

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

JAMES SCHROEDER

CARACTERIZAÇÃO DE “CALAMINA” DA MINA DE VAZANTE-MG VIA EDS-EBSD

**CURITIBA
2017**

JAMES SCHROEDER

CARACTERIZAÇÃO DE “CALAMINA” DA MINA DE VAZANTE-MG VIA EDS-EBSD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa.Dra Bárbara Trzaskos

Co-orientador: Prof Dr Leonardo Lagoeiro

CURITIBA

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio desde sempre mesmo quando precisei morar longe de casa. Agradeço também a todos os mestres que fizeram parte da minha caminhada, todos tiveram sua contribuição, em especial a minha orientadora Profa. Dra. Bárbara Trzaskos que esteve sempre presente prestando auxílio inestimável de forma rápida eficiente tanto em questões relacionadas à geologia quanto para os assuntos mais diversos. Também ao co-orientador Prof. Dr. Leonardo Lagoeiro pelas discussões construtivas e pelo apoio com o método do EDS-EBSD, aos técnicos do LAMIR que auxiliaram com a preparação das amostras e com as análises de DRX e também aos técnicos da UFOP pelo auxílio com o embutimento das amostras.

Sem dúvida cabe aqui uma menção aos meus amigos e colegas por toda a ajuda, risadas e pela geologia ao longo desses anos na universidade, em especial aos integrantes da minha equipe de mapeamento Matheus Tonioti e Mauro Reese que por diversas vezes seguraram as pontas quando eu precisei me ausentar devido a atividades envolvendo o desenvolvimento desta monografia.

O desenvolvimento do presente trabalho só foi possível graças ao apoio e empenho de toda a equipe de escritório, galpão e campo da Nexa Resources (financiadora do projeto) e WCA Brasil, em especial ao geólogo Edgar Sanches que me convidou para desenvolver o projeto e prestou auxílios valiosos durante todas as etapas do trabalho e também ao geólogo Luiz Guilherme Correia por todo apoio.

Para todos que de alguma maneira contribuíram para realização desse trabalho, deixo aqui meu muito obrigado !

RESUMO

O depósito de Vazante compreende o maior depósito de zinco não sulfetado da Faixa de dobramentos Brasília. Nos arredores da mina de Vazante ocorrem depósitos de calamina, termo genérico utilizado para designar distintos grupos de minerais de zinco, distinguidos entre si apenas por análises químicas. O minério calamina inclui carbonatos como smithsonita e hidrozincita, silicatos como hemimorfita e sauconita, além de argilominerais de zinco dos grupos da esmectita e illita. Neste trabalho foi realizada a análise integrada de dados de campo, descrição de testemunhos de sondagens, resultados analíticos, dados de EDS-EBSD e informações da bibliografia. Em campo e em testemunhos a calamina pode ser subdividida em três tipos de minério: argiloso, maciço e margoso. Dados de EDS-EBSD mostram cristais de willemita com bordas irregulares, deformados e orientados dispersos em meio a cristais menos deformados e bem formados de smithsonita e hemimorfita, indicando que a willemita é mais antiga e possível fonte de Zn para a smithsonita e hemimorfita. A presença de cristais deformados de smithsonita e hemimorfita pode indicar que o crescimento desses cristais se deu simultaneamente ao evento de metamorfismo das rochas encaixantes, em momento de baixa temperatura, porém com alguma tensão atuante. A cristalização da willemita é associada ao ambiente oxidante, em fase tardi tectônica (hipogênica/supergênica), na qual carbonatos de Zn foram deformados. Em imagens EBSD observam-se cristais indeformados de smithsonita, que podem estar associados a fase posterior, puramente supergênica, sem componentes deformacionais significativos. Faz-se necessária a expansão do número de amostras, de modo a garantir a representatividade destes resultados. Alguns dados nas amostras de smithsonita indeformada indicam contatos entre cristais em torno de 60°, que para o sistema cristalino trigonal são considerados geminados, mostrando crescimento preferencial relacionado a sua natureza intrínseca, sem influência de componentes deformacionais. Em geral a energia necessária para a desagregação destes cristais é maior. Todos esses fatores tem grande relevância no comportamento mecânico e químico do agregado policristalino, podendo influenciar nas etapas de beneficiamento do minério. A correlação dos resultados deste projeto com dados da literatura indicam que a gênese do minério pode estar relacionada com processos de *wall-rock replacement* e de preenchimento residual de carste. Os minérios maciço e margoso têm relação com *wall-rock replacement*, enquanto o minério argiloso parece ser proveniente da alteração dos outros dois tipos de minério, tendo relação com preenchimento residual de carste. Os resultados preliminares mostraram-se promissores permitindo diferenciar willemita e hemimorfita de maneira qualitativa, o que não ocorre em métodos quantitativos, pois os picos elementares destas fases são os mesmos. Recomendam-se estudos detalhados do Minério Argiloso, que, devido a sua composição, pode causar *slime coating* nas etapas de beneficiamento. Recomenda-se ainda estudar o comportamento hidrofóbico de minerais, característica identificada durante a preparação das amostras do minério margoso e em drusas. Dados de EDS-EBSD forneceram informações importantes para a futura alimentação da planta de beneficiamento do minério calamina, no entanto faz-se necessária a expansão do número de amostras e análises, de modo a garantir a representatividade do estudo.

Palavras chave: Vazante, DRX, EDS-EBSD, smithsonita.

ABSTRACT

The Vazante nonsulfide Zn deposit is the biggest of its kind at the Brasilia fold belt. In the surrounding areas of the Vazante mine occur deposits of calamine, which is a generic term used for a distinct group of Zn minerals that can be distinguished only through chemical analyses. The Calamine ore includes carbonates such as smithsonite and hydrozincite, silicates such as hemimorphite and sauconite in addition to Zn clay minerals from the group of smectite and illite. For the current work an integrated analysis of field data, borehole survey, analytical data, EDS-EBSD data and bibliography were carried out. In the field and in borehole survey the calamine can be subdivided in three types of ore: clayey, massive and marly. EDS-EBSD data showed willemite crystals with irregular borders, deformed and orientated within less deformed and well-formed smithsonite and hemimorphite crystals, indicating that the willemite is older and the possible source of Zn for the calamine minerals. The presence of deformed smithsonite and hemimorphite crystals can indicate that these crystals growth took place simultaneously with the metamorphic/deformational event that worked on the host-rocks, in a stage of low temperatures yet with some deformational component. The willemite crystallization is associated with an oxidizing setting, in a late-tectonic (hypogenic/supergenic), in which Zn carbonates were deformed. EBSD data shows undeformed smithsonite crystals that can be associated with a late and completely supergenic stage, without any deformational component, however, further investigation is required to assure the representativity of this study. Some of the data yielded in undeformed smithsonite crystals indicated grain boundary contacts preferentially around 60° , which can suggest perfect contacts for the trigonal system, showing that the growth of these crystals is related to its nature rather than some deformational process. Normally the necessary energy required in the detachment is bigger in crystals that present these kinds of contacts, in addition these crystals tend to be less reactive. All these factors are quite important in the chemical/mechanical behavior of the crystalline aggregate, and can affect the ore processing stages. The correlation of the results indicates that the three recognized ore types (clayey, massive and marly) have its genesis related, probably, with wall-rock replacement and residual karst-fill processes. The massive and marly ores would be preferentially related to wall-rock replacement, whereas the clayey ore would be preferentially related to residual and karst-fill process. The ore types do not occur isolated, e.g. clayey ore associated or as an alteration product of massive and calamine in marl ores. Although the EDS-EBSD analyses were carried out in only four samples, the results revealed to be promising, allowing to differentiate willemite from hemimorphite in a qualitative way, which do not occur in quantitative methods once the both minerals present the same elementary peaks. It is recommended detailed studies in the clayey ore, since its textural nature can cause "slime coating" in ore processing stages. It is also recommended to study the hydrophobic behavior that was observed during the samples preparation for DRX. Further EDS-EBSD data can provide important information for feeding the beneficiation plant with calamine ores, although more sample analysis is required in order to grant reliability to the study.

Keywords: Calamine, Vazante, DRX, EDS-EBSD, smithsonite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A) Mapa geológico da Faixa Brasília na porção aflorante do Grupo Vazante (Modificado de Neves, 2011); B) Seção geológica esquemática W – E interceptando a Mina Vazante, em vermelho os intervalos mineralizados (Modificado de Baia, 2013). ...9	9
Figura 2: Coluna estratigráfica esquemática, sem escala, do Grupo Vazante. (Modificado de Dardenne et al. 1998; Dardenne, 2000). 10	10
Figura 3: Modelos de formação de minério de Zn em sistemas carbonáticos. Com destaque em vermelho para os processos que provavelmente ocorrem para formação de calamina. Em A) substituição direta; B) “wallrock replacement”; C) Preenchimento residual de carste. (Modificado de Hitzman <i>et al.</i> , 2003). 11	11
Figura 4: Processo de preparação das argilas para análise por Difração de Raios X. A) Material pulverizado; B) Processo de decantação de argilas; C) Imagem das três lâminas confeccionadas para cada uma das amostras. 14	14
Figura 5: Esquema de funcionamento do MEV-EBSD. Modificado de Morales <i>et al.</i> (2007). 16	16
Figura 6: Grãos “A” e “B” com ângulo “ ” indicando como é calculada a <i>misorientation</i> de uma amostra. (Modificado de Mainprice 2012). 16	16
Figura 7: Rochas não mineralizadas encontradas no local de ocorrência de Calamina. A) Solo transportado; B) Solo saprolítico de metadolomito; C) Metadolomito cinza; D) Metadolomito rosa; E) Metamarga. 18	18
Figura 8: Afloramentos de calamina e vegetação de calaminácea. A) Direção do afloramento: N45W; B) Direção do afloramento: N35W. 19	19
Figura 9: Tipos de ocorrência do minério calamina. 19	19
Figura 10: Caixa de testemunho exemplificando a forma de ocorrência do minério argiloso. Caixas 3 e 4, profundidades de 8,15 a 11,15m. 20	20
Figura 11: Formas de ocorrência de minério maciço. A) Em brecha hidrotermal associada a willemita; B) Em drusas; C) Substituição em veios e cavidades. 21	21
Figura 12: Zoom dos cristais de calamina no Minério em Drusa. 22	22
Figura 13: Ocorrência de minério em drusa e rochas encaixantes. Caixas 08, 09 e 10. Profundidade de 18,20 a 26,70 m (minério). 22	22
Figura 14: Ocorrência de minério de substituição de veios e cavidades. Caixas 07 e 08. Profundidade de 23,35 a 24,40 m (minério). 23	23
Figura 15: Forma de ocorrência do minério margoso (metamarga com teores intermediários em cinza escuro, concentração de minério com teores elevados em cinza claro). 24	24
Figura 16: Ocorrência de minério margoso e minério argiloso associado a metamarga. Caixas 11, 12, 13 e 14. Profundidade de 30,40 a 47,50 m. 24	24
Figura 17: Modelo esquemático da geologia do local onde as amostras de calamina foram coletadas. 25	25
Figura 18: Minério maciço em drusa remanescente em meio a minério argiloso. 25	25
Figura 19: Amostras de minério maciço utilizadas para análises de DRX. Minério em drusas em A) e E); Minério de substituição de veios e cavidades em B), C) e D); Minério margoso em F). 26	26

Figura 20: Teores de Zn das amostras analisadas.....	28
Figura 21: Mapa de fases indicando presença de smithsonita e quartzo.	29
Figura 22: Mapa de contraste de bandas.	30
Figura 23: Mapa de Euler indicando orientação cristalográfica e ângulo de contato entre os cristais. Linhas em azul claro para contatos entre 50-70° e em vermelho para os demais ângulos.	30
Figura 24: Gráfico de “missorientation” para cristais de Smithsonita.....	31
Figura 25: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos.....	32
Figura 26: Mapa de fases indicando presença de smithsonita e quartzo.	33
Figura 27: Mapa de Euler.	33
Figura 28: Gráfico de missorientation para smithsonita.....	34
Figura 29: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos para smithsonita.	34
Figura 30: Mapa de fases indicando presença de smithsonita, willemita e hemimorfita.	36
Figura 31: Mapa de Euler.	36
Figura 32: Gráficos de missorientation em A) Smithsonita; B) Willemita; C: Hemimorfita	37
Figura 33: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos. Em A) hemimorfita; B) smithsonita.	38
Figura 34: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos de willemita.	39
Figura 35: Mapa de fases indicando presença de smithsonita.	40
Figura 36: Figura de polo inversa.	41
Figura 37: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos de smithsonita.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da análise de Difractometria de Raios X (DRX).....	27
Tabela 2: Relação de características dos minerais encontrados.....	27
Tabela 3: Minerais identificados com tratamento de argilas	28
Tabela 4: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD.....	32
Tabela 5: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD.....	35
Tabela 6: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD.....	39
Tabela 7: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD.....	42
Tabela 8: Tabela resumo das análises EDS-EBSD.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REVISÃO TEÓRICA.....	8
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
3.1	Difratometria de Raios-X (DRX) com tratamento de argilominerais	13
3.2	Espectrometria por dispersão de energia de Raios-X (EDS) e difração de elétrons retroespalhados (EBSD).....	14
4	RESULTADOS DE CAMPO E DESCRIÇÃO DE SONDAGENS	17
4.1	Rochas encaixantes.....	17
4.2	Distribuição do minério	18
4.3	Minério Argiloso	19
4.4	Minério Maciço	20
4.4.1	Minério em drusa	21
4.4.2	Minério em substituição de veios e cavidades	22
4.5	Minério Margoso.....	23
4.6	Geologia local.....	24
5	ANÁLISES DE DRX	26
6	ANÁLISES DE EDS-EBSD	28
6.1	Amostra CLD – 007 9.20	29
6.1.1	Comparação com DRX	32
6.2	Amostra CLD – 007 18.80	32
6.2.1	Comparação com DRX	35
6.3	Amostra CLD – 007 19.78	35
6.3.1	Comparação com DRX	39
6.4	Amostra CLD – 017 18.97	39
6.4.1	Comparação com DRX	42
7	DISCUSSÕES	42
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	46
9	REFERÊNCIAS	48
	ANEXO I: Difratogramas de DRX	51

1 INTRODUÇÃO

O termo “calamina” é utilizado genericamente como designação para distintos grupos de minerais de minério de zinco. Estes grupos incluem carbonatos como smithsonita e hidrozincita, silicatos como hemimorfita e sauconita, além de argilominerais de zinco dos grupos da esmectita e illita (Boni *et al.*, 2015), que são distinguidos entre si apenas por análises químicas. Tendo em vista que esses minerais podem ocorrer associados, e que calamina é um termo comum na indústria da mineração, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a calamina, de forma a compreender suas características, as relações inerentes a esses grupos de minerais e os processos envolvidos na sua gênese.

Este projeto foi desenvolvido em área de exploração de zinco da empresa Nexa Resources, antiga Votorantim Metais, nos arredores da Mina de Vazante, município de Vazante – MG. Para a caracterização da calamina foram utilizadas técnicas clássicas de campo e descrições de testemunhos de sondagens complementadas por técnicas analíticas, como difração de raios X (DRX), EDS (*Energy-dispersive spectrometers*) e o *Electron Backscatter Diffraction* (EBSD) ou difração de elétrons retroespalhados, de uso inédito para calamina. As técnicas de EDS-EBSD, utilizadas em conjunto, proporcionam a análise e detecção mineralógica com margem de erro mínima.

Atualmente na literatura encontram-se diversos trabalhos sobre depósitos de zinco sulfetados (e.g. Hitzman & Beaty (1996), Sangster (1990), Leach (*et al.* 2001)), existe, porém número menor de trabalhos que tratam sobre os depósitos de zinco não-sulfetados e seus minerais de minério (e.g Nuspl (2009), Oliveira (2013), Boni (*et al.*, 2003) Hitzman (*et al.*, 2003) e Boni (*et al.*, 2015)), como é o caso da Mina de Vazante. Isso se deve ao fato de que durante muito tempo o beneficiamento do minério não-sulfetado era difícil e dessa forma, não econômico (Nuspl, 2009). Com o desenvolvimento de novas técnicas de beneficiamento (geometalurgia), os minérios não-sulfetados passaram a ter grande interesse econômico, uma vez que podem apresentar teores elevados de Zn (~45%) (Nuspl, 2009) O depósito não-sulfetado de Vazante é composto por silicatos, óxidos e carbonatos de Zn. A região é hoje a maior produtora de Zn do Brasil, além de ter o maior depósito willemítico do mundo, com aproximadamente 60Mton@20%Zn (Oliveira, 2013).

Dessa maneira é importante compreender as características da calamina, minério de grande potencial na Mina de Vazante, para que seja possível aproveitar, no futuro, o máximo esses minerais e com custos de beneficiamento mais baixos.

2 REVISÃO TEÓRICA

O depósito de Vazante, localizado no município de Vazante – MG, está contido na Província Tocantins, mais especificamente na faixa de dobramentos Brasília (Almeida, 1967), estando inserido em complexo sistema de *Nappes* e falhas de empurrão, com vergência para o Cráton São Francisco (Dardenne, 2000). Esse depósito faz parte do grupo Vazante, composto por rochas metassedimentares (Figura 1). Os minerais de minério encontram-se em rochas carbonáticas (metadolomitos) das Formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário (Dardenne, 2000).

O minério não-sulfetado de Vazante encontra-se dentro da Formação Serra do Poço Verde, no contato entre o Membro Morro do Pinheiro Superior e o Membro Pamplona Inferior (Dardenne, 2000), cortados pela Falha de Vazante. O Membro Morro do Pinheiro Superior é composto por metadolomito cinza com estromatólitos e feições de *bird-eyes*, enquanto que o Membro Pamplona Inferior é composto por metadolomito rosado com intercalações pelíticas (metamarga e filito cinza). A coluna estratigráfica do Grupo Vazante é apresentada na Figura 2. A Falha de Vazante se estende por aproximadamente 12Km com atitude média N50E/60NW e geometria anastomosada, interpretada como falha transcorrente sinistral inversa, que teria sido reativada como falha normal no final do Brasileiro (Pinho *et al.*, 1990).

Ainda existem divergências quanto ao ambiente de deposição dos sedimentos que compõem o Grupo Vazante. Os dois possíveis ambientes de deposição reconhecidos na literatura são o sistema de margem passiva (Campos Neto, 1984; Almeida, 1993; Fuck 1994 *apud* Monteiro 2002) ou a depressão formada no *front* do sistema de empurrões (*foreland*) (Dardenne *et al.*, 1998).

