão retidas em 0,15mm, enquanto que 26,50% em massa constituem material passante em 0,038mm.

O teor de Zn na fração acima de 0,038mm situa-se entre 32,53 e 45,60 %, com tendência de acréscimo para os finos abaixo de 0,15mm. Na fração -0,038mm o teor de zinco corresponde a 41,92% (28,12% do total da amostra contida).

Em 0,15mm o teor de Zn é igual a 32,53% o que representa 27,78% da amostra. A partir desta análise é possível verificar que a distribuição de Zn em relação a massa ocorre também nos extremos das frações granulométricas como na amostra Masa115.

O teor de Fe acima de 0,15mm encontra-se igual a 23,56, o que corresponde 54,15 do total de Fe da amostra. Em geral observa-se uma diminuição no teor de Fe até a fração - 0,044+0,038mm. Na faixa granulométrica abaixo de 0,038 observa-se um aumento no teor de Fe que está contido em 18,63% do total da amostra.

Os teores de CaO e MgO apresentam comportamento semelhantes com tendência de aumento a medida que a granulometria diminui. O teor de CaO varia entre 0,76 e 4,08; enquanto o os de MgO encontram-se entre 0,44 e 1,99. Abaixo de 0,038mm, estes elementos estão contidos em torno de 50% do total da amostra, o que pode contribuir para o fenômeno *slime coating*.

Os teores de Pb, Cu, Cd, S e Ag também aumentam a medida que a granulometria se torna mais fina, os quais apresentam os maiores valores na fração -0,038mm.

Diferentemente das amostras do minério willemítico rico em Fe, os grãos deste subtipo apresentam-se superfície límpida e homogênea, principalmente quando liberada. Porém, por vezes, aparece porosa, fratura e com recobrimento superficial nas frações mais finas. As associações mais comuns dos grãos que contem willemita são com a hematita, justaposta com dolomita e inclusos por sulfetos e franklinita, sendo esta mais uma diferença relativa as amostras rica em Fe, onde é mais rara a ocorrência de sulfetos (Figura 6 e).

A liberação global da willemita abaixo de 0,11mm corresponde a 65%; liberação superior a 70% só é atingida para frações abaixo de 0,074mm, chegando a 80% na fração passante em 0,044mm (Figura 5 b).

### **Discussão e Implicações para o tratamento de minérios de Zn**

Em geral, os subtipos apresentaram distribuição granulométrica bastante semelhante, da qual se tem porcentagens em massa significativas nas frações grosseiras e muito finas.

A distribuição do Zn para ambas as amostras mostra um aumento significativo entre as frações -0,15+0,11 mm e -0,044+0,038mm. Mas, em geral, os teores da fração mais grosseira e fina são significativos.

Tabela 2. Distribuição granulométrica da amostra rica em Fe

| Abertura<br>(mm) | % em massa |       | Teores  |         |         |          |          |        |           |           |           |           |         | Distribuição no ensaio (%) |          |          |  |
|------------------|------------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------------------------|----------|----------|--|
|                  | Ret        | Ac    | Zn<br>% | Fe<br>% | Al<br>% | CaO<br>% | MgO<br>% | S<br>% | Pb<br>ppm | Ag<br>ppm | Cu<br>ppm | Cd<br>ppm | Zn<br>% | Fe<br>%                    | CaO<br>% | MgO<br>% |  |
| +0,15            | 38,03      | 38,03 | 18,00   | 43,90   | 0,11    | 1,13     | 0,61     | 0,02   | 1165      | 10        | 44        | 54        | 29,47   | 48,24                      | 18,08    | 17,57    |  |
| -0,15+0,11       | 11,43      | 49,46 | 26,08   | 30,18   | 0,70    | 1,94     | 1,07     | 0,05   | 1561      | 6         | 46        | 56        | 12,84   | 9,97                       | 9,33     | 9,27     |  |
| -0,11+0,074      | 9,78       | 59,24 | 27,46   | 30,41   | 0,31    | 2,37     | 1,36     | 0,05   | 1461      | 7         | 55        | 50        | 11,56   | 8,59                       | 9,75     | 10,07    |  |
| -0,074+0,053     | 5,91       | 65,14 | 28,26   | 28,93   | 0,31    | 2,48     | 1,30     | 0,01   | 1523      | 10        | 41        | 57        | 7,19    | 4,94                       | 6,16     | 5,82     |  |
| -0,053+0,044     | 5,70       | 70,84 | 28,35   | 27,87   | 0,20    | 2,72     | 1,46     | 0,02   | 1582      | 8         | 40        | 51        | 6,95    | 4,59                       | 6,52     | 6,30     |  |
| -0,044+0,038     | 4,69       | 75,53 | 28,45   | 27,55   | 0,20    | 2,62     | 1,62     | 0,02   | 1826      | 55        | 21        | 53        | 5,75    | 3,73                       | 5,17     | 5,76     |  |
| -0,038           | 24,47      | 100   | 24,90   | 28,20   | 0,54    | 4,37     | 2,44     | 0,10   | 2230      | 36        | 54        | 67        | 26,24   | 19,94                      | 44,99    | 45,22    |  |
| Total            | 100        | 100   | 23,22   | 34,61   | 0,32    | 2,38     | 1,32     | 0,05   | 1576      | 18        | 46        | 57        | 100     | 100                        | 100      | 100      |  |