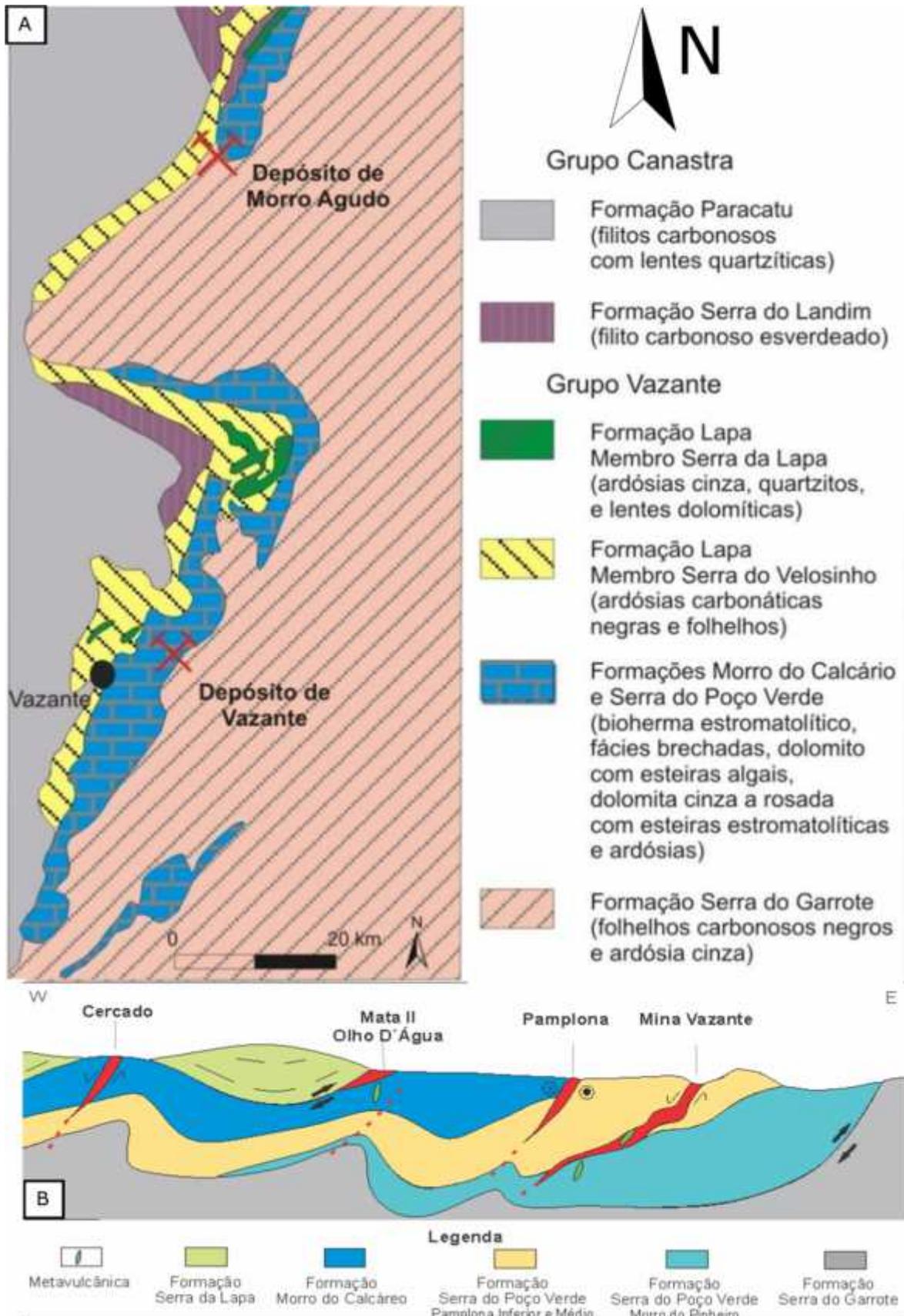


Figura 1: A) Mapa geológico da Faixa Brasília na porção aflorante do Grupo Vazante (Modificado de Neves, 2011); B) Seção geológica esquemática W – E interceptando a Mina Vazante, em vermelho os intervalos mineralizados (Modificado de Baia, 2013).

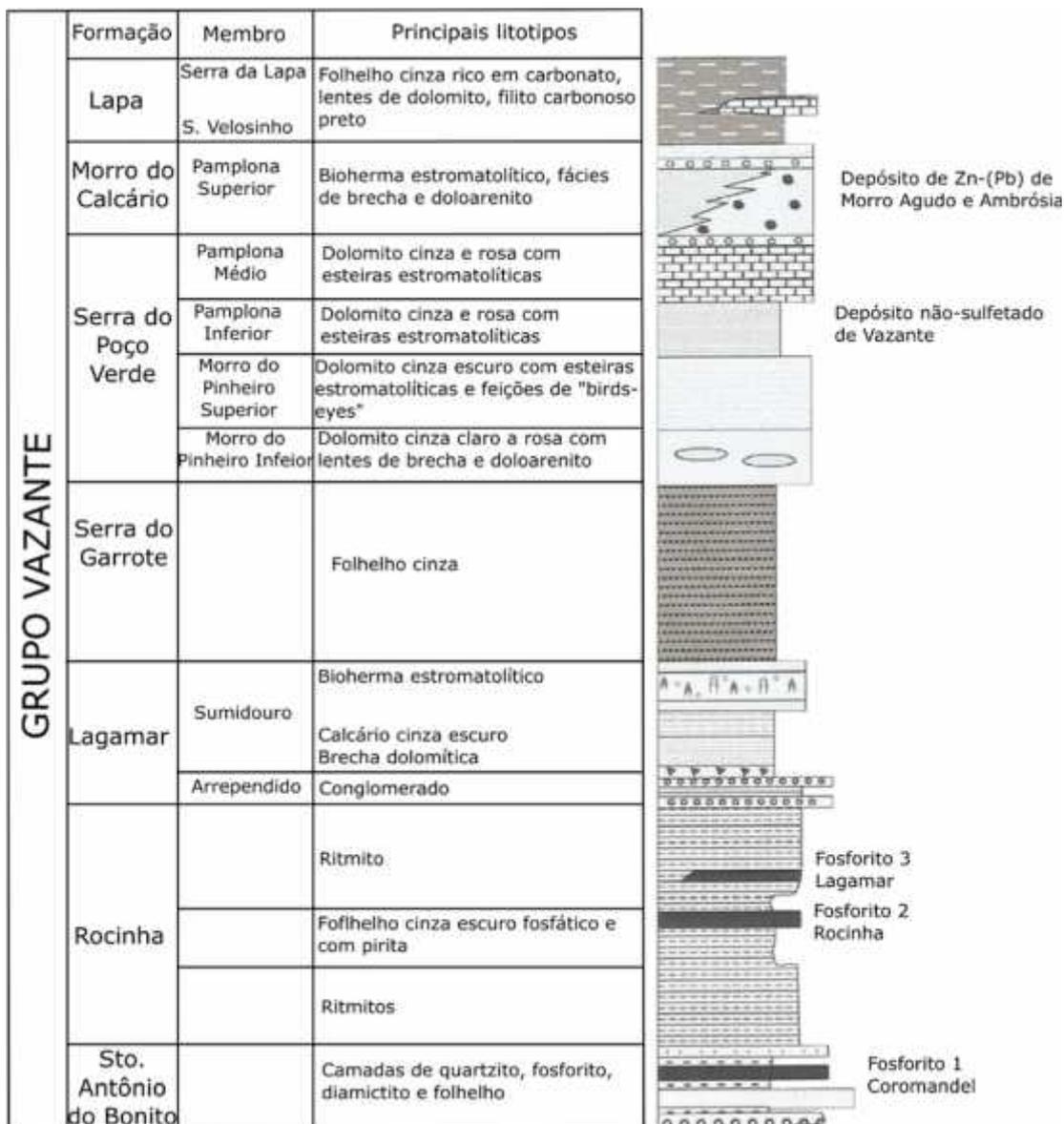


Figura 2: Coluna estratigráfica esquemática, sem escala, do Grupo Vazante. (Modificado de Dardenne et al. 1998; Dardenne, 2000).

O depósito de Vazante faz parte dos depósitos de zinco não-sulfetados que são controlados por zonas de falha (Boni *et al.*, 2003), associados a circulação de fluidos de origem hidrotermal (hipogênicos). Segundo Hitzman (*et al.*, 2003) estes depósitos estão associados a fluidos pouco sulfetados e com altas concentrações de oxigênio. Segundo Boni (*et al.*, 2015) os processos de geração de depósitos não-sulfetados ocorrem normalmente a partir de depósitos sulfetados, tendo como protólitos depósitos dos tipos MVT e SEDEX.

De acordo com Monteiro (*et al.*, 2006) estes depósitos hipogênicos consistem predominantemente de silicatos anidros de zinco e óxidos como a willemita, zincita,

franklinita e outros minerais, podendo estar associados localmente com quantidades variáveis de sulfetos. As concentrações econômicas mais importantes desse tipo são os depósitos de Vazante, em carbonatos proterozoicos. O minério de calamina, que é mineral secundário, provém de processos supergênicos, da alteração da willemita e eventualmente de sulfetos de Zn (Monteiro, 2002).

Segundo Hitzman (*et al.*, 2003) o depósito de willemita de Vazante é hipogênico e tem sua formação relacionada a estruturas (Falha de Vazante), no entanto, feições observadas em campo, como afloramentos com concentração supergênica e observações de estruturas de brechas de colapso e de preenchimento, levam a crer que a calamina tem relação com preenchimento residual de carste e substituição da rocha encaixante (*wall-rock replacement*) conforme Figura 3.

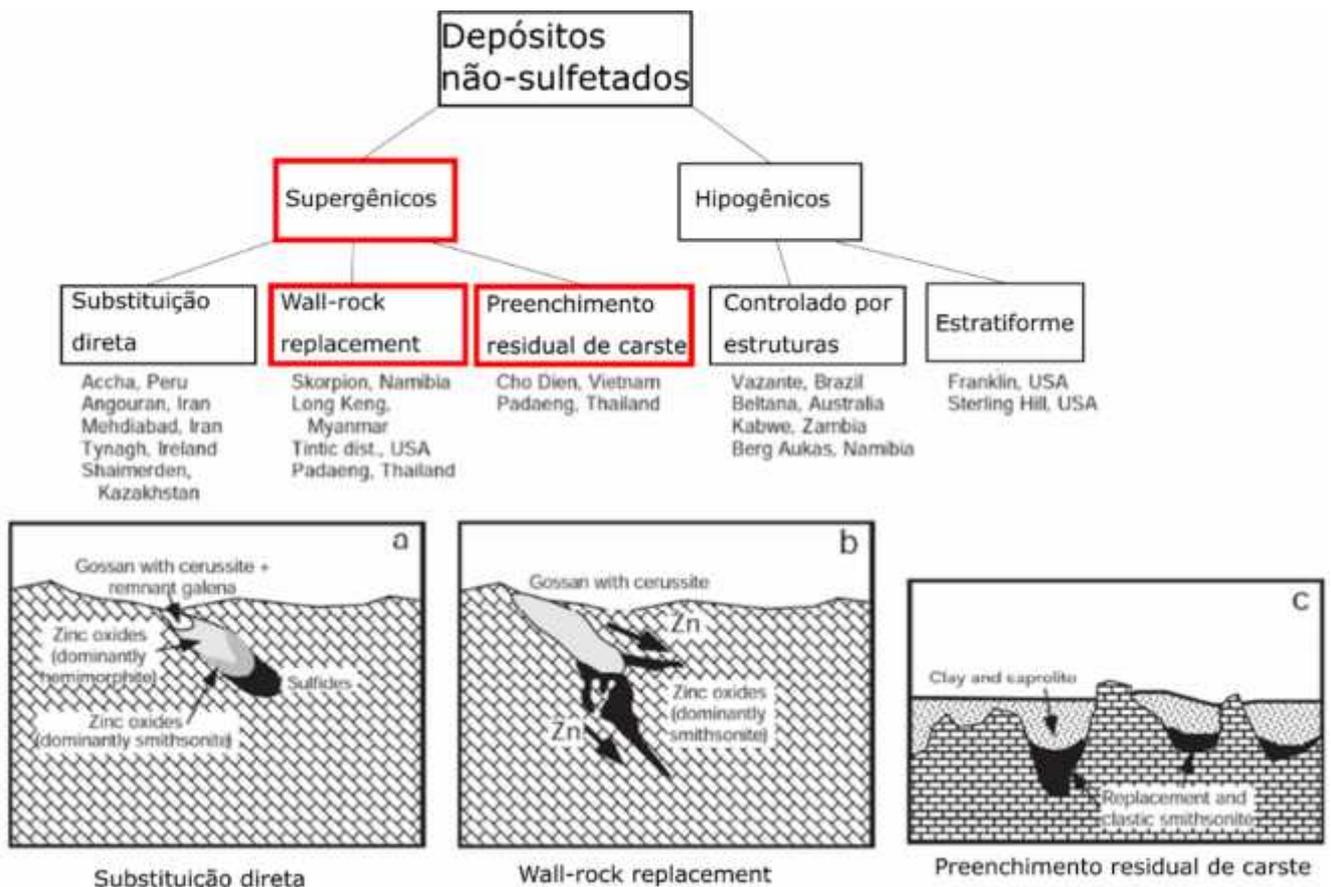


Figura 3: Modelos de formação de minério de Zn em sistemas carbonáticos. Com destaque em vermelho para os processos que provavelmente ocorrem para formação de calamina. Em A) substituição direta; B) “wallrock replacement”; C) Preenchimento residual de carste. (Modificado de Hitzman *et al.*, 2003).

Os depósitos não-sulfetados mais recentes encontram-se espalhados pelo mundo em latitudes entre 15° e 45° (Hitzman *et al.*, 2003), indicando dessa forma intemperismo climático específico (quente e úmido, com períodos de seca). Estudos com isótopos estáveis da maioria dos depósitos não-sulfetados mostram que os minerais carbonáticos de zinco, como a smithsonita, são formados em temperaturas baixas e restritas, sendo elas 20° ± 6°C (Gilg *et al.*, 2008). Características estas semelhantes as citadas nas mineralizações de Quesnel Lake District no Canadá (Paradis *et al.*, 2016), no depósito de Mina Grande no distrito de Bongará, Peru (Arfe *et al.*, 2017) e no depósito de Skorpion no sul da Namíbia (Kärner & Borg 2002).

Até o início do século 20 a produção de Zn era focada em minerais não sulfetados, como por exemplo a calamina. Com o desenvolvimento de novas tecnologias como o forno Waelz no final do século 19, foi possível fundir e refinar concentrados de sulfetos de Zn, de forma que a maior parte da produção de zinco passou a ser produto de depósitos sulfetados de esfalerita (Hitzman *et al.* 2003; Gilg *et al.* 2008). As técnicas de calcinação e geometalurgia utilizadas para a extração de Zn a partir de depósitos sulfetados requerem muita energia e geram resíduos que podem ser nocivos ao meio ambiente (Hitzman *et al.* 2003; Gilg *et al.* 2008). Os depósitos não-sulfetados contêm carbonatos ou silicatos que são facilmente dissolvidos por ácido sulfúrico gerando gipso como subproduto, que não é tóxico (Gnoinski, 2007). Após esse processo zinco praticamente puro pode ser extraído através do processo de eletrólise. Recentes avanços em processos geometalúrgicos como lixiviação ácida e extração por solventes proporcionaram uma nova oportunidade comercial para o minério não-sulfetado (Hitzman *et al.* 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo foram realizadas visitas de campo ao depósito de calamina para visualização da geometria, orientação e composição do minério. Também foram descritos 15 furos de sondagem diamantada, totalizando 1000 m de testemunhos, onde foram coletadas amostras para o estudo de caracterização, além de 1.100 m de sondagens rotopercussivas, analisando os fragmentos recuperados (amostras de “chip”).

Para a caracterização da calamina foram coletadas seis (06) amostras de diferentes tipos de calamina, nas quais foram aplicadas as técnicas de Difração de Raios X (DRX) com tratamento de argilas; EBSD-EDS para observação da forma, relações químicas, de contato entre os minerais e distribuição espacial e estruturas presentes nas amostras.

3.1 Difractometria de Raios-X (DRX) com tratamento de argilominerais

A análise por difração de raios X se baseia no processo de emissão de um feixe de raios X aplicado sobre a amostra de rocha pulverizada. Após a colisão com a amostra a trajetória dos raios X muda, sendo dispersa pelos elétrons dos átomos componentes da amostra. Neste processo o comprimento de onda da radiação incidente é mantido (Kahn, 2016). A identificação dos minerais ocorre por meio da comparação de seu difratograma com padrões de referência, disponíveis no banco de dados de DRX do Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia, UFPR. O equipamento utilizado foi o difratômetro de raios X da PANALYTICAL, modelo Empyrean, com detector X'Celerator com leituras de radiação CuK (40 Kv, 30 mA, *step size* de 0.02°), faixas de varredura de $3,0$ a 70° para pó total e $3,0$ a 30° para o tratamento dos argilominerais. O software X'pert High Score Plus foi utilizado para comparar os picos obtidos nos difratogramas das amostras com os picos dos padrões. Os minerais que melhor representaram os picos foram selecionados manualmente, sendo que a coincidência de valores, ou a quase coincidência, leva a identificação do mineral (Kahn, 2016).

Para a análise do pó total a amostra é seca em estufa (100° C) durante 24h. A amostra é quarteada individualizando 35 g, que são pulverizados em panela de tungstênio para, então, serem confeccionadas as pastilhas prensadas com material não orientado.

Para o tratamento dos argilominerais foram utilizados 10 g de amostras, que foram reduzidas para a fração argila (Figura 4A), e misturadas com 100 ml de água destilada e 0,1 g de sódio pirofosfato decahidratado. Essas soluções foram agitadas em provetas e deixadas para decantação pelo período de 2 horas (Figura 4B). Após esse período, parte das soluções foi utilizada para confeccionar três lâminas de cada amostra (Figura 4C). Uma das lâminas secou naturalmente ao ar, a segunda foi seca

na mufla a 550°C durante 2 h, e a terceira foi solvatada com etilenoglicol, adicionado em sua superfície, e deixada secar durante 4 h a fim de detectar argilas expansivas.

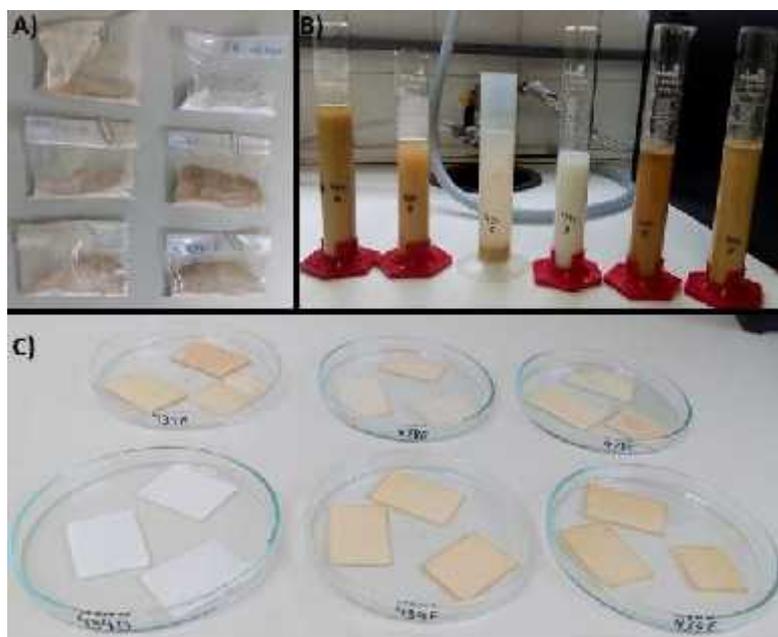


Figura 4: Processo de preparação das argilas para análise por Difração de Raios X. A) Material pulverizado; B) Processo de decantação de argilas; C) Imagem das três lâminas confeccionadas para cada uma das amostras.

As amostras “E” e “F”, apresentadas no Item 6, antes da etapa de decantação das argilas demonstraram comportamento hidrofóbico e precisaram ser desagregadas manualmente com bastão de vidro.

3.2 Espectrometria por dispersão de energia de Raios-X (EDS) e difração de elétrons retroespalhados (EBSD)

As amostras foram seccionadas no LAMIR em uma cortadeira de precisão, da marca Struers, modelo Secotom. Inicialmente cada amostra foi serrada em paralelepípedos de dimensão 2 cm de largura, 2 cm de comprimento por 1 cm de altura, para em seguida serem embutidas em resina de baixa viscosidade. Essas amostras foram desbastadas e polidas para uso em EDS e EBSD. O embutimento foi feito no Laboratório de Microscopia e Análise de Imagem (MICROLAB) na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Todo o material excedente foi guardado caso sejam necessários novos testes futuros.

Para o processamento dos dados do EBSD as fases minerais esperadas foram previamente carregadas no banco de dados do software. As fases minerais indicadas

foram aquelas identificadas nas análises de Difração de Raios-X (DRX) com tratamento de argilas, realizadas no LAMIR.

Os sistemas de EDS e EBSD encontram-se acoplados a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) por emissão de campo de resolução nanométrica. A técnica de difração de elétrons retroespalhados permite analisar a estrutura e orientação cristalográfica de minerais, além de possibilitar a diferenciação de minerais com mesma composição química, mas de diferente orientação cristalográfica (Microlab UFOP, 2017) A técnica consiste em colocar a amostra com superfície perfeitamente plana, inclinada à 20° (ou 70° com a horizontal) do feixe de elétrons incidente, proveniente do sistema de MEV (Morales *et al.* 2007) como pode ser observado na Figura 5. Os elétrons retroespalhados geram padrão de difração, que aparece na forma de raias (raias de Kikuchi), que pode ser visualizado em monitor de vídeo.

Em seguida, as orientações cristalográficas e dados referentes à qualidade dos padrões são armazenados e descritos, sempre tendo como base o referencial fixo. Partindo desse referencial as orientações são representadas como rotações sucessivas, no chamado Espaço de Euler (Morales 2006). A inclinação de banda mínima (*Band Contrast*) analisa a qualidade da imagem, de acordo com os gradientes de intensidade nas bordas das raias de Kikuchi (Morales *et al.* 2007). Para as análises deve ser definido ainda o espaçamento de aquisição de dados.

As informações de EBSD serão apresentadas em Mapas de Fase, Mapa de contraste de bandas, Mapa de Orientações (Mapas angulos de Euler e de figura de polo inversa), Gráfico de “*misorientation*” e figuras de polos de planos cristalográficos. Os mapas de fase utilizam como base as fases minerais previamente carregadas no banco de dados do programa de aquisição Azetec (Oxford-HKL), para então apresentar em forma de mapa onde os padrões foram reconhecidos, identificando a distribuição de cada fase mineral. O mapa de Euler consiste na representação da distribuição espacial das orientações cristalográficas utilizando códigos de cores (RGB). Os estereogramas de polos consistem na representação de planos cristalográficos através de seus polos, a partir do sistema de coordenadas conhecido da amostra, podendo indicar orientações cristalográficas preferenciais em determinados planos cristalográficos.

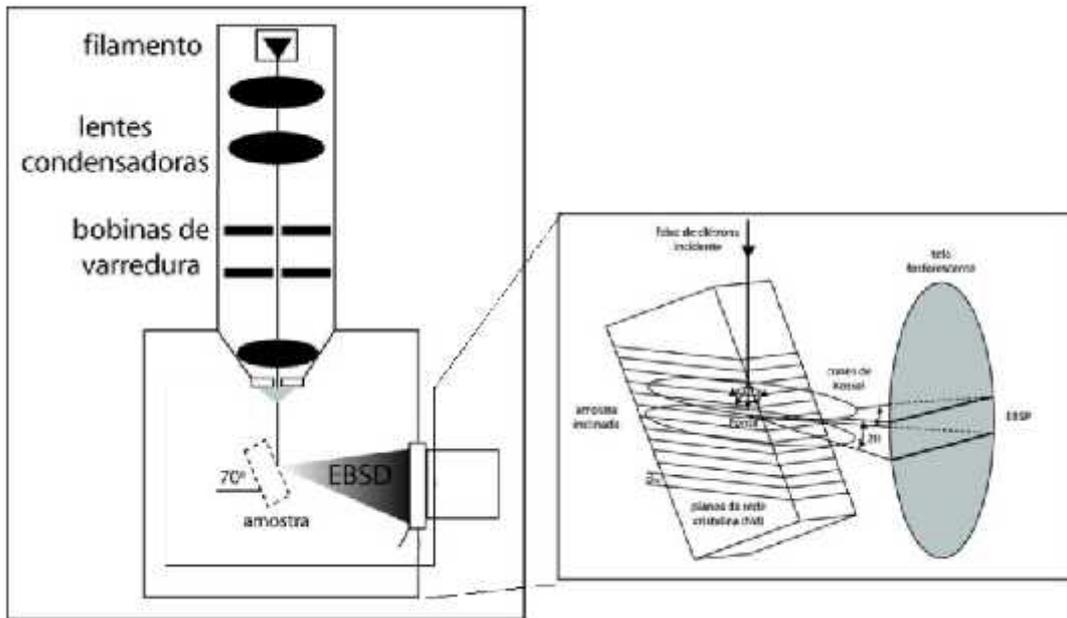


Figura 5: Esquema de funcionamento do MEV-EBSD. Modificado de Morales *et al.* (2007).

O termo *misorientation* é utilizado para definir o ângulo necessário para que um retículo deva ser rotacionado para uma total coincidência entre pares de cristais, estejam eles em contato um com o outro (correlacionados) ou não (pares aleatórios ou não correlacionados) (Figura 06).

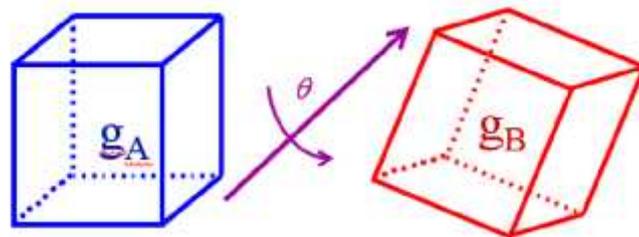


Figura 6: Grãos "A" e "B" com ângulo " θ " indicando como é calculada a *misorientation* de uma amostra. (Modificado de Mainprice 2012).

Acoplado junto ao EBSD, o EDS é um espectrômetro que determina a composição química dos minerais. Há situações que minerais podem ter simetrias muito parecidas ou até iguais (isomorfos), mas apresentam composições químicas distintas. O uso combinado das duas técnicas permite a identificação mineral com a mínima margem de erro e também com acurácia para separar fases, permitindo assim a melhor caracterização mineral. Isso é de fundamental importância na análise de separação de minerais, facilitando a adequação da planta de beneficiamento nas etapas de moagem e flotação.

Talvez o maior desafio nas análises de EBSD e mesmo EDS seja a preparação das amostras. Como o EBSD é um método sensível a variações de relevo da superfície da amostra, esta tem que ser preparada para que a superfície a ser analisada fique perfeitamente plana. O desafio se torna ainda maior para casos de amostras porosas e friáveis. Nesse caso as mesmas requerem preparo especial onde a impregnação a vácuo torna-se imprescindível. Tanto para o EBS quando para o EBSD o polimento da amostra é de grande importância pois, imperfeições na superfície podem prejudicar a emissão dos sinais, e como as amostras de calamina são porosas e relativamente friáveis é indispensável que a amostra seja devidamente impregnada, permitindo assim o melhor polimento das amostras, além de evitar que materiais usados durante o polimento fiquem contidos em poros e defeitos na superfície da amostra.

4 RESULTADOS DE CAMPO E DESCRIÇÃO DE SONDAGENS

A seguir serão apresentados resultados e observações feitas em campo e através da descrição de testemunhos de sondagens.

4.1 Rochas encaixantes

As rochas encaixantes mais comuns encontradas, associadas ao minério de calamina, são predominantemente carbonáticas, compostas por metadolomitos e metamarga, além de solos. Na área são observados dois tipos de metadolomitos diferentes, e ambos são correlacionáveis ao membro Pamplona Inferior descrito por Dardenne (2000). Ocorrem filitos subordinadamente. As principais litologias estão descritas a seguir:

Solo transportado (Figura 7A) – Argiloso de cor vermelha ou castanho avermelhada, frequentemente contendo fragmentos de metamarga e metadolomito de até 2 cm, além de hematita. Ocorre normalmente em camadas superficiais, no entanto, pode ocorrer em profundidade associada a preenchimento de feições cársticas.

Solo saprolítico (Figura 7B) – Areno-argiloso de cor castanho claro proveniente da alteração tanto de metadolomito cinza quanto de metadolomito rosa. Ocorre necessariamente associado a metadolomitos, indiferente da profundidade.

Metadolomito cinza (Figura 7C) – Cinza, bandado ou maciço, pode apresentar veios de dolomita, calcita e em poucos casos ankerita. Pode estar associado com níveis de metamarga. Apresenta-se frequentemente fraturado ou brechado.

Metadolomito rosa (Figura 7D) – Rosa, bandado ou maciço, pode apresentar veios com indícios de ferrocarbonatação. Apresenta-se frequentemente fraturado ou brechado.

Metamarga (Figura 7E) – Cinza, normalmente bandada intercalando bandas milimétricas (cinza escuras) com maior teor de carbonato com bandas milimétricas (cinza claro) com maior teor de minerais siliciclásticos. Apresenta-se frequentemente fraturado ou brechada.

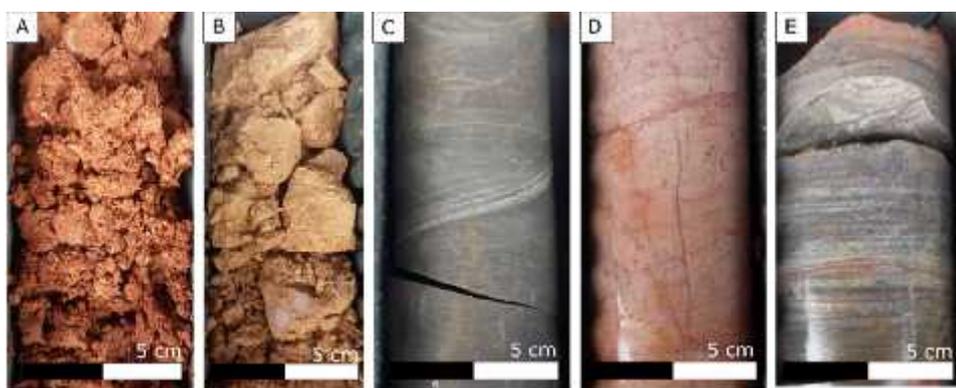


Figura 7: Rochas não mineralizadas encontradas no local de ocorrência de Calamina. A) Solo transportado; B) Solo saprolítico de metadolomito; C) Metadolomito cinza; D) Metadolomito rosa; E) Metamarga.

4.2 Distribuição do minério

A maior parte do minério ocorre em profundidades inferiores a 80 m, porém pode eventualmente ocorrer em profundidades maiores do que 100 m, sendo observados em testemunhos de furos de sondagem. Localmente podem ser observados próximos à superfície como camadas mais resistentes, formando pequenos ressaltos no relevo (Figura 8). Nesses locais, devido à alta concentração de Zn, a vegetação não se desenvolve normalmente, a única planta que costuma crescer é conhecida pelos moradores locais como “Calaminácea”, que é tolerante a altos teores registrados.



Figura 8: Afloramentos de calamina e vegetação de calaminácea. A) Direção do afloramento: N45W; B) Direção do afloramento: N35W.

O minério de Calamina, com teores mínimos de 5% Zn, obtidos por análise química por Espectrometria de Massa com Fonte de Plasma (ICP-MS), foi dividido, pelos geólogos do Projeto Calamina, em três grupos (Figura 9). A subdivisão foi elaborada utilizando como base as características macroscópicas como composição, textura, granulometria, porosidade, cor e dureza. Por vezes os tipos de minérios ocorrem associados, como trechos de minério de substituição em veios em cavidades que apresentam algumas drusas e encontram-se sobrepostos por minério argiloso.

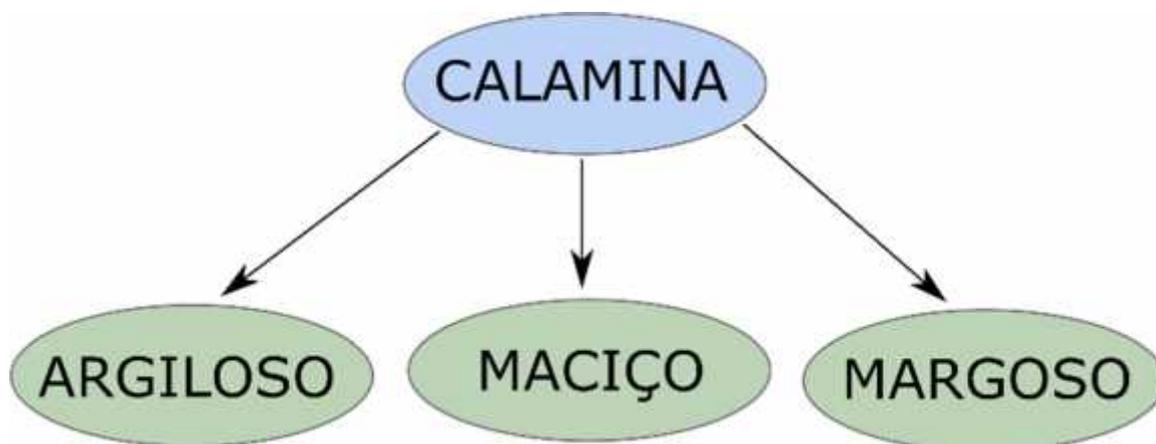


Figura 9: Tipos de ocorrência do minério calamina.

A seguir são descritas as características básicas relativas aos três tipos de minério.

4.3 Minério Argiloso

O minério argiloso (Figura 10) ocorre em solos, tanto em superfície quanto em subsuperfície, e está associado a cavidades. Possui textura argilosa, podendo ser

- Substituição em veios e cavidades por calamina ou na própria porosidade da rocha (Figura 11C);

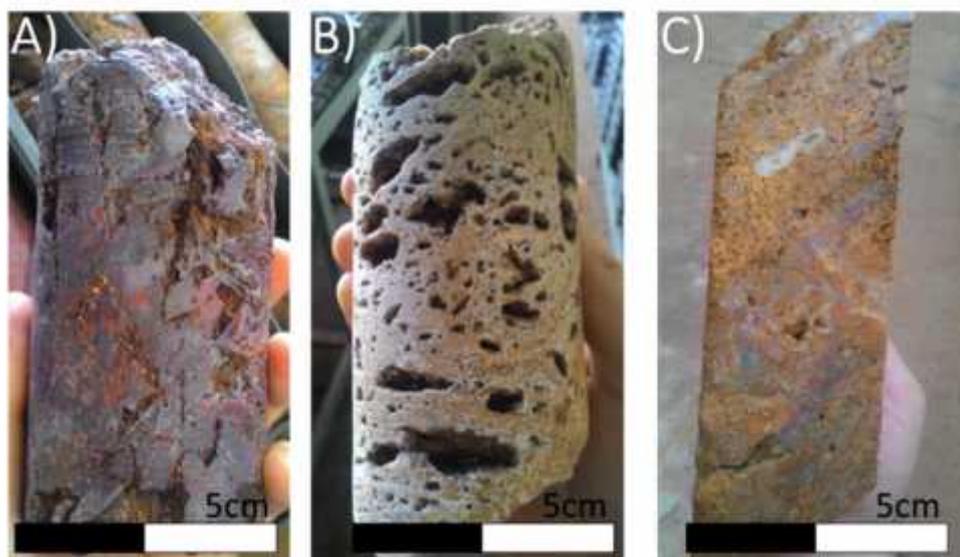


Figura 11: Formas de ocorrência de minério maciço. A) Em brecha hidrotermal associada a willemita; B) Em drusas; C) Substituição em veios e cavidades.

Como o objetivo é caracterizar a calamina, e o minério em brechas hidrotermais é associado a willemita, para as análises que seguem foram utilizadas amostras de minério maciço apenas em drusas e em substituição em veios e cavidades e margoso.

4.4.1 Minério em drusa

O minério em drusa, uma das subdivisões do minério maciço (Figura 11B), é formado quase que exclusivamente por calamina. O minério apresenta drusas irregulares com tamanhos de 1 mm a 6 cm e coloração que varia entre laranja, ocre e marrom claro. Essas drusas encontram-se preenchidas por cristais bem formados, milimétricos, com aspecto sacaroidal de calamina (Figura 12). A coloração marrom pode estar associada a presença de ferro na sua composição (minerals.net).