Tabela 3. Distribuição granulométrica da amostra de minério com willemita

| Abertura<br>(mm) | % em massa |       | Teores |       |      |        |       |      |        |        |        |        |       | Distribuição no ensaio (%) |       |       |  |
|------------------|------------|-------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|--------|--------|--------|-------|----------------------------|-------|-------|--|
|                  | Ret        | Ac    | Zn %   | Fe %  | Al % | Ca O % | MgO % | S %  | Pb ppm | Ag ppm | Cu ppm | Cd ppm | Zn %  | Fe %                       | CaO % | MgO % |  |
| +0,15            | 33,73      | 33,73 | 32,53  | 23,46 | 0,20 | 0,76   | 0,44  | 0,07 | 2166   | 13     | 25     | 57     | 27,78 | 54,15                      | 13,15 | 14,31 |  |
| -0,15+0,11       | 11,08      | 44,81 | 42,98  | 12,04 | 0,15 | 1,32   | 0,78  | 0,08 | 2452   | 19     | 34     | 58     | 12,06 | 9,13                       | 7,50  | 8,33  |  |
| -0,11+0,074      | 11,34      | 56,15 | 42,34  | 10,41 | 0,12 | 1,44   | 0,83  | 0,09 | 2382   | 18     | 38     | 58     | 12,16 | 8,08                       | 8,38  | 9,07  |  |
| -0,074+0,053     | 6,41       | 62,56 | 44,99  | 9,08  | 0,10 | 1,58   | 0,95  | 0,08 | 2511   | 55     | 44     | 63     | 7,30  | 3,98                       | 5,20  | 5,87  |  |
| -0,053+0,044     | 6,19       | 68,75 | 45,32  | 8,50  | 0,09 | 1,70   | 1,06  | 0,08 | 2580   | 58     | 43     | 58     | 7,10  | 3,60                       | 5,40  | 6,32  |  |
| -0,044+0,038     | 4,74       | 73,50 | 45,60  | 7,48  | 0,06 | 2,02   | 1,15  | 0,10 | 2642   | 74     | 41     | 58     | 5,48  | 2,43                       | 4,92  | 5,26  |  |
| -0,038           | 26,50      | 100   | 41,92  | 10,27 | 0,08 | 4,08   | 1,99  | 0,10 | 3064   | 79     | 69     | 81     | 28,12 | 18,63                      | 55,46 | 50,83 |  |
| Total            | 100        | 100   | 39,50  | 14,61 | 0,13 | 1,95   | 1,04  | 0,08 | 2531   | 40     | 42     | 64     | 100   | 100                        | 100   | 100   |  |