Figura 12: Zoom dos cristais de calamina no Minério em Drusa.

As amostras são normalmente muito porosas e moderadamente friáveis. Um exemplo da ocorrência do minério em drusa pode ser visto na Figura 13. Interpreta-se que esse tipo de minério tenha relação com enriquecimento supergênico, preenchimento residual de carste e *wall-rock replacement*.

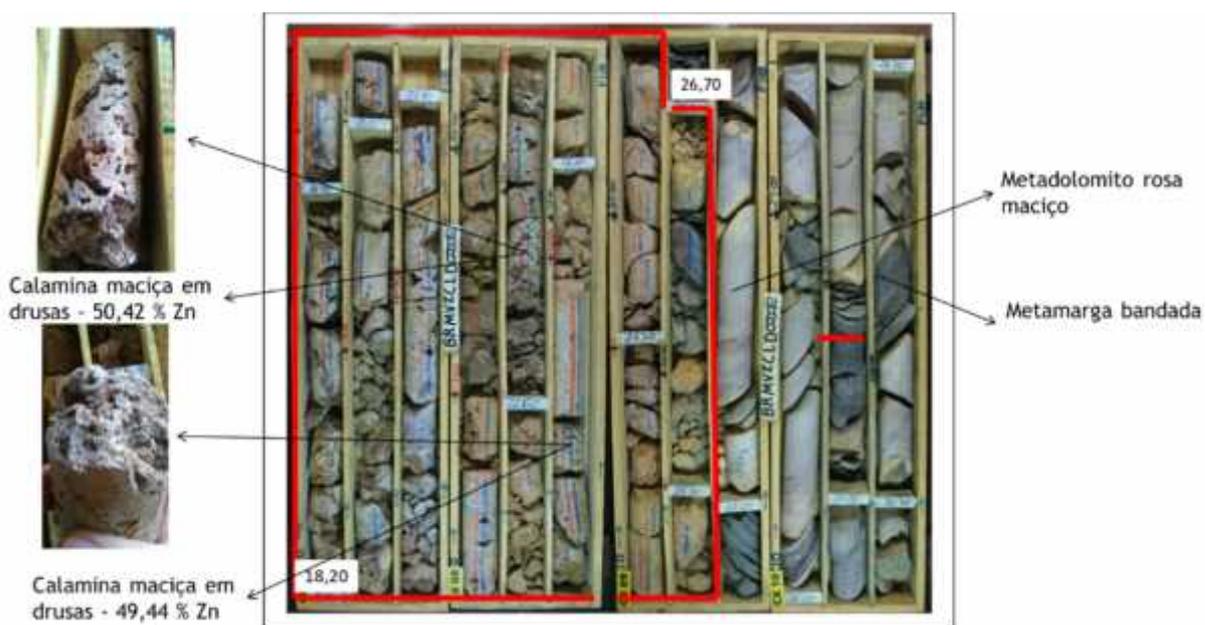


Figura 13: Ocorrência de minério em drusa e rochas encaixantes. Caixas 08, 09 e 10. Profundidade de 18,20 a 26,70 m (minério).

Esse tipo de minério pode ocorrer associado ao minério argiloso e em substituição de veios e cavidades.

4.4.2 Minério em substituição de veios e cavidades

Outra forma de ocorrência do minério maciço é a calamina microcristalina em substituição de veios e cavidades (Figura 11C), que se apresenta normalmente de cor

cinza ou alaranjada, pouco friável e porosa, porém menos porosa que o minério em drusas. Pode conter algumas feições que lembram metadolomito. Um exemplo da ocorrência desse tipo de minério pode ser visto na Figura 14. Esse tipo de minério pode ocorrer associado ao minério argiloso e em drusas.

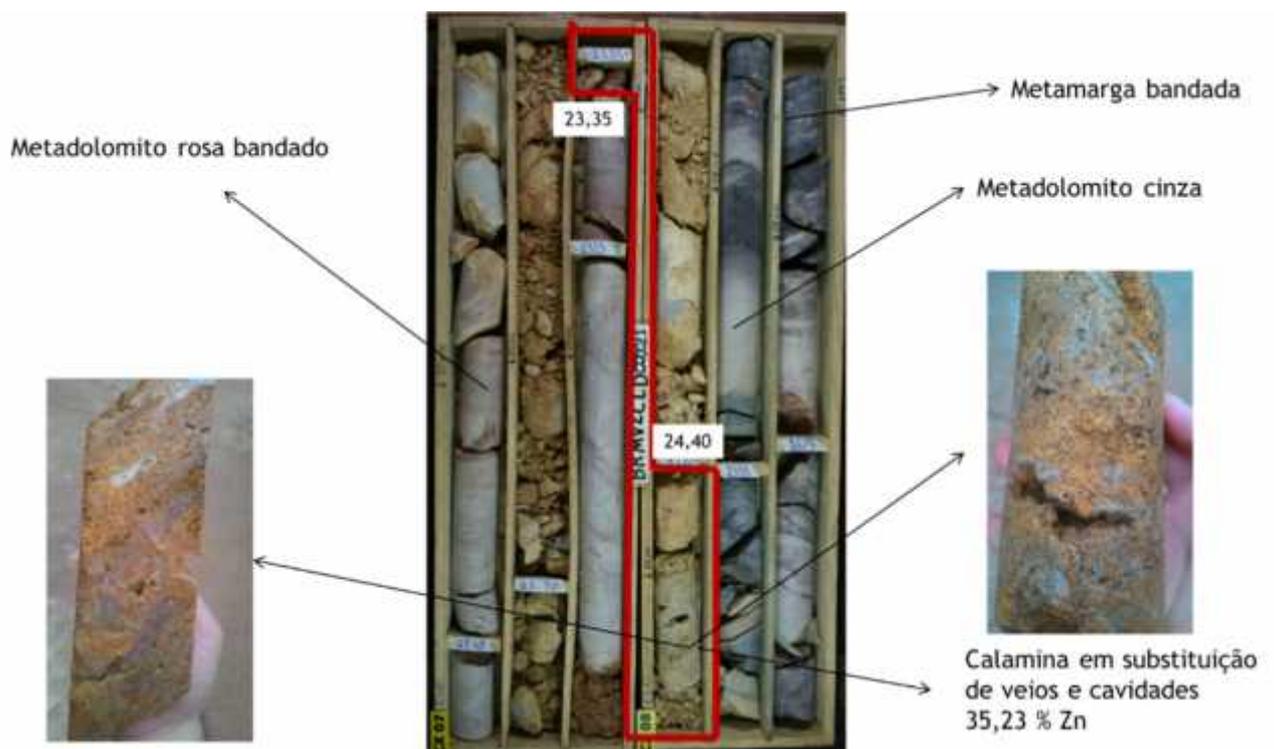


Figura 14: Ocorrência de minério de substituição de veios e cavidades. Caixas 07 e 08. Profundidade de 23,35 a 24,40 m (minério).

4.5 Minério Margoso

O minério margoso (Figuras 15 e 16), como o nome indica, está associado a metamarga de cor cinza e aparece preenchendo feições de dissolução, preferencialmente paralelas ao acamamento, podendo alcançar teores superiores a 40% Zn. Nesses casos a metamarga em cinza escuro não apresenta teores tão elevados de Zn (~10%), enquanto que as porções em cinza claro apresentam teores de até 40% Zn (Figura 9). Dentre os três tipos de minérios descritos, esse é o menos comum. Interpreta-se que esse minério seja proveniente do processo de *wall-rock replacement*. Pode ocorrer associado ao minério argiloso (Figura 16) e próximo ao minério maciço.



Figura 15: Forma de ocorrência do minério margoso (metamarga com teores intermediários em cinza escuro, concentração de minério com teores elevados em cinza claro).

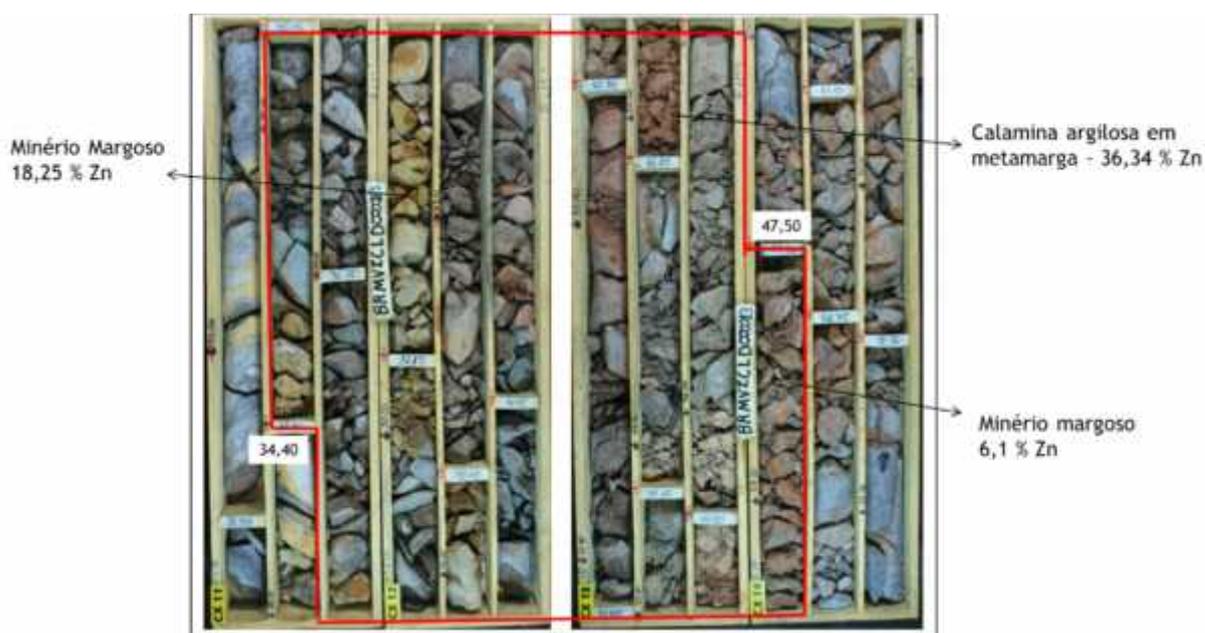


Figura 16: Ocorrência de minério margoso e minério argiloso associado a metamarga. Caixas 11, 12, 13 e 14. Profundidade de 30,40 a 47,50 m.

4.6 Geologia local

A associação de estruturas verticais, de direção NW-SE, que cortam o eixo NE da mineralização de willemita provavelmente facilitou a percolação, dissolução e formação de carste, gerando feições geomorfológicas conhecidas como bocainas, que nada mais são que zonas com perfil de alteração mais espesso do que as áreas adjacentes. Outro fator que influenciou a formação supergênica do minério foi o acamamento (S_0) das unidades metadolomíticas, que, com suas intercalações de

diferentes níveis de metamarga, permitiram, provavelmente, a dissolução e subsequente preenchimento de feições cársticas (Figura 17). No local onde foram coletadas as amostras, próximo ao município de Vazante-MG, é possível observar falhas de cavalgamento associadas a dobras de arrasto, ambas relacionadas as falhas regionais.

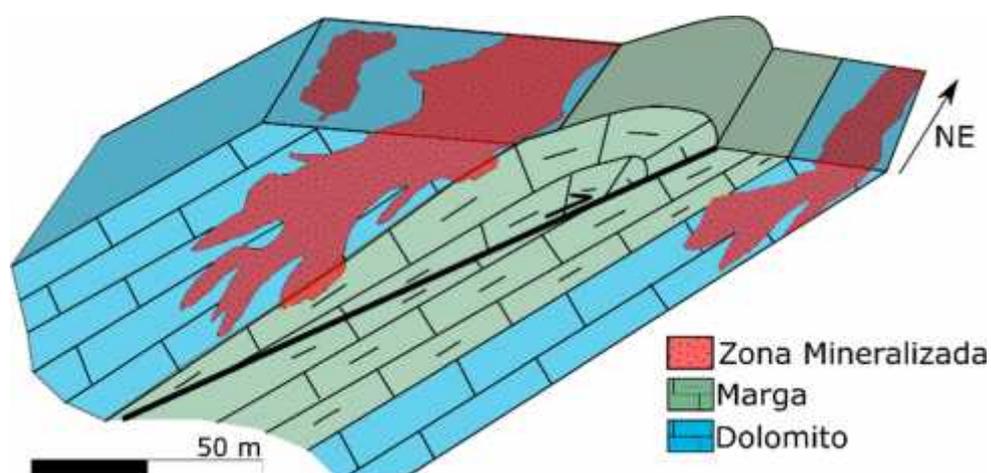


Figura 17: Modelo esquemático da geologia do local onde as amostras de calamina foram coletadas.

Por vezes os tipos de minérios ocorrem associados. Por exemplo minério maciço em drusas remanescente em meio a argiloso (Figura 18). Isso poderia explicar por que muitas vezes o minério argiloso apresenta cristais de calamina com aspecto sacaroidal. Essa associação indica que o minério argiloso é originário da alteração tanto de minério maciço quanto de minério margoso.

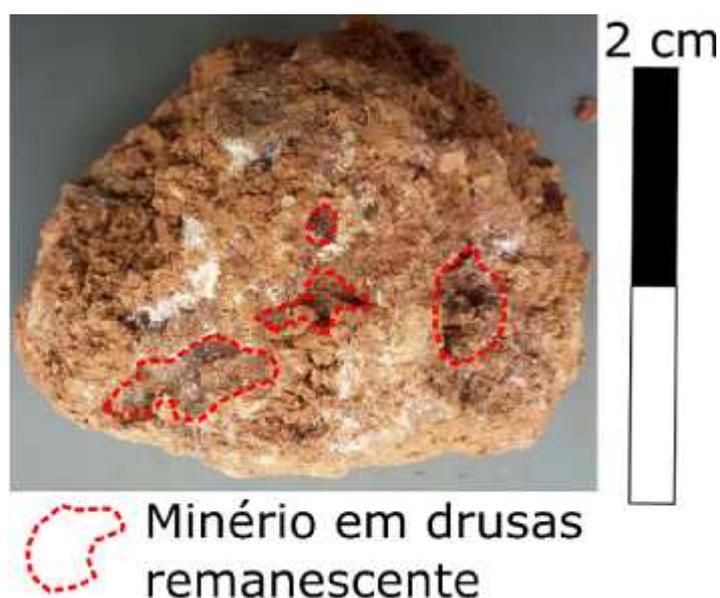


Figura 18: Minério maciço em drusa remanescente em meio a minério argiloso.

5 ANÁLISES DE DRX

Para as análises de DRX com tratamento de argilas foram utilizadas 6 amostras de minério maciço (Figura 19), das quais 4 foram selecionadas para as análises de EDS-EBSD.

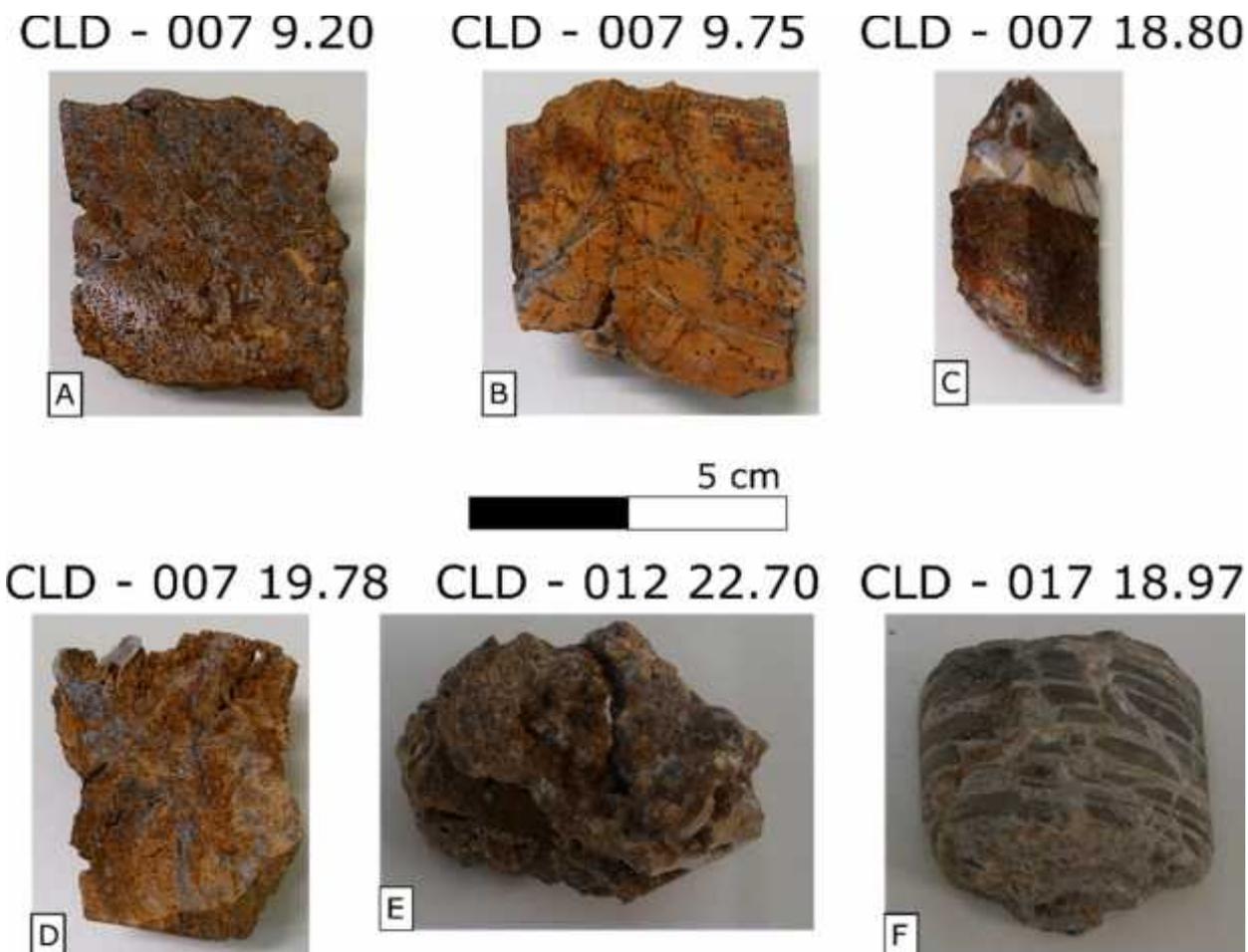


Figura 19: Amostras de minério maciço utilizadas para análises de DRX. Minério em drusas em A) e E); Minério de substituição de veios e cavidades em B), C) e D); Minério margoso em F).