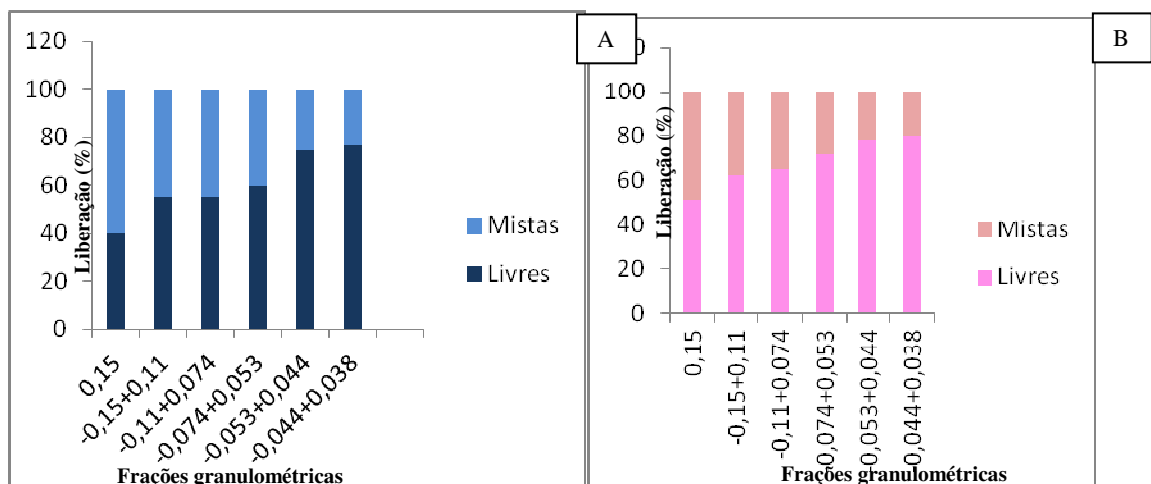
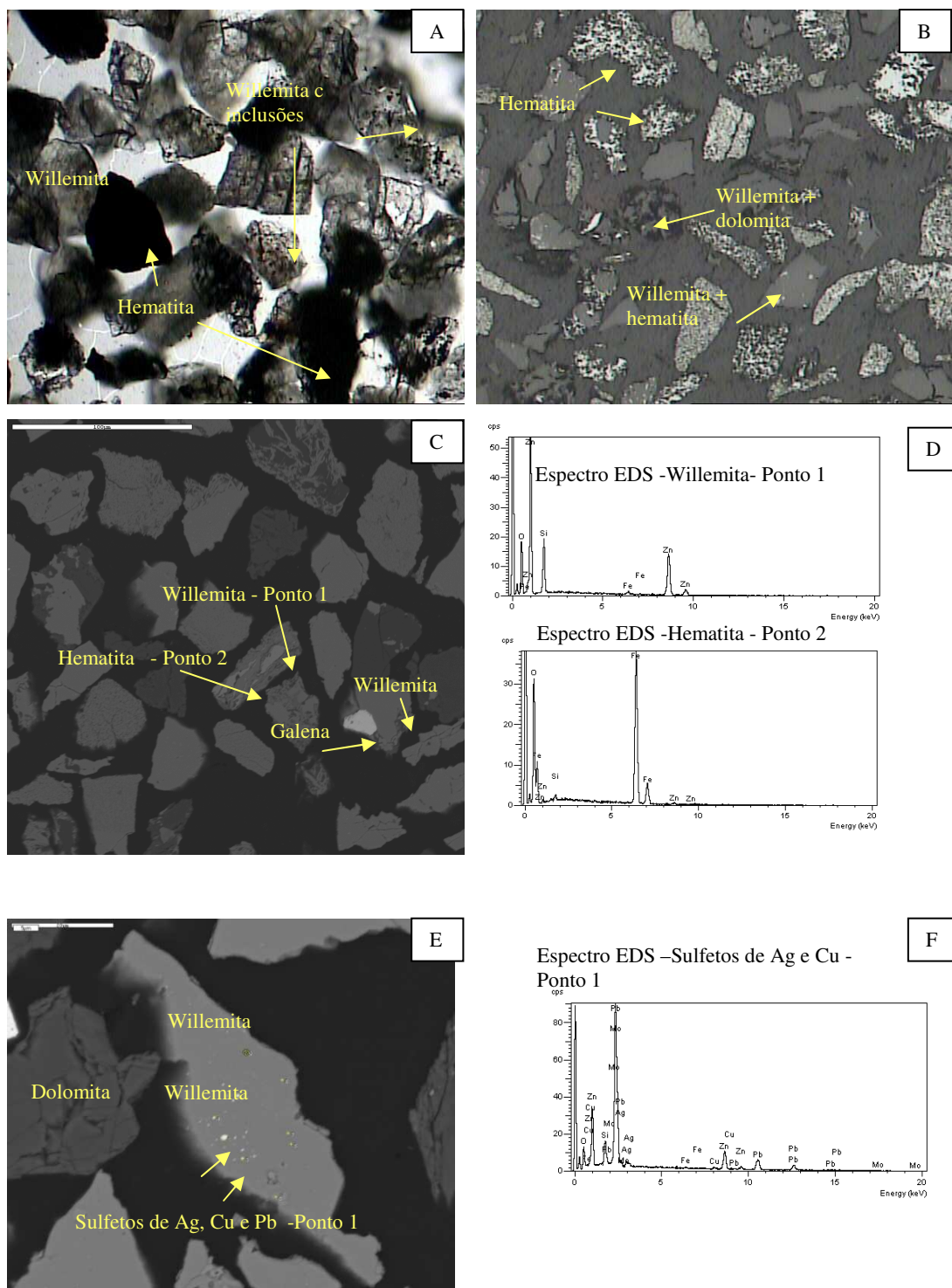


Figura 5. Distribuição da liberação por faixa granulométrica: A) minério com willemita rica em Fe e B) Minério com willemita



**Figura 6. Associações dos grãos do subtipo de minério com willemita**  
**A.** Imagem em luz transmitida dos grãos do minério com willemita. A willemita encontra-se com inclusão e associada a hematita (Fração -0,11+0,074mm - Escala 100  $\mu$ m). **B.** Imagem em luz refletida dos grãos do minério com willemita rico em Fe(Fração - 0,074+0,053mm - Escala 100  $\mu$ m). **C.** Imagem de elétrons retroespalhados dos grãos de willemita e hematita na amostra rica em

Fe . D. Espectro EDS dos grãos de willemita e hematita. E. Imagem de elétrons retroespalhados da willemita com inclusões de sulfetos (Fração -0.038mm - Escala 20  $\mu$ m). F. Espectro EDS dos sulfetos.

Os teores de Fe, obviamente, apresentam-se mais elevados no subtipo minério rico em Fe, porém quando se compara com a outra tipologia verifica-se um comportamento semelhante (Figura 3). Nas frações grosseiras o conteúdo de Fe é relativamente maior do que nas demais frações e quando confrontado com as análises em MEV e descrição em microscópio ótico observa-se que os grãos de willemitas ocorrem pouco liberados e associados à hematita na faixa +0,15mm. Além disso, a hematita ocorre frequentemente liberada e grosseira (Figura 6 b). Este fato mostra que provavelmente o *WI* (*work index*) destas amostras é maior do que as da Mina de Vazante, podendo prejudicar diretamente os processos de britagem/cominuição.

O aumento nos teores de CaO e MgO mostram-se com tendência para os finos, para ambas tipologias. Os finos gerados estão em sua maioria na forma de dolomita e mais raramente em argilominerais, contribuindo para o recobrimento das partículas de willemita, como verificados em MEV. Este recobrimento pode dificultar a interação dos reagentes com os grãos, diminuindo a eficiência do processo. Este caso pode ser também relacionado com a quantidade de hematita na amostra, principalmente no subtipo de minério com willemita rico em Fe. Como a dureza da hematita é maior que dos carbonatos e a quantidade do óxido de Fe é elevada, a hematita passa a ser um corpo moedor, ou seja, ajuda na cominuição, gerando finos dos minerais de baixa dureza.

Nas amostras, observa-se um aumento nos teores de Pb e Ag em relação as frações mais finas, principalmente para o subtipo de minério com willemita. Em MEV, foi possível definir a ocorrência destes inclusos em grãos de willemita, inclusive na faixa abaixo de 0,038mm. Esta forma de associação torna o aproveitamento destes sulfetos limitado, pois não apresentaram liberações significativas. A mesma tendência se verifica para o Cd e Cu.

### **Conclusões**

De acordo com a caracterização tecnológica, observa-se que os subtipos de minério com willemita e rico em Fe, mostram tendências semelhantes em relação a sua distribuição granulométrica. O conteúdo de Zn é significativo entre as faixas granulométricas - 0,15+0,11 e -0,044+0,038mm. Os teores de Fe encontram-se maiores na fração grosseira, principalmente para as amostras ricas em Fe, onde os grãos de hematita estão associados à willemita ou liberados. Ao relacionar tal fato com a petrografia, pode-se concluir que a

consequência desta verificação é devido a associação da massa de hematita e a substituição da fase willemítica pela hematítica.

Os teores de CaO e MgO apresentaram maiores nas frações mais finas para os dois subtipos de minério, principalmente para o subtipo rico em Fe e contribuem para fenômeno *slime coating*. Tal fato é relacionado com os maiores teores de CaO e MgO e quantidades de hematita, pois está pode ser um corpo moedor devido a diferença em sua dureza.