Os difratogramas das seis amostras analisadas (Anexo 1) evidenciam que o minério calamina é composto por hemimorfita, smithsonita, quartzo, magnesita (?), saponita (?) e volkonskoita (?) (Tabela 1). A identificação de volkonskoita, saponita e magnesita se deu com certo grau de incerteza, portanto a indicação “(?)”. Os resultados mineralógicos obtidos através do “pó total” organizados por tipos de minérios, podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados da análise de Difractometria de Raios X (DRX)

Nexa	Tipo de minério	Minerais Identificados
CLD - 007 9,20	Em drusas	Smithsonita, Magnesita (?)
CLD - 012 22,70	Em drusas	Hemimorfita, Smithsonita, Quartzo
CLD - 007 9,75	Substituição de veios e cavidades	Smithsonita, Quartzo, Magnesita (?), Saponita (?)
CLD - 007 18,80	Substituição de veios e cavidades	Hemimorfita, Quartzo, Smithsonita
CLD - 007 19,78	Substituição de veios e cavidades	Hemimorfita, Smithsonita, Quartzo, Magnesita (?)
CLD - 017 18,97	Minério margoso	Hemimorfita, Smithsonita, Quartzo, Magnesita (?), Volkonskoita (?)

Na Tabela 2 estão listadas as características referentes aos minerais que compõe a calamina e os minerais associados que foram identificados durante as análises de DRX.

Tabela 2: Relação de características dos minerais encontrados.

CALAMINA	Fórmula química	Densidade (g/cm ³)	Dureza (Escala de Mohs)	Sistema Cristalino	Impurezas comuns
Hemimorfita	Zn ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ · H ₂ O	3.475	4½ - 5	Ortorrômico	Cu, Fe
Smithsonita	ZnCO ₃	4.42 - 4.44	4 - 4½	Trigonal	Fe, Co, Cu, Mn, Ca, Cd, Mg, In
Outros Minerais	Fórmula química	Densidade (g/cm ³)	Dureza (Escala de Mohs)	Sistema Cristalino	Impurezas comuns
Quartzo	SiO ₂	2.65 - 2.66	7	Trigonal	H, Al, Li, Fe, Ti, Na, Mg, Ge, etc
Magnesita	MgCO ₃	2.98 - 3.02	3½ - 4½	Trigonal	Fe, Mn, Ca, Co, Ni, ORG
Saponita (?) (Grupo da esmectita)	Ca _{0.25} (Mg, Fe) ₃ ((Si, Al) ₄ O ₁₀)(OH) ₂ · nH ₂ O		1½ - 2	Monoclinico	Ti, Mn, Ni, K, P
Volkonskoita (?) (Grupo da esmectita)	Ca _{0.3} (Cr, Mg, Fe) ₂ ((Si, Al) ₄ O ₁₀)(OH) ₂ · 4H ₂ O	2.11 - 2.36	1 - 2	Monoclinico	Ti, Mn, Na, K, C, P
Informações retiradas de www.mindat.org					

A análise com tratamento de argilas permitiu a identificação dos argilominerais, os resultados organizados por tipo de minério são apresentados na Tabela 3. Foi possível observar que cristais de hemimorfita estão presentes na fração argila.

Tabela 3: Minerais identificados com tratamento de argilas

Nexa	Tipo de minério	Minerais Identificados
CLD - 007 9,20	Em drusas	Ilita
CLD - 012 22,70	Em drusas	Esmectita
CLD - 007 9,75	Substituição de veios e cavidades	Caulinita
CLD - 007 18,80	Substituição de veios e cavidades	Esmectita
CLD - 007 19,78	Substituição de veios e cavidades	Ilita
CLD - 017 18,97	Minério margoso	Esmectita, Ilita, Caulinita

Na análise de pó total foi identificada volkonskoita, mineral pertencente ao grupo da esmectita, concordando dessa maneira com os resultados obtidos com o tratamento de argilominerais, entretanto, a identificação de saponita não foi confirmada. Nota-se que o minério margoso é o que apresenta a maior variação no conteúdo de argilominerais.

Os teores de Zn, obtidos por ICP-MS pela Nexa, das amostras analisadas neste estudo encontram-se sintetizados na Figura 20.

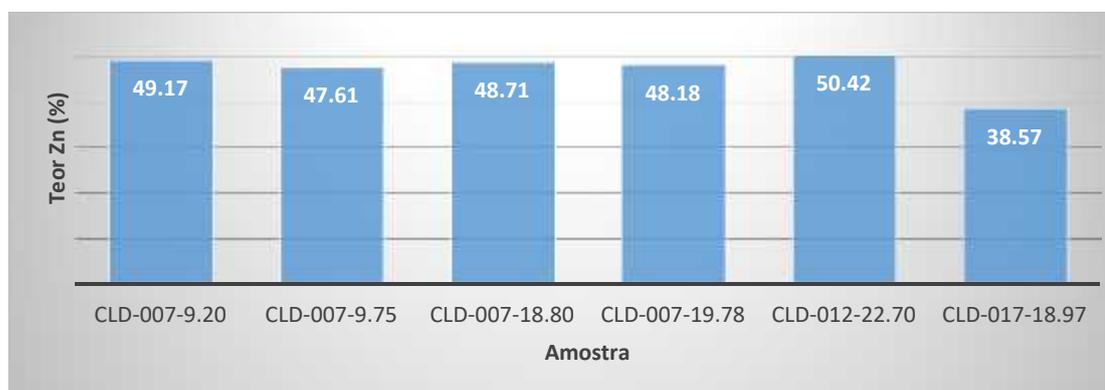


Figura 20: Teores de Zn das amostras analisadas.

6 ANÁLISES DE EDS-EBSD

Foram fornecidas, pela Nexa Resources seis amostras do minério de calamina das quais devido às dificuldades para embutimento e polimento do minério argiloso, apenas três amostras do minério maciço e uma do minério margoso foram analisadas pelas técnicas de EDS-EBSD. Para as figuras a seguir, as partes sem registro (em preto) podem indicar locais com presença de argilominerais que, devido ao

espaçamento da aquisição de dados utilizado, não foram determinados. Podem ser ainda poros (vazios) ou defeitos da amostra, gerados durante o polimento da mesma. O fato das análises EDS-EBSD não apresentarem esses minerais não significa que eles não existam.

6.1 Amostra CLD – 007 9.20

Analisando o mapa de fases da amostra de minério em drusas, (Figura 21) nota-se composição predominante de cristais de smithsonita, localmente com pequenos cristais de quartzo.

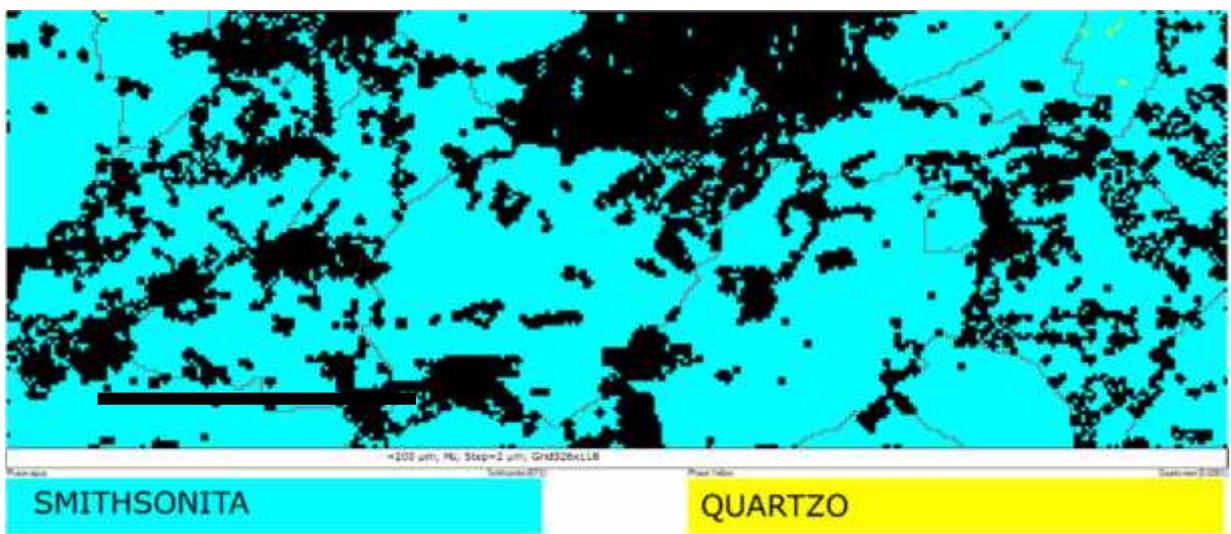


Figura 21: Mapa de fases indicando presença de smithsonita e quartzo.

No mapa de contraste de bandas (Figura 22) observa-se o limite entre os cristais mostrado pelas linhas vermelhas. Esse contraste de bandas gerado pode servir como indicador da qualidade dos dados obtidos, sendo os dados em tons de cinza claro de melhor qualidade do que os de tonalidade cinza escuro, enquanto que as porções pretas registram trechos sem ou com poucos registros.

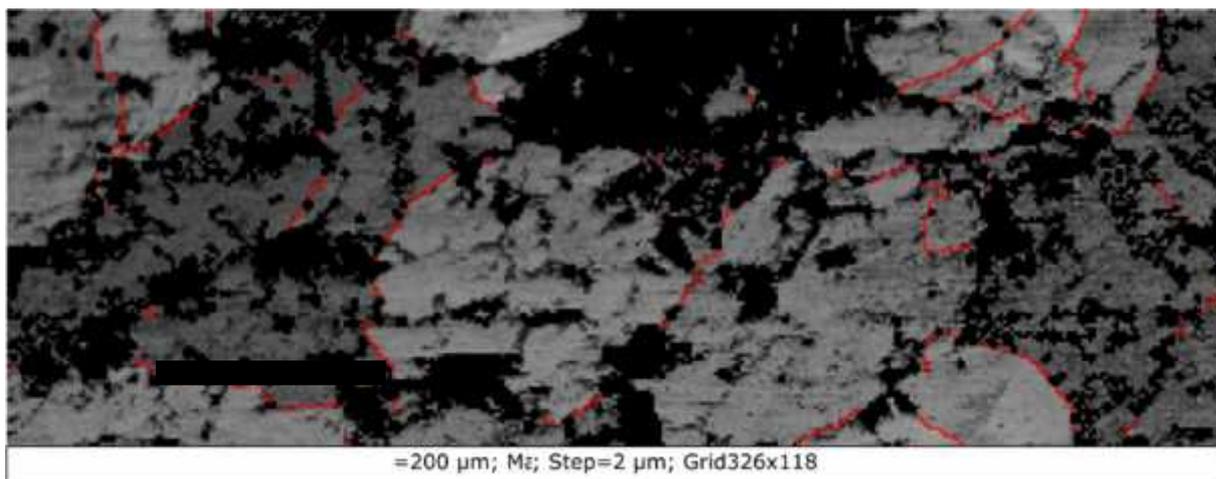


Figura 22: Mapa de contraste de bandas.

Os cristais de smithsonita apresentam grande variação em sua orientação cristalográfica, conforme observado no mapa de Euler (Figura 23). Os contatos geminados ou, praticamente geminados ($50 - 70^\circ$), dos cristais são registrados na figura pelas linhas em azul claro, os demais ângulos registrados de contato dos cristais são representados por linhas vermelhas. Os contatos entre os grãos com formatos irregulares, sem presença de feições como *bulging*, migração de limite de grãos, e ainda sem a presença de registros de extinção ondulante e rotação de subgrão, demonstram que esses cristais não passaram por deformações significativas.

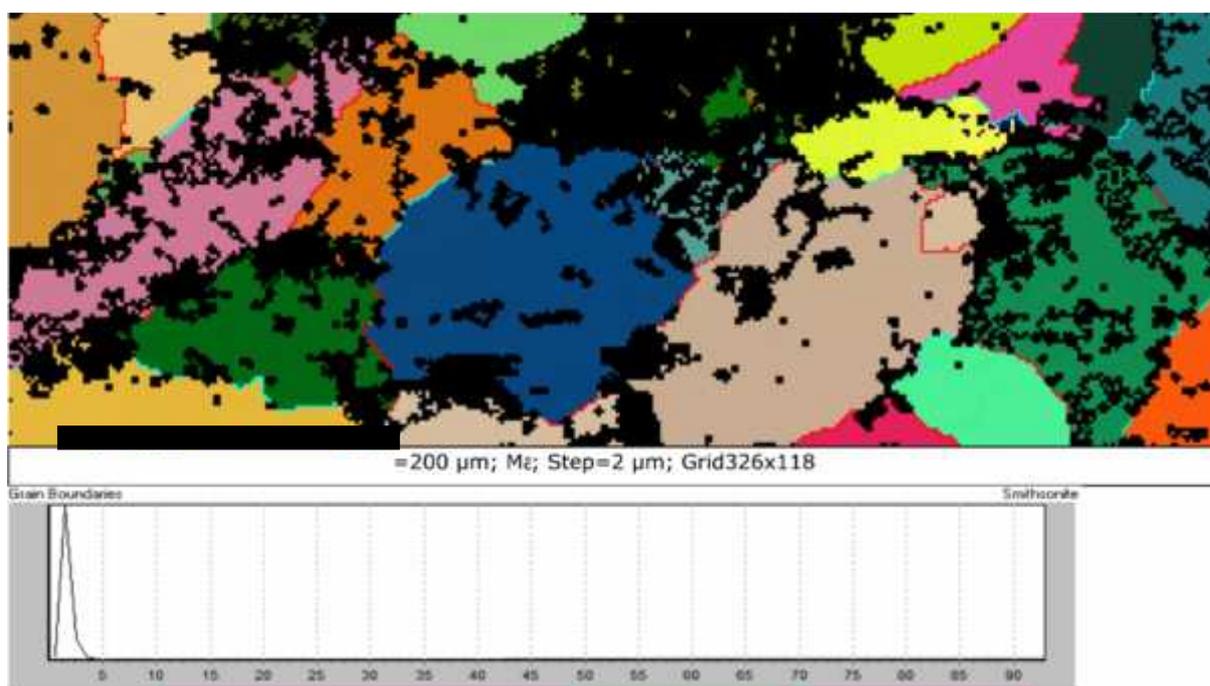


Figura 23: Mapa de Euler indicando orientação cristalográfica e ângulo de contato entre os cristais. Linhas em azul claro para contatos entre $50-70^\circ$ e em vermelho para os demais ângulos.

A partir do gráfico de “*misorientation*” pode-se analisar as relações de ângulo entre cristais adjacentes, em comparação com a linha que representa como seria essa distribuição angular caso o crescimento dos grãos fosse aleatório. As colunas azuis indicam angulos de *misorientation* entre cristais vizinhos (em contato mútuo, “*correlated*”), enquanto as barras em vermelho representam os angulos de *misorientation* em pares de grãos aleatórios, ou seja que não estão em contato um com ou outro (*uncorrelated*). A curva preta representa como seria a distribuição aleatória teórica para o crescimento do determinado cristal. A partir da Figura 24 pode-se observar que a distribuição cristalográfica preferencial não ocorre de forma totalmente aleatória (colunas não condizentes com a linha preta). O maior pico encontra-se entre 60-65°, que indica contatos geminados para minerais do sistema trigonal, caso da smithsonita, que possivelmente relaciona o crescimento desses cristais controlado pela sua natureza intrínseca, sem indícios de deformação.

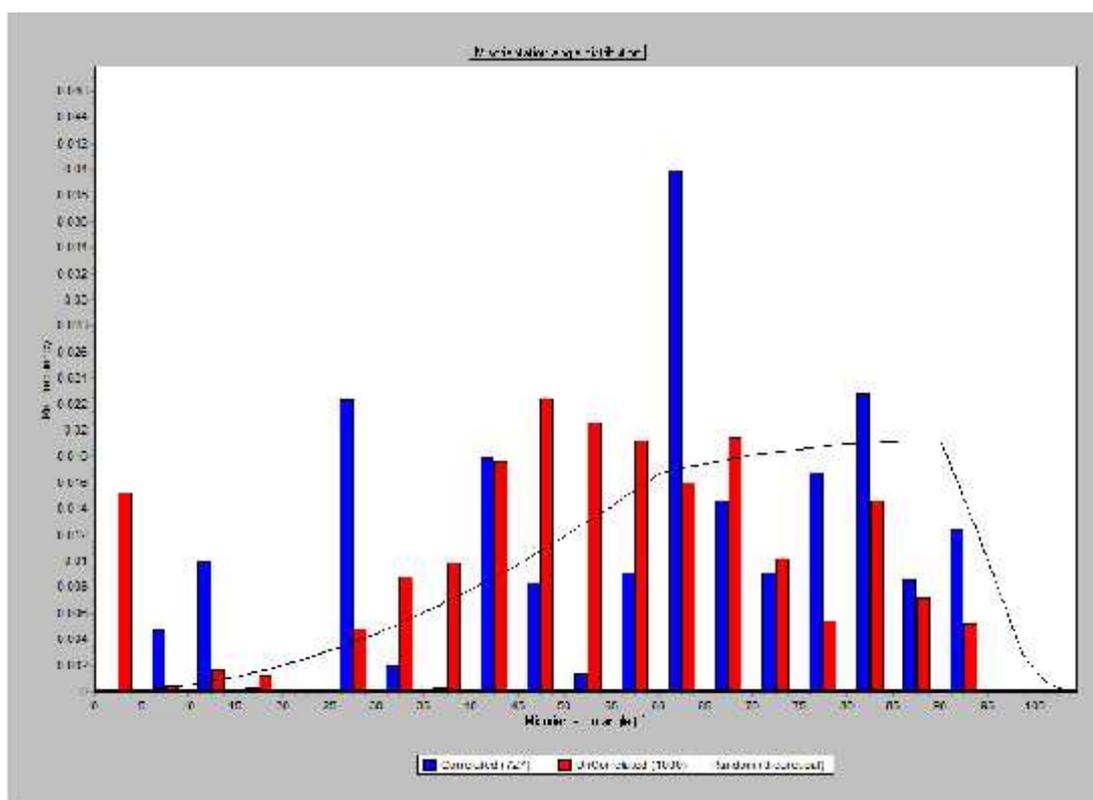


Figura 24: Gráfico de “*misorientation*” para cristais de Smithsonita.