Em geral, os sulfetos se tornam potenciais não muito atrativos, devido sua forma de ocorrência. Como o Extremo Norte apresenta condições não favoráveis para formação de sulfetos e estes quando presentes aparecem inclusos na willemita, seu aproveitamento passa a ser complicado.

Na Mina de Vazante, os teores de Fe são mais baixos, mas sua distribuição é semelhante dos minérios encontrados no Extremo norte. O mesmo é observado para Zn, CaO e MgO. Diferentemente da mina da antiga Masa, é possível a separação dos sulfetos, devido este ocorrerem em veios que cortam a willemita e dolomita, além de inclusos.

Especialmente é difícil a separação dos subtipos de minério com willemita, pois o rico em Fe, normalmente ocorre no fechamento das lentes mais ricas em Zn. Apenas no início da lavra se deve ter um seletividade, pois foi constado que o minério rico em Fe prevalece em menores profundidades. Para isso é necessário um planejamento bem feito para realizações da blendagem do minério do Extremo Norte com os de Vazante, fornecendo assim subsídios para uma boa eficiência da planta de tratamento e metalurgia.

Interessante também é a criação de equipes multidisciplinares para estudos de rotas alternativas para processamento do minério rico em Fe.

Estes fatos citados são de fundamental importância para uma boa relação e aproveitamento das etapas de geologia, beneficiamento e planejamento, demonstrados que estas podem ser tratadas separadamente. A importância da relação interdisciplinar e correlação entre os processos dentro da mineração os tornam mais produtivos e interessantes, podendo assim romper barreiras.

## Sugestões

- Caracterização química das amostras do afundado e do flutuado quanto a partição de Zn;
- Minério ou concentrado rico em Fe pode representar uma oportunidade para o processamento hidrometalúrgico, com elevada recuperação de zinco, usando exclusivamente concentrado de silicato de zinco alto ferro. Atualmente o processo existente é muito eficaz para um mix de 87% de concentrado de silicato junto com 13% de concentrado sulfetado.

## Agradecimentos

As autoras agradecem a Votorantim Metais S/A – Unidade Vazante, pelo apoio logístico e científico, em especial os Engenheiros Lemyr Martins e Tiago Silva.

## Referencias

- Alkmim, F.F. & Marshak, S., 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic Collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29– 58.
- Almeida, F.F.M., 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, *Bol. DNPM*, v. 243, 36p.
- Amaral, G. & Kawashita, K. 1967. Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 21., *Anais*, SBG, p. 214-217.
- Amaral, G. 1966. Isótopos de chumbo e gênese das jazidas de Vazante e Itacarambi. Publicação número 1. Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo Rio de Janeiro. p. 45.
- Amaral, G. 1968. Resultados preliminares do estudo sobre a mineralização e composição isotópica do chumbo em galenas de depósitos encaixados no Grupo Bambuí. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22.
- Amaral, G., 1968. *Geologia e depósitos de minério na região de Vazante, Estado de Minas Gerais*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade de São Paulo, 133p.

- Appold, M.S. & Monteiro, L.V.S. 2009. Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil. *Geofluids*, **9**, 96–115.
- 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
- Babinski, M.; Monteiro, L.V.S.; Fetter, A.H.; Bettencourt, J.S.; Oliveira, T.F. 2005. Isotope geochemistry of the mafic dikes from the Vazante nonsulfide zinc deposit, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2005):293-304
- Banks, D.A. & Russell, M.J. 1992 Fluid mixing during ore deposition at the Tynagh base-metal deposit, Ireland. *European Journal of Mineralogy*, **4**:921-931.
- Barros, F.C. D., 2007. Investigação da Possível Continuidade da Falha Vazante a Norte da Mina da Masa. Monografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- Bhering, A.P., 2009. Classificação do Maciço Rochoso e Caracterização das Brechas da Mina Subterrânea de Vazante – MG. Viçosa. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.
- Bittencourt, C., 2008. Carstificações Hipogênicas e Epigênicas – Influência sobre a exploração de minério de zinco da Mina de Vazante- MG. Curitiba. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- Brugger, J., McPhail, D.C., Wallace, M. and Waters, J., 2003. Formation of willemite in hydrothermal environments. *Econ. Geol.*, **98**:819–836.
- Cassedane, J. & Lasserre, M. 1969, Análise isotópica pelo método do chumbo em algumas galenas brasileiras: descrição do método utilizado. *Min. Met*, v. XLIX, n.293, p. 215 - 224.
- Cassedane, J. 1972. *Les Gîtes de Plomb et de Zinc du Brésil et leur Répartition Linéamentaire*. Thèse de Doctorat, Univ. Clermont Ferrand, 336p.
- Cloud, P. E. & Dardenne, M. A. 1973. Proterozoic age of the Bambuí Groupe in Brazil. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.84, p. 1673 - 1676.
- Coomer, P.G. & Robinson, B.W. 1976. Sulphur and Sulphate-oxygen Isotopes and the Origin of the Silvermines Deposits, Ireland. *Mineralium Deposita*, **11**:155-169.
- Couto, J. G. P; Cordani, U. G.; Kawashita, K.; Iyer, S. S.; Moraes, N.M.P. 1981. Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de

- Sr e Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, p. 5 - 16.
- Cunha, I. de A.; Misi, A., Babinski, M. 2001. Lead isotope signatures of galenas from Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. In: MISI, A. & TEIXEIRA, J. B. G. (org.) Proterozoic base metal deposits of Africa and South America. Contributions presented at the 1<sup>st</sup> Field Workshop, International Geological Correlation Programme 450, Belo Horizonte, CNPq/ UNESCO/IUGS, p. 45 – 47.
- Dardenne, M. A. & Freitas-SILVA, F. H. 1998. Modelos Genéticos dos depósitos de Pb–Zn nos Grupos Bambuí e Vazante. *Workshop Depósitos Minerais Brasileiros de Metais Base*, Salvador, CPGG-UFBA/ADIMB, p.86 - 93.
- Dardenne, M.A, 1979. *Les minéralisations plomb-zinc du Groupe Bambui et leur contexte géologique*. Thèse de Doct. Etat., Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), 275 p.
- 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: Congr. Bras. Geol., 40., *Resumos*, SBG, p. 26.
- Dardenne, M.A.; Schobbenhaus, C.S., 2001. *Metalogênese do Brasil*. Brasília, Editora UnB/CNPq. 392 p.
- Deller, Graham, CRU International, “Changing economics along the zinc supply chain”, anais do Congresso Lead&Zinc 2010, volume único.
- Freitas-SILVA, F. H & Dardenne, M. A. 1997. Pb/Pb isotopic patterns of galenas from Morro do Ouro (Parcatu Formation), MorroAgudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits. In: South-American Symposium on Isotope Geology, 1., Campos do Jordão, 1997. *Extended Abstracts*, p. 118-120.
- Ferreira, M.F. 2008. Circuito Alternativo para Flotação de Minério Willemítico. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Goldstein, J.I., et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis – A Textbook for Biologist, Materials Scientists and Geologist. 1992. Plenum Press. New York.
- Goodfellow, W.D; Lydon, J.W; Turner, R.J.W. 1993. Geology and Genesis of stratiform sediment-hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulphide deposits. In: Kirkhan, R.V; Sinclair, W.D; Thorpe, R.I; Duke, J.M (eds) *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canadá, *Special Paper*, v. 40, p.201-251.