As figuras de polos segundo as orientações cristalográficas (Figura 25) indicam dispersão das orientações cristalográficas, no entanto na seção basal {0001} é possível observar a orientação cristalográfica preferencial para N-NE.

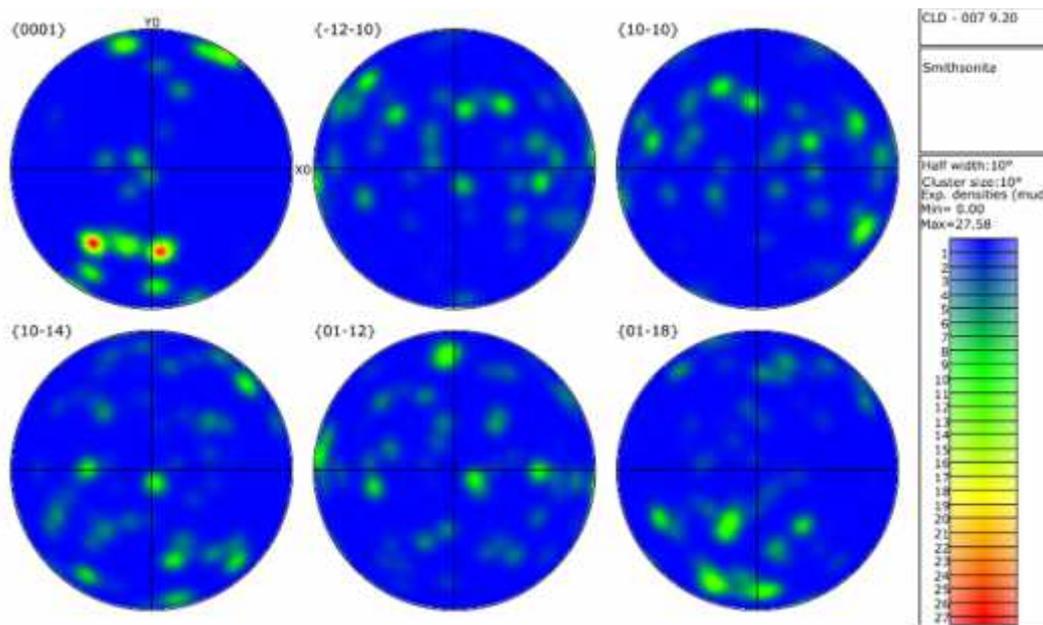


Figura 25: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos.

6.1.1 Comparação com DRX

Na tabela 4 pode-se observar a comparação dos resultados obtidos via DRX e via EDS-EBSD para a amostra de minério maciço em drusas.

Tabela 4: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD

Amostra CLD - 007 9,20	DRX	EDS-EBSD
Minerías identificados	Smithsonita, Magnesita, Ilita	Smithsonita, quartzo

O principal mineral que compõe essa amostra, smithsonita, foi reconhecido em ambos os métodos, porém a magnesita que possuía algum grau de incerteza no seu reconhecimento via DRX mostrou-se inexistente na seção analisada por meio de EDS-EBSD e o quartzo por outro lado, não foi identificado via DRX porém foi identificado via EDS-EBSD.

6.2 Amostra CLD – 007 18.80

Analisando o mapa de fases da amostra de minério em substituição de veios e cavidades, (Figura 26) nota-se constituição preferencial de cristais de smithsonita, localmente com pequenos cristais de quartzo.

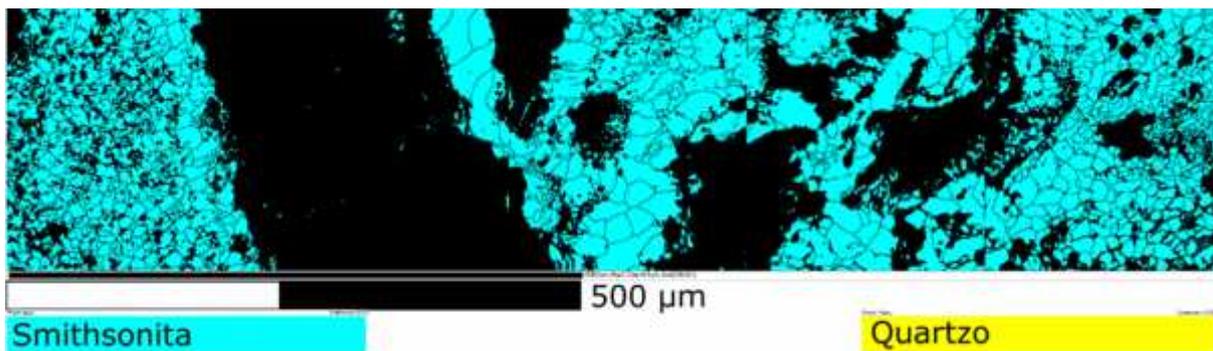


Figura 26: Mapa de fases indicando presença de smithsonita e quartzo.

Os cristais de smithsonita apresentam grande variação em sua orientação cristalográfica, conforme observado no mapa de Euler (Figura 27).

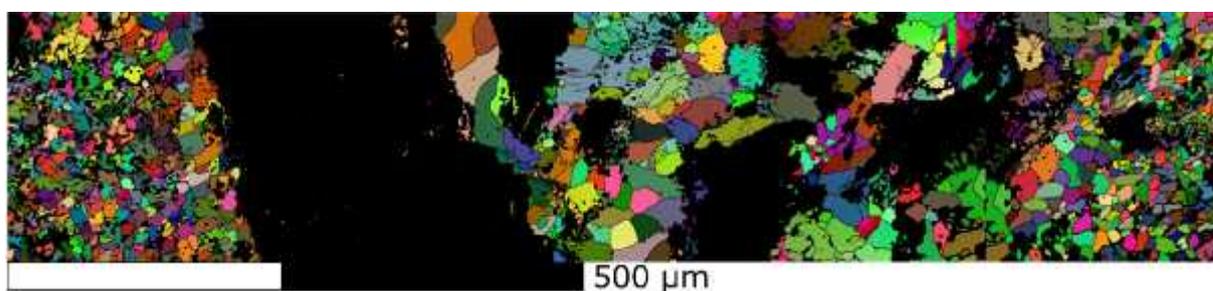


Figura 27: Mapa de Euler.

A partir do histograma de “*misorientation*” (Figura 28) pode-se observar que a distribuição cristalográfica preferencial dos cristais de smithsonita não ocorre de forma totalmente aleatória (colunas não condizentes com a linha preta) a maior diferença encontra-se nos contatos entre 5-10°. Angulos baixos de *misorientation* indicam a presença de sugrãos, o que ao microscópio ótico aparecem sob forma de extinções ondulantes. Essas feições são causadas por deformação plástica do mineral e precedem a formação de grãos recristalizados. Nota-se também que há ângulos de misorientações numa ampla faixa de distribuição o que também pode ser indício de recristalização dinâmica do agregado cristalino, resultante da deformação plástica do cristal. Isso também pode ser observado nas figuras de polo que mostram concentrações de eixos c próximo a direção X da figura de polo. Uma hipótese para a deformação observada em cristais de origem supergênica é que esses cristais foram formados após a fase de cristalização da willemita, que tem gênese associada à Falha de Vazante (Monteiro *et al.*, 2006). Essa cristalização se deu em baixas temperaturas, porém ainda com alguma tensão atuando nas rochas.

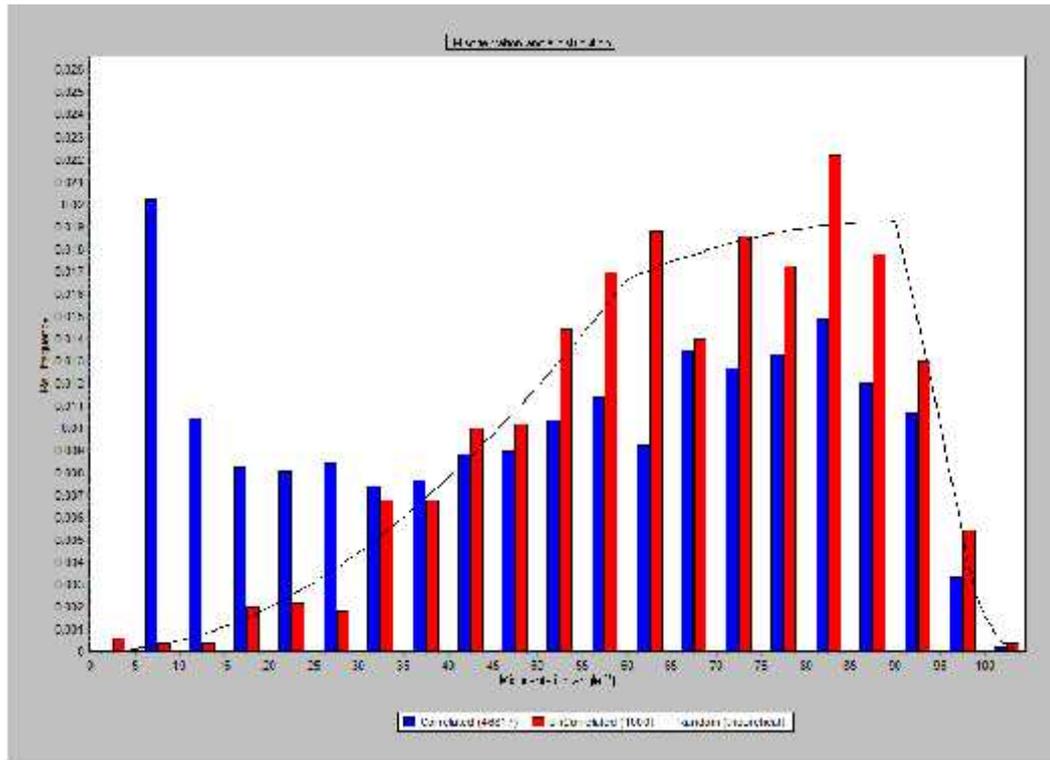


Figura 28: Gráfico de missorientation para smithsonita.

Os estereogramas de polos segundo as orientações cristalográficas para smithsonita (Figura 29) indicam dispersão das orientações cristalográficas, no entanto na seção basal $\{0001\}$ é possível observar a orientação cristalográfica preferencial para NW e para SEE.

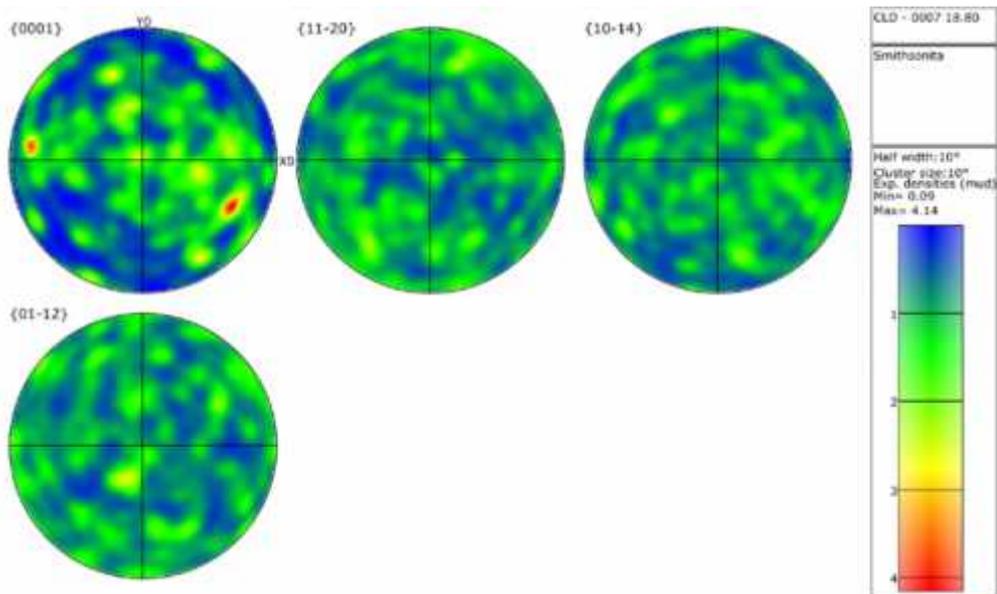


Figura 29: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos para smithsonita.

6.2.1 Comparação com DRX

Na Tabela 5 pode-se observar a comparação dos resultados obtidos via DRX e via EDS-EBSD para a amostra de minério em substituição de veios e cavidades.

Tabela 5: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD

Amostra CLD - 007 18.80	DRX	EDS-EBSD
Minerías identificados	Hemimorfita, Quartzo, Smithsonita, Esmectita	Smithsonita, quartzo

O principal mineral que compõe essa amostra, smithsonita, foi reconhecido em ambos os métodos, porém a hemimorfita mostrou-se inexistente no trecho analisado por meio de EDS-EBSD.

6.3 Amostra CLD – 007 19.78

Amostra de minério em substituição de veios e cavidades. Analisando o mapa de fases (Figura 30) nota-se que a amostra é composta predominantemente por cristais de smithsonita, no entanto, foram identificados cristais de willemita e hemimorfita.

Os cristais de willemita encontram-se preenchendo espaços de formas arredondadas na matriz carbonática. Dessa forma é muito provável que a mesma tenha sido formada por processos hidrotermais anteriores à formação dos carbonatos de zinco. Os cristais de willemita apresentam contatos arredondados/irregulares, granulometria reduzida em relação aos cristais de smithsonita, e encontram-se por vezes englobados por cristais de smithsonita podem indicar que os cristais de willemita são os mais antigos e sugerir que os cristais de smithsonita cresceram a partir (no contato) com a willemita. Essa informação colabora com a teoria do processo de *wall-rock replacement*,

Estudos mais detalhados de mais amostras serão necessários para um melhor entendimento desses processos de substituições e transformações de fases.

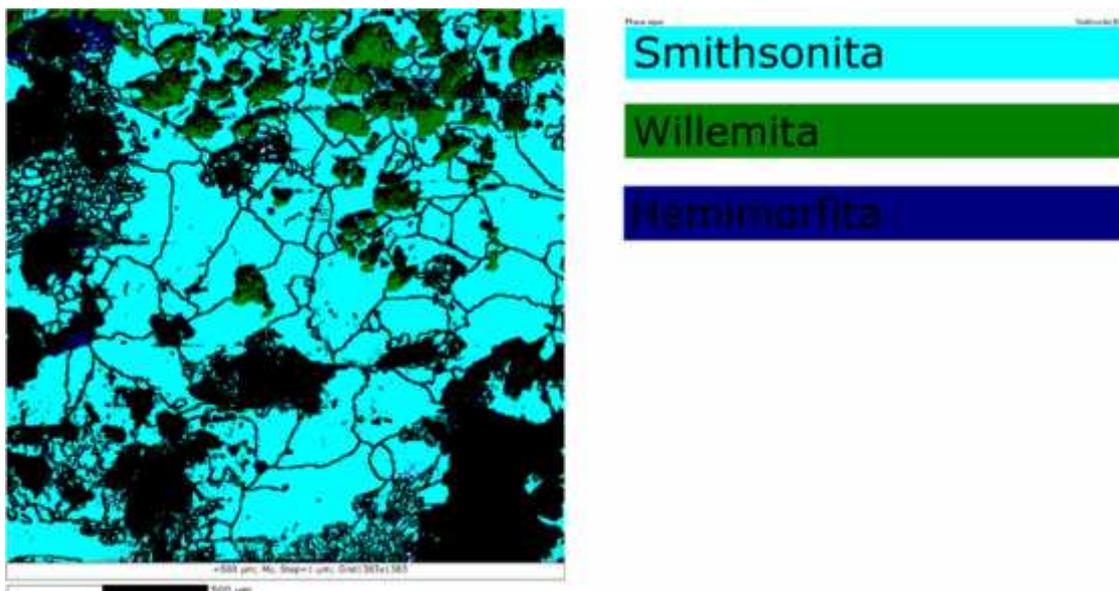


Figura 30: Mapa de fases indicando presença de smithsonita, willemita e hemimorfita.

Os cristais de smithsonita e hemimorfita apresentam grande variação em sua orientação cristalográfica, conforme observado no mapa de Euler (Figura 31). Já os cristais de willemita, encontram-se com orientações cristalográficas muito parecidas, o que pode colaborar com o que foi dito a cima no sentido desses cristais serem mais antigos, e ainda que eles passaram por algum processo de deformação que talvez seja o mesmo que operou nas rochas encaixantes.

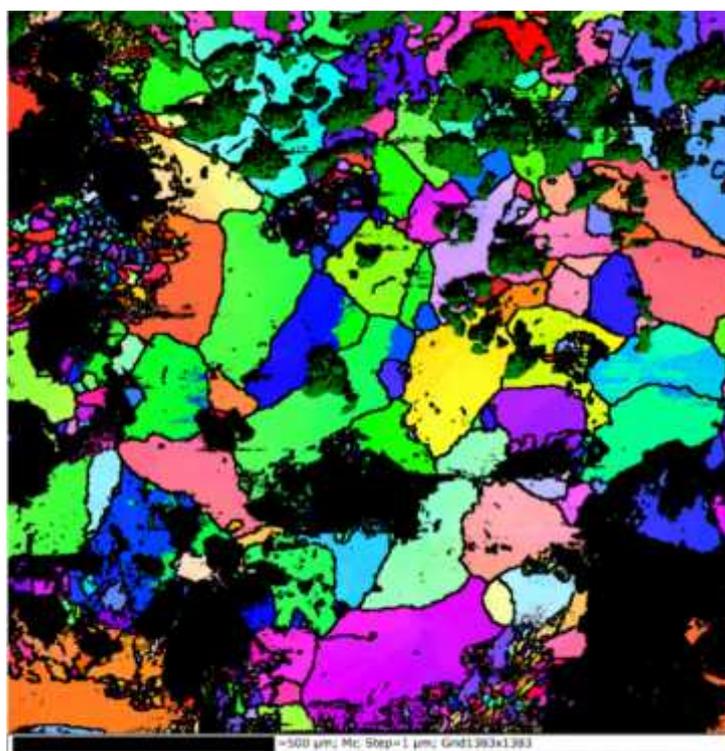


Figura 31: Mapa de Euler.