- Henley, K. J. 1983. Ore-Dressing Mineralogy – A Review of Techniques Applications and Recent Developments. International Congress on Applied Mineralog, 1, ICAM'81. Johannesburg, Africa do Sul, 1981. Proceedings in Special Publication of Geological Society of South Africa, 7, p.175-200.
- Hitzman, M.W. 1995. Mineralization in the Irish Zn-Pb- (Ba-Ag) Orefield. *In*:Thompson, T.B.- Irish Carbonate-hosted Zn-Pb Deposits, Guidebook Series, **21**, Society of Economic Geologists.
- Hitzman, M.W.; Reynolds, N.; Sangster, D.F.; Allen, C.R.; Carman, C., 2003, Classification, Genesis, and Exploration Guides for Non-Sulfide Zinc Deposits. *Econ. Geol.*, **98**:685–714.
- Hodgson, C.J. & Lydon, J.W. 1977. Geological setting of some volcanogenic massive sulphide deposits and active hydrothermal systems: some implications for exploration.*CIM Bulletin*, **70**(786): 95-106.
- IBRAM. 2008. Relatório Produção de Minério Brasileira, p 165.
- Iyer, S. S; Hoefs, J; Krouse, H. R. 1992. Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil: Implications on Ore Genesis. *Economic Geology*, v. 87, n. 2, p. 437 - 443.
- Iyer, S. S; Krouse, H. P; Babinski, M. 1993. Isotope investigations on carbonate rocks hosted lead-zinc deposits from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil: Implications for ore genesis and prospect evaluation. In: Simpósio do Cráton do São Francisco, 2., Salvador, 1993. *Anais*. Salvador, SBG, p. 338-339.
- Iyer, S. S. 1984. A discussion on the lead isotope geochemistry of galenas from the Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 19, p. 132 - 137.
- Jacquin, J.P; Gateau, C; Remon, G. 1984. Développements de la Minéralogie Appliquée au Traitement des Minerais. Industries Minérale. Vo. 66 n 4, p 172-188.
- Jones, M.P. Applied Mineralogy – A Quantitative Approach. Graham & Trotman, London. 259p.1987.
- Klaus, W. & Large, D.E. 1980. Submarine-exalative Cu-Pb-Zn deposits: a discussion of their classification and metallogenesis. *Geologisches Jahrbuch*, ReiheD-Heft40: 13-58.

- Large, D.E. 1980. Geological parameters associated with sediment-hosted, submarine-exhalative lead-zinc Deposits: an empirical model for mineral exploration. *Geologisches Jahrbuch*, Reihe D-Heft 40: 59-129.
- Laznicka, P. 1988. Breccias and coarse fragmentites: petrology, environments, associations ores. *Developments in Economic Geology*, **25**. Elsevier Science Publishers. 832 p.
- Leach, D.L & Sangster, D.F. 1993. Mississippi Valley-type Lead-Zinc deposits *In*: Kirkham, R.V; Sinclair, W.D; Thorpe, R.I; Duke, J.M (eds) - Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada, *Special Paper*, **40**, p.289-314.
- Misi, A.; Tassinari, C. C. G.; Iyer S. S. (1997a) New isotope data from the Proterozoic lead-zinc (Ag) sediment-hosted sulfide deposits of Brazil: implications for their metallogenic evolution. *In*: South-American Symposium on Isotope Geology, 1., Campos do Jordão, 1997. *Extended Abstracts*. Campos do Jordão, p. 201 - 203.
- Misi, A. 2010. Comparing metallogenic and phosphogenic events in the intracratonic and passive margin Proterozoic basins of the SF Craton: The Bambuí/Una and Vazante Groups. IV Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Mémoires [CD-ROM]
- Misi, A., 2001. Estratigrafia isotópica das seqüências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Idades e correlações. *In*: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Minerais*. SBG/MG, p. 67 – 92.
- Moeri, E. (1972) On a columnar stromatolite in the Precambrian Bambuí Group of Central Brazil. *Eclog. Geol. Helv.*, v. 65, p. 185 - 195.
- Monteiro, L.V.S., 1997. *Contribuição à gênese das mineralizações de Zn da Mina de Vazante, Vazante, MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Monteiro, L.V.S., 2002. *Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, IG - Universidade de São Paulo.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Spiro, B., Graça, R., Oliveira, T.F. de, 1999. The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil: Constraints on willemitic mineralization and fluid evolution. *Exploration Mining and Geology*, 8:21–42.

- 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.
- Monteiro, L.V.S.; Bettencourt, J.S.; Juliani, C.; Oliveira, T.F., 2007. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. *Gondwana Research*, 11:362-381.
- Neumann, R., Schneider, C.L., Alcover Neto, A., 2004. Caracterização Tecnológica de Minérios. In: Luz, A.B. da, Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M. de (Eds). Tratamento de Minérios. Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, pp. 55-111.
- Nunes, Samuel Ferreira, Geologo Votorantim Zinco, comunicação verbal
- Ohle, E.L. 1959. Some considerations in determining the origin of ore deposits of the Mississippi Valley type. *Economic Geology*, **54**(5): 769-789.
- Ohle, E.L. 1980. Some considerations in determining the origin of ore deposits of the Mississippi Valley type-Part II. *Economic Geology*, **75**: 161-172.
- Ohle, E.L. 1985. Breccias in Mississippi Valley- Type Deposits. *Economic Geology*, **80**, p. 1736-1752.
- Oliveira, T.F. de, 1998 As Minas de Vazante e de Morro Agudo. In: *Workshop Depósitos Minerais Brasileiros de Metais Base*, Salvador, CPGG-UFBA/ADIMB, p. 48 - 57.
- Pimentel, M.M.; Dardenne, M.A.; Fuck, R.A.; Viana, M.G.; Junges, S.L.; Fischel, D.P.; Seer, H.; 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.
- Pinho, J.M.M., 1990. *Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 115p.
- Qing, H. & Mountjoy, E.W. 1994. Origin of Dissolution vugs, caverns and breccias in the Middle Devonian Presqu'île Barrier, Host of Pine Point Mississippi Valley Type deposits. *Economic Geology*, **89**(4):858-976.