A partir do gráfico de *misorientation* (Figura 32) pode-se observar que a distribuição cristalográfica preferencial não ocorre de forma totalmente aleatória (colunas não condizentes com a linha preta) a maior diferença encontra-se nos contatos entre 5-10°. Os cristais de willemita apresentam duas populações de concentrações, uma entre 0 - 10° e a outra próxima de 180°. Os cristais de hemimorfita apresentam distribuição cristalográfica preferencial em torno de 90°. Ângulos baixos de *misorientation* indicam a presença de sugrãos. Nota-se também que há ângulos de misorientações numa ampla faixa de distribuição o que também pode ser indício de recristalização dinâmica do agregado cristalino para a smithsonita, resultante da sua deformação cristal plástica.

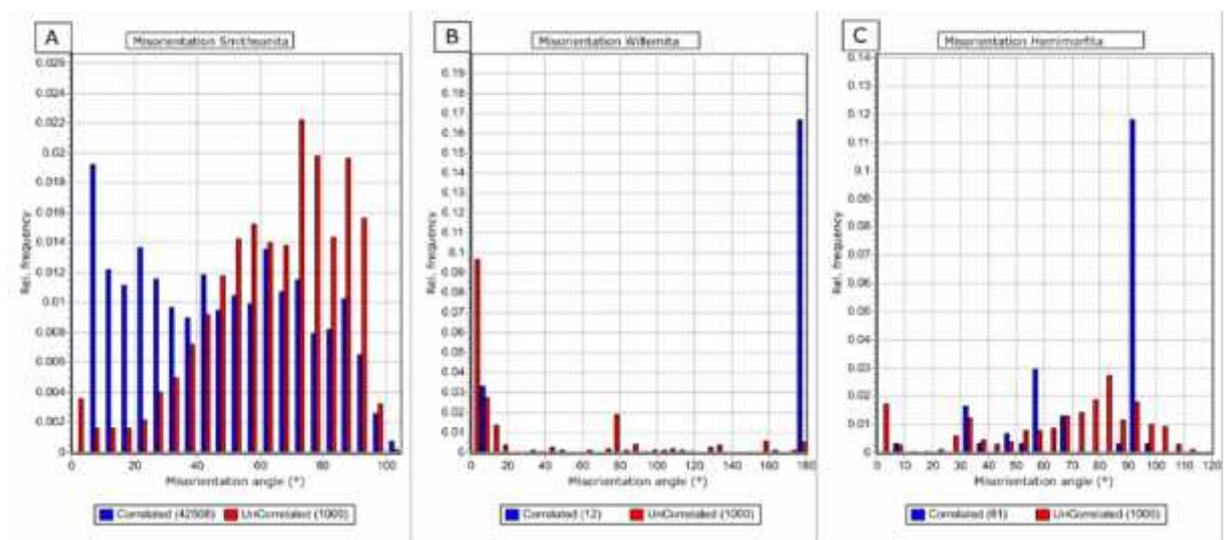


Figura 32: Gráficos de missorientation em A) Smithsonita; B) Willemita; C: Hemimorfita

Uma hipótese para a deformação observada em cristais de origem supergênica é que esses cristais foram formados após a fase de cristalização da willemita, que tem gênese associada à Falha de Vazante (Monteiro *et al.*, 2006). Essa cristalização se deu em baixas temperaturas, porém ainda com alguma tensão atuando nas rochas. A orientação cristalográfica preferencial, para willemita, mais intensa observada na Figura 31 pode indicar que no momento da cristalização da willemita tensões de maior intensidade do que as registradas em smithsonita atuavam na região.

Os estereogramas de polos segundo as orientações cristalográficas para hemimorfita (Figura 33 A) indicam dispersão das orientações cristalográficas, no entanto na seção basal {001} é possível observar a orientação cristalográfica preferencial para NE. Na seção {100} existe orientação cristalográfica preferencial

para SW, enquanto que na seção {010} essa orientação é para NW. Os estereogramas de polos segundo as orientações cristalográficas para hemimorfita (Figura 33 B) indicam dispersão das orientações cristalográficas, no entanto na seção basal {0001} é possível observar a orientação cristalográfica preferencial para NE.

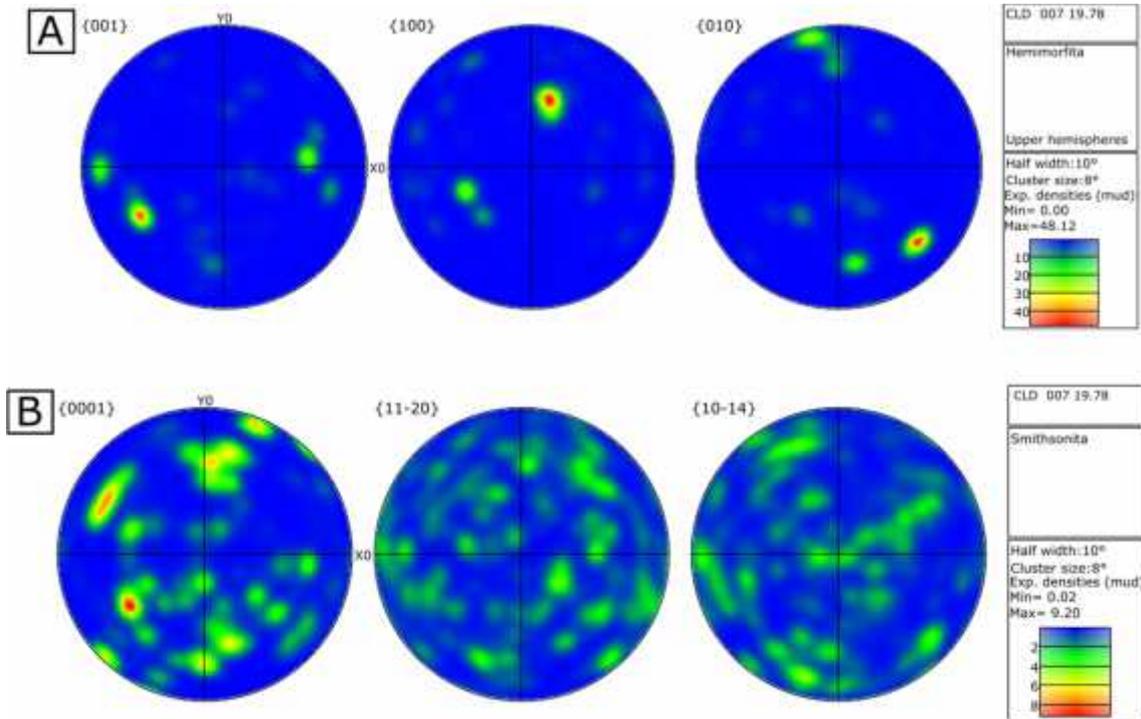


Figura 33: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos. Em A) hemimorfita; B) smithsonita.

Os estereogramas de polos segundo as orientações cristalográficas para willemita (Figura 34) indicam dispersão das orientações cristalográficas, no entanto na seção basal {0001} é possível observar a orientação cristalográfica preferencial para SE.

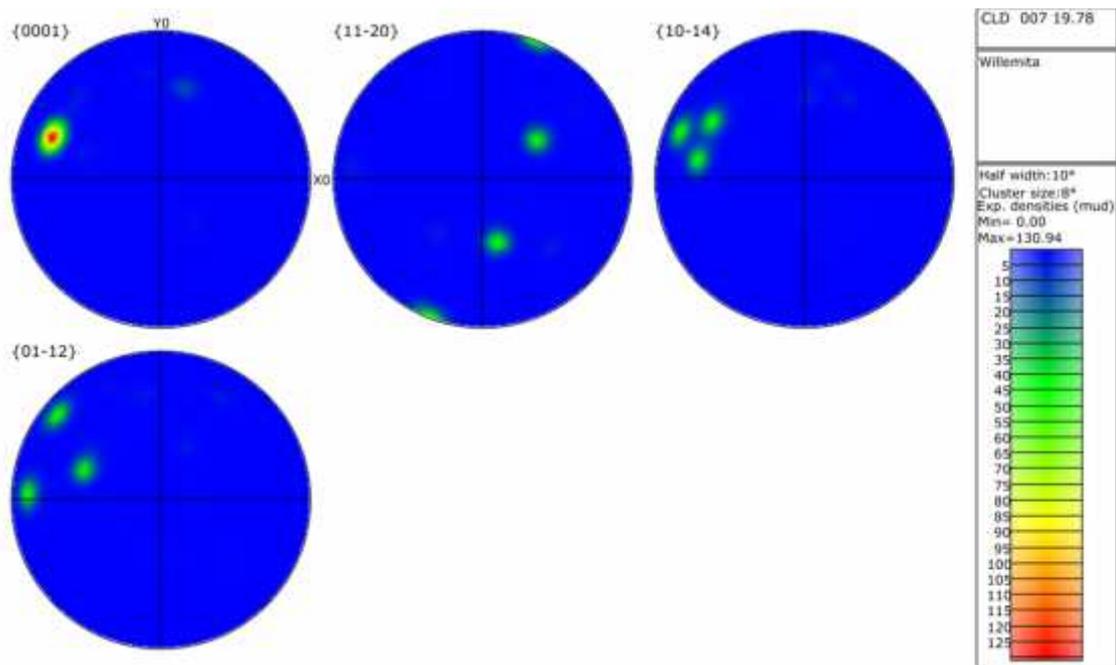


Figura 34: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos de willemita.

6.3.1 Comparação com DRX

Na tabela 6 pode-se observar a comparação dos resultados obtidos via DRX e via EDS-EBSD para a amostra de minério maciço em substituição de veios e cavidades.

Tabela 6: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD.

Amostra CLD - 007 19.78	DRX	EDS-EBSD
Minerías identificados	Hemimorfita, Smithsonita, Quartzo, Magnesita	Smithsonita, willemita, hemimorfita

O principal mineral que compõe essa amostra, smithsonita, foi reconhecido em ambos os métodos além da hemimorfita, porém magnesita e quartzo mostraram-se inexistentes no trecho analisado por meio de EDS-EBSD. Willemita que não havia sido reconhecida por DRX foi identificada via EDS-EBSD.

6.4 Amostra CLD – 017 18.97

Amostra de minério margoso. Analisando o mapa de fases (Figura 35) nota-se que a amostra é composta exclusivamente por cristais de smithsonita.

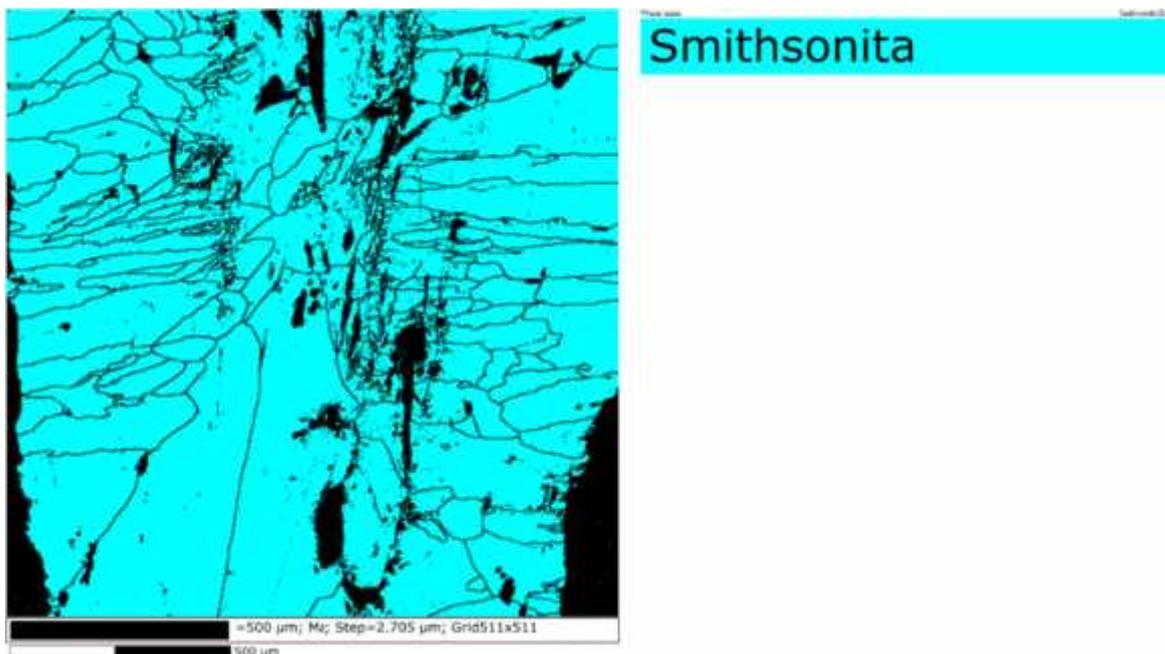


Figura 35: Mapa de fases indicando presença de smithsonita.

Os cristais de smithsonita apresentam variação em sua orientação cristalográfica, no entanto, nota-se um crescimento fibrorradiado dos cristais, conforme observado no mapa de figura de polo inversa da Figura 36. Nesse mapa a direção X do sistema de referencia da amostra é fixado. Observa-se dessa forma que alguns cristais de Smithsonita crescem com seus eixos c paralelos a essa direção (cores em tons vermelhos na figura), outros mostram relações de orientação a 90° com a direção X (tons azulados a verde). O que determina essa orientação podem ser fenômenos de precipitação e crescimento orientados dos carbonatos em veios. No entanto é necessário um estudo mais detalhados da orientação dessas feições com coletas de amostras orientadas em campo para que seja possível aumentar a confiabilidade dessa interpretação das relações de crescimento dos carbonatos de Zn como campos de tensões locais. Entretanto a análise das figuras de polo mostra nitidamente as duas orientações preferenciais de crescimento dos carbonatos com dois máximos de orientações dos eixo c próximo ao eixo Z da figura de pólo e outro próximo a X. Há também um forte componente rotacional das direções cristalográficas o que pode ser observado nas figuras de polo dos outros planos cristalográficos. Padrões em forma de calda de cometa e distribuições circulares de polos são típicos dessas situações como visto na figura 36.

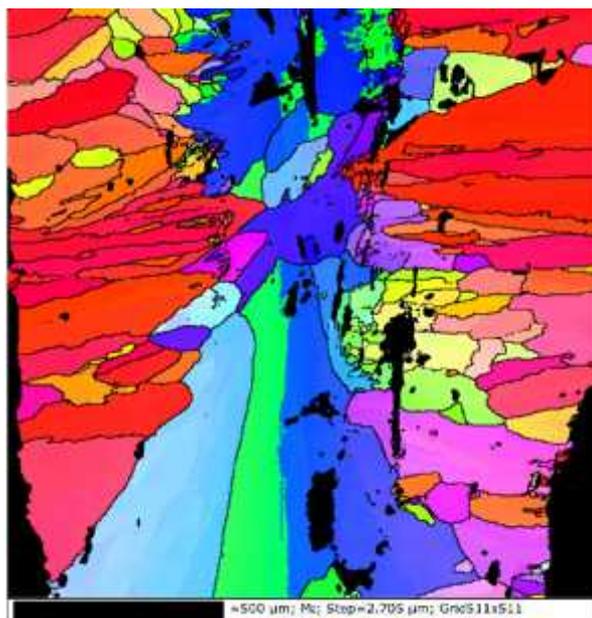


Figura 36: Figura de polo inversa.

Os estereogramas de polos segundo as orientações cristalográficas para smithsonita (Figura 37) indicam dispersão das orientações cristalográficas, no entanto na seção basal $\{0001\}$ é possível observar a orientação cristalográfica preferencial para S.

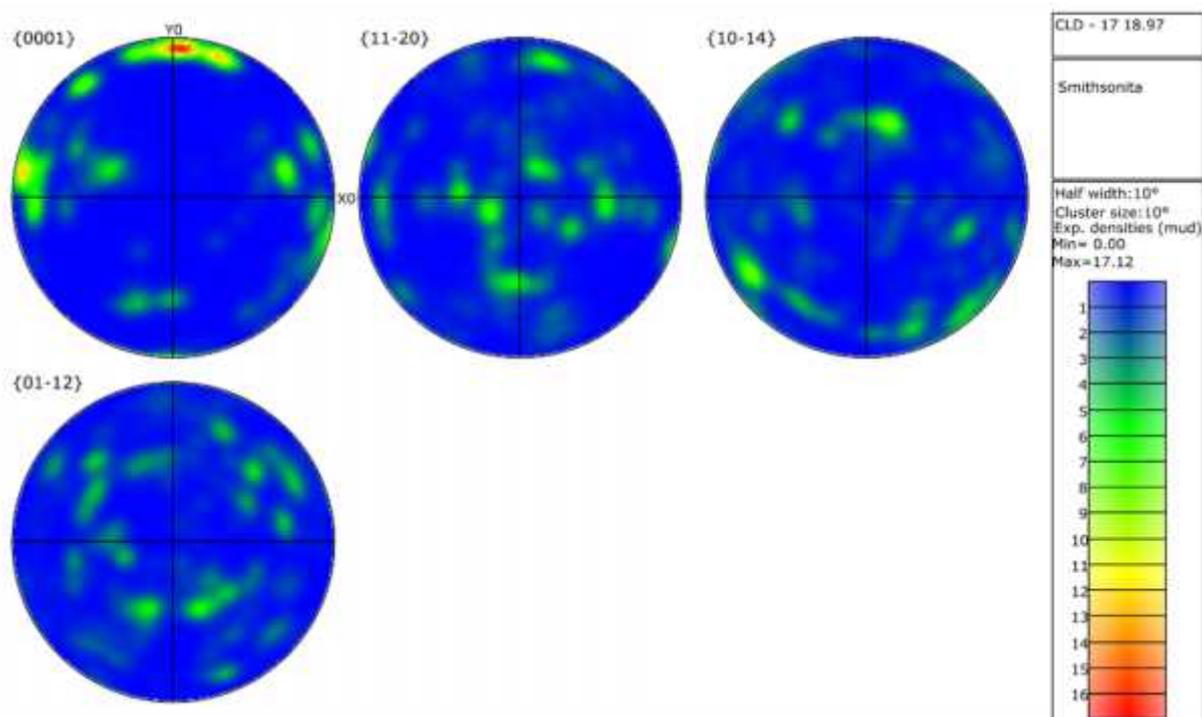


Figura 37: Estereogramas de polos de orientação cristalográfica segundo eixos cristalográficos de smithsonita.

6.4.1 Comparação com DRX

Na tabela 7 pode-se observar a comparação dos resultados obtidos via DRX e via EDS-EBSD para a amostra de minério margoso.

Tabela 7: Comparação entre análise DRX e EDS-EBSD.