- Rigobello, A.E.; Branquinho, J.A.; Dantas, M.G. da S.; Oliveira, T.F.; Neves Filho, W., 1988. Mina de Zinco de Vazante. In: Shobbenhaus, C. & Coelho, C.E.S. (coords). *Principais depósitos minerais do Brasil*. DNPM, v.3, p. 101- 110
- Rouvier, H. 1971. Minéralisations plombo-zincifères et phénomène karstique Exemple tunisien: Le gisement du Djebel Hallouf. *Mineralium Deposita*, **6**:196-208.
- Russell, M.J., Solomon, M., Walsh, J.L. 1981. The genesis of sediment-hosted, exhalative zinc plus lead deposits. *Mineralium Deposita*, **16**:113-127.
- Samson, I.M. & Russell, M.J. 1987. Genesis of the Silvermines Zinc-Lead-barite Deposit, Ireland: Fluid Inclusion and Stable Isotope Evidence, *Economic Geology*, **82**: 371-394.
- Samson, I.M. & Russell, M.J. 1987. Genesis of the Silvermines Zinc-Lead-barite Deposit, Ireland: Fluid Inclusion and Stable Isotope Evidence, *Economic Geology*, **82**: 371-394.
- Sangster, D.F. 1988. Breccia-hosted lead-zinc deposits in carbonate rocks. In: James, N.P. & Choquette, P.W (eds). *Paleokarst*. Springer-Verlag. NY. Inc. p. 102-116.
- Sangster, D.F., 2003. A Special Issue Devoted to Nonsulfide Zinc Deposits: A New Look. *Econ. Geol.*, **98**:683-684.
- Sant'Agostinho, L.M; Khan, H. 1997. Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PMI/069, 29p.
- Sato, T. 1977. Los sulfuros masivos volcanogeneticos: su metalogenia y cladificacion. Dept. Geologia, Univ. Sonora, Publ. N°. 1, 54p.
- Silva, J.M. Caracterização Tecnológica. EEUFMG. Belo Horizonte, 1989.
- Silva, T.A.V. 2006. Estudos de Reagentes na Flotação de Minério de Zinco. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Souza, Adelson Dias, Gerente de Tecnologia de Votorantim Zinco, em email enviado em 31/01/2011, às 10horas.
- Taylor, S. 1984. Structural and paleotopographic controls of lead zinc mineralization in the Silvermines orebodies, Republic of Ireland. *Economic Geology*, **79**:529-548.
- Tschauder, R.J.; Landis, G.P.; Noyes, R.R. 1990<sup>a</sup>. Late Mississippian Karst Caves and Ba-Ag-Pb-Zn Mineralization in Central Colorado: Part I. Geologic Framework,

- mineralogy, and cave morphology. *Economic Geology, Monograph*, **7**: 308-338.
- Tschauder, R.J.; Landis, G.P.; Noyes, R.R. 1990b. Late Mississippian Karst Caves and Ba-Ag-Pb-Zn Mineralization in Central Colorado: Part II. Fluid inclusion, Stable Isotope, and Rock Geochemistry Data and a Model of Ore Deposition. *Economic Geology, Monograph*, **7**: 339-366.
- Votorantim Metais, 2007. Relatório de Dados Técnicos de Desenvolvimento de Processos MASA. Relatório Interno, 117p.
- Votoratim Metais, 2008. Relatório de Avaliação de Recursos. Relatório Interno, 72p.
- Votorantim Metais, 2009. Caracterização Tecnológica em Amostras de Minério de Silicatado de Zn. Relatório Interno, 117p.
- Wills, B.A. Mineral Processing Technology. Pergamon Press., 1988.