Amostra CLD - 017 18.97	DRX	EDS-EBSD
Minerías identificados	Hemimorfita, Smithsonita, Quartzo, Magnesita, Volkonskoita, Esmectita, Ilita, caulinita	Smithsonita

O principal mineral que compõe essa amostra, smithsonita, foi reconhecido em ambos os métodos, porém a hemimorfita, quartzo e magnesita mostraram-se inexistentes no trecho analisado por meio de EDS-EBSD.

7 DISCUSSÕES

Para a caracterização do minério calamina optou-se pela análise integrada dos dados de campo, testemunhos, difração de raios x e EDS-EBSD.

A geometria da camada de minério margoso e suas relações com as rochas encaixantes, indicam relação com o processo de *wallrock-replacement* e de preenchimento residual de carste, como os descritos por Hitzman (*et al.*, 2003). Um bom exemplo do processo de *wall-rock replacement* é o caso do depósito de Skorpion, localizado no cinturão proterozoico de Gariep, no sul da Namíbia (Borg e Kärner 2001). A gênese desse depósito é supergênica resultante da alteração de sulfetos hospedados em sequências vulcano-sedimentares do tipo VHMS (Kärner & Borg 2002), em que o fluido rico em zinco, proveniente do processo de alteração do sulfeto, migra e substitui partes das rochas encaixantes. Esse fluido tende a precipitar devido ao contato com rochas carbonáticas, que aumentam seu pH para próximo de 8, quando cristais de smithsonita substituem cristais de calcita ou dolomita da rocha encaixante. Já os componentes silicáticos, presentes nas encaixantes, podem ser substituídos em pH levemente mais ácidos por hemimorfita (Large, 2001). Adaptando este modelo para o caso da calamina de Vazante, considera-se que o depósito primário, no caso willemítico, foi completamente (ou quase completamente) lixiviado, conforme análise EDS-EBSD da amostra CLD – 07 19.78 (Figura 30). A relação dos

cristais de willemita pode indicar que a partir do contato deles com os minerais carbonáticos, houveram reações químicas que proporcionaram a formação de carbonatos de zinco. A migração de fluido rico em zinco foi controlada pelo acamamento e por feições de carste. Os fluidos causaram a substituição da rocha encaixante (metadolomito e metamarga) por minério de calamina, entretanto, mais análises são necessárias para embasar essa hipótese. A metamarga atua provavelmente como selante, uma vez que é menos permeável que o metadolomito, e esse fluido circulando no contato metamarga/metadolomito acaba mineralizando porções de metamarga, também pelo processo de *wall-rock replacement*, proporcionando crescimento de cristais de smithsonita fibroradiais (Figura 35). Como a metamarga não costuma formar feições de carste, as ocorrências de minério associadas ao preenchimento residual de carste, encontram-se limitadas as porções de metadolomito.

Os microcristais do minério em substituição de veios e cavidades, indicam relação com enriquecimento supergênico, pois podem ser reconhecidos inclusive em afloramentos na superfície e por *wall-rock replacement*, uma vez que apresentam feições (acamamento e cristais reliquiares) que permitem o reconhecimento da rocha pretérita, nesse caso, o metadolomito. O mesmo acontece para o minério maciço em drusas, porém para esse tipo de minério o processo é mais avançado, gerando até cristais bem formados milimétricos de calamina.

Todos os tipos de minério de calamina encontram-se relacionados com o processo de preenchimento residual de carste, já que simultaneamente à cristalização da calamina, ocorre o processo de carstificação. Por vezes os tipos de minérios ocorrem associados. Por exemplo minério maciço em drusas remanescente em meio a argiloso (Figura 18). Isso poderia explicar por que muitas vezes o minério argiloso apresenta cristais de calamina com aspecto sacaroidal. Essa associação indica que o minério argiloso é originário da alteração tanto de minério maciço quanto de minério margoso. O processo de preenchimento residual de carste relaciona-se preferencialmente ao minério argiloso que, como descrito, é proveniente da alteração do minério maciço e margoso. A composição argilosa faz com que ele seja facilmente transportado dentro das feições de carste, mesmo assim, eventualmente, partes de

minério maciço e margoso entram no espaço poroso e preenchem as feições de dissolução.

Em região de rochas deformadas e metamorizadas, a presença de cristais indeformados de smithsonita (Figura 24) identificados por meio de EDS-EBSD, pode indicar que o crescimento desses cristais se deu posteriormente ao evento de metamorfismo e deformação das rochas encaixantes. O mesmo caso ocorre no depósito de Skorpion na Namíbia, em que os cristais supergênicos indeformados são claramente posteriores aos processos de metamorfismo que atuaram nas rochas encaixantes (Kärner & Borg 2002). Esta constatação corrobora o modelo de *wall-rock replacement* e preenchimento residual de carste, uma vez que esses dois tipos de processos são posteriores à formação dos depósitos e nesse caso, também posteriores à deformação e metamorfismo. Já os cristais de willemita apresentam-se orientados e deformados, o que pode indicar que são preteritos ou contemporâneos aos eventos de deformação e metamorfismo, concordando com a interpretação de Monteiro (*et al.*, 2006) de que o minério willemítico é contemporâneo e associado a Falha de Vazante. No entanto, existe registro de cristais deformados de smithsonita e hemimorfita (Figuras 28 e 32) identificados por meio de EDS-EBSD, com indícios de recristalização dinâmica do agregado cristalino para a smithsonita, resultante da sua deformação cristal plástica e presença de subgrãos. Uma hipótese para o crescimento desses cristais é que isso ocorreu em um momento, após a cristalização da willemita, de baixa temperatura ainda com alguma tensão atuante na região. O crescimento dos cristais sem indícios de deformação poderiam estar associados a uma fase posterior de cristalização sem tensões regionais, entretanto, mais análises são necessárias para embasar essa hipótese.

A análise por DRX, realizada para identificar as fases minerais e para alimentar o banco de dados da técnica de EDS-EBSD, também foi utilizada além de comparar os resultados mineralógicos obtidos em ambos os métodos. Alguns minerais identificados por DRX com certo grau de incerteza, como magnesita, não foram identificados nos trechos analisados via EDS-EBSD. A análise de EDS-EBSD permitiu ainda reconhecimento em uma mesma amostra de hemimorfita e willemita (Figura 27), que por serem dois silicatos de zinco muitas vezes não podem ser diferenciados apenas com análises químicas.

A características macroscópicas da calamina e a variação aos teores de zinco levaram os integrantes do Projeto Calamina a subdividir o minério, de forma a tornar prática a elaboração de modelos geométricos do minério. A correlação dos subtipos de minério com os resultados mineralógicos obtidos por EDS-EBSD (Tabela 8) mostram predominância de cristais de smithsonita, sendo que os trechos analisados das amostras de minério maciço apresentaram smithsonita, silicatos de zinco e quartzo, enquanto que o trecho analisado para o minério margoso mostrou-se composto essencialmente por smithsonita. Vale ressaltar que a distância de aquisição dos dados não permitiu a identificação de argilominerais, os mesmos foram identificados apenas via DRX.

Tabela 8: Tabela resumo das análises EDS-EBSD.

Amostra	Tipo de minério	Minerais identificados	Observação
CLD – 007 9.20	Drusas	Smithsonita, quartzo	-
CLD - 007 18.80	Substituição de veios e cavidades	Smithsonita, quartzo	-
CLD – 007 19.78	Substituição de veios e cavidades	Smithsonita, hemimorfita, willemita	Willemita orientada, alterada
CLD – 017 18.97	Margoso	Smithsonita	Crescimento fibrorradial

A partir do gráfico de *misorientation* da amostra CLD – 007 9.20 (Figura 24) pôde-se analisar as relações de ângulo entre cristais adjacentes. O gráfico indicou predominância de contatos próximos a 60°, sendo considerados, para o sistema trigonal, relações de geminação, com encaixes perfeitos, mostrando que o crescimento desses cristais se deu preferencialmente relacionado a seu crescimento, e não controlado por componentes deformacionais. Bordas de grãos em situações de geminação influenciam no comportamento do agregado cristalino. Em geral a energia necessária empregada na desagregação é maior para casos de cristais com esses tipos de relações. Bordas de mais baixa energia, ou seja com melhor encaixe reticular, são também menos reativas. Todos esses fatores tem um papel de grande relevância no comportamento mecânico e químico do agregado policristalino, podendo ter influência para as etapas de beneficiamento do minério.

Embora a análise por EBSD-EDS tenha sido realizada em apenas quatro amostra, os resultados mostraram-se promissores.

O presente trabalho não apresenta estudos geometalúrgicos, porém imagina-se que o Minério Argiloso de calamina possa influenciar negativamente na planta de beneficiamento, causando o processo de *slime coating*, ou seja, uma fina camada de argila que recobre os compostos de zinco, evitando que o minério seja lixiviado adequadamente ou ainda ocasionando perda de minério nas fases de flotação. Além disso no processo de preparação das amostras para o tratamento de argilas, durante a decantação das argilas, as amostras “E” e “F” (CLD - 007 19,78 e CLD - 007 9,20) apresentaram comportamento hidrofóbico, portanto, sugere-se estudo detalhado desse fenômeno, uma vez que ele pode influenciar futuramente no processo de flotação para o beneficiamento do minério.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise integrada dos dados de campo, resultados analíticos e informações da bibliografia nos permitem concluir que:

- A gênese do minério pode ser relacionada do processo de *wall-rock replacement* e preenchimento residual de carste;
- O processo de dissolução está associado à circulação de fluidos ricos em Zn ao longo da Falha de Vazante;
- A calamina foi, provavelmente, originada por processo supergênico, posteriores ou contemporâneos à deformação/metamorfismo das rochas encaixantes;
- Cristais deformados de smithsonita e hemimorfita podem indicar cristalização simultânea (ou pouco posterior) à deformação ocasionada pela Falha de Vazante, que por sua vez é associada à formação dos cristais de willemita (Monteiro *et al.*, 2006). Essa cristalização aconteceria em regime de baixas pressões e temperaturas. Já os cristais de smithsonita não deformados poderiam estar relacionados a uma fase posterior sem tensões significativas atuantes, entretanto, mais análises são necessárias para embasar essa hipótese.;

- ➔ A associação espacial entre minérios indica que o minério argiloso é originário da alteração dos minérios maciço, explicando a presença de cristais de calamina com aspecto sacaroidal, e minério margoso
- ➔ As amostras de calamina da região da Mina de Vazante são compostas preferencialmente por cristais de Smithsonita;
- ➔ Os resultados da análise integrada EDS-EBSD podem fornecer informações importantes sobre a gênese dos cristais, como informações de deformação intracristalina;
- ➔ Os resultados da análise integrada EDS-EBSD podem fornecer informações importantes para o desenvolvimento de futura planta de beneficiamento do minério calamina, no entanto faz-se necessária a expansão do número de amostras e análises de modo a garantir a representatividade do estudo.
- ➔ A utilização do método de EBSD para mineralizações oxidadas de Zn, permite diferenciar willemita e hemimorfita de maneira qualitativa, o que não ocorre em métodos quantitativos pois os picos elementares destas fases são os mesmos.

9 REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. *Boletim DNPM-DGM*, Rio de Janeiro, v. 241. 36p.
- Arfe, G., Mondillo, N., Boni, M., Balassone, G., Joachimski, M., Mormone, A., Di Palma, T. 2017. The Karst-Hosted Mina Grande Nonsulfide Zinc Deposit, Bongará District, (Amazonas Region, Peru). *Economic Geology*, vol. 112, pp. 1089-1110.
- Baia, F. H. 2013. Brechas hidrotermais da mina do cercado e das ocorrências Olho D'água, Mata Il e Pamplona: Implicações metalogenéticas e perspectivas para zinco na região de Vazante, MG. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 181pp.
- Boni, M.; Large, D. 2003. Nonsulfide Zinc Mineralization in Europe: An Overview. *Economic Geology*, Vol. 98, p. 715-729.
- Boni, M.; Mondillo, N. 2015. The “Calamines” and the “Others”: The great family of supergene nonsulfide zinc ores. *Ore Geology Reviews* 67, p. 208-233.
- Borg, G., Kärner K., 2001. A preliminar appraisal of the sedimentary, volcanic, and tectonic setting of the Skorpion non-sulfide Zn-deposit, southern Namibia. *Geological Society of America Annual Meeting, Abstracts with Programs*, vol. 33, p. 337.
- Dardenne M. A., Freitas-Silva F. H., Souza J. C. F., Campos J. E. G. 1998. Evolução tectonosedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. In: SBG, XXXX Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, Resumos, p. 26.
- Dardenne, M. A. 2000. The Brasilia fold belt. In: Cordani U. G.; Milani E. G.; Thomaz Filho A.; Campos D. A. (eds.), *Tectonic evolution of South America*, Rio de Janeiro, p. 231-263.
- Gilg, H. A.; Boni, M.; Hochleitner, R.; Struck, H. 2008. Stable isotope geochemistry of carbonate minerals in supergene oxidation zones of Zn-Pb deposits. *Ore geology reviews* 33, p. 117-133.
- Hitzman, M.W. and Beaty, D.W., 1996, The Irish Zn-Pb(-Ba) orefield, in Sangster, D.F., ed., Carbonate-hosted lead-zinc deposits: Society of Economic Geologists, Publicação especial número 4, p. 112-143.

Hitzman, M. W.; Reynolds, N. A.; Sangster, D.F.; Allen, C. R.; Carman, C. 2003. Classification, genesis and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, v. 98, p. 685-714.

Kahn, H. 2016. Difração de raios X. PM1-2201. Disponível em: http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_2_DIFRACAO.pdf.

Acessado em 05 de Setembro 2017

Kärner, K., Borg, G. 2002, Metallogenesis of non-sulphides and sulphides at the Skorpion zinc deposit, southern Namibia. Simpósio e Geocongresso IAGOD, 11th quadrienal, Windhoek, Geological Survey of Namibia.

Large, D., 2001. The geology of non-sulphide zinc deposits - An overview. *Erzmetall*, vol. 54, p. 264-276.

Leach, D. L., Bradley, D., Lewchuk, M. T., Symons, D. T. A., de Marsily, G., and Brannon, J., 2001, Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating. *Mineralium Deposita*, v. 36, 711-740

Mainprice, D. 2012. A Person and practical guide to the history, installation and future of the Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD) system. European Microbeam Analysis Society (EMAS).

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. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 317 pp.

Monteiro, L. V. S.; Bettencourt J. S.; Juliani C.; De Oliveira T. F. 2006. Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrosia and Fagundes sulfiderich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews* 28, p. 201–234.

Morales L. F. G. 2006. Estudo da orientação cristalográfica em dobras, limites de grãos e anisotropia sísmica em muovita-quartzo milonito. Tese de doutorado, Programa de

Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 284 p.

Morales L. F. G., Hinrichs R., Fernandes L. A. D. 2007. A técnica de Difração de Elétrons Retro-espalhados (EBSD) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. *Pesquisa em Geociências*, 34 (1): 19-34 p.

Neves, L. P. 2011. Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb Morro Agudo, Grupo Vazante. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 81pp.

Nuspl, A. 2009. Genesis of nonsulfide zinc deposits and their future utilization. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie, Freiberg, Alemanha.

Oliveira, G. D. 2013. Reconstrução Paleoambiental e Químioestratigrafia dos Carbonatos Hospedeiros do depósito de Zinco Silicatado de Vazante, MG. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 79pp.

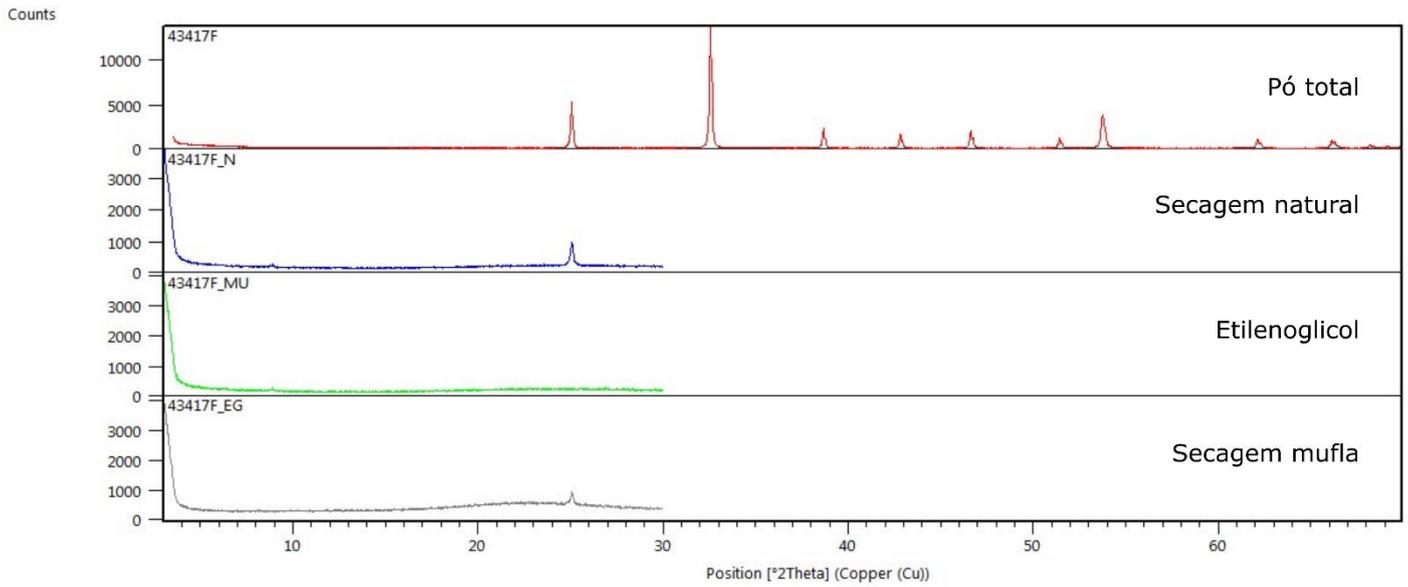
Paradis, S., Simandl, G. J., Keevil, H., Raudsepp, M. 2016. Carbonate-Hosted Nonsulfide Pb-Zn Deposits of the Quesnel Lake District, British Columbia, Canadá. *Economic Geology*, vol.111, p. 179-198.

Pinho J. M. M., Dardenne M. A., Rigobello A. E. 1990. Caracterização da movimentação transcorrente da Falha de Vazante, Vazante, MG In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, SBG, v 5, Natal, p. 2284-2295.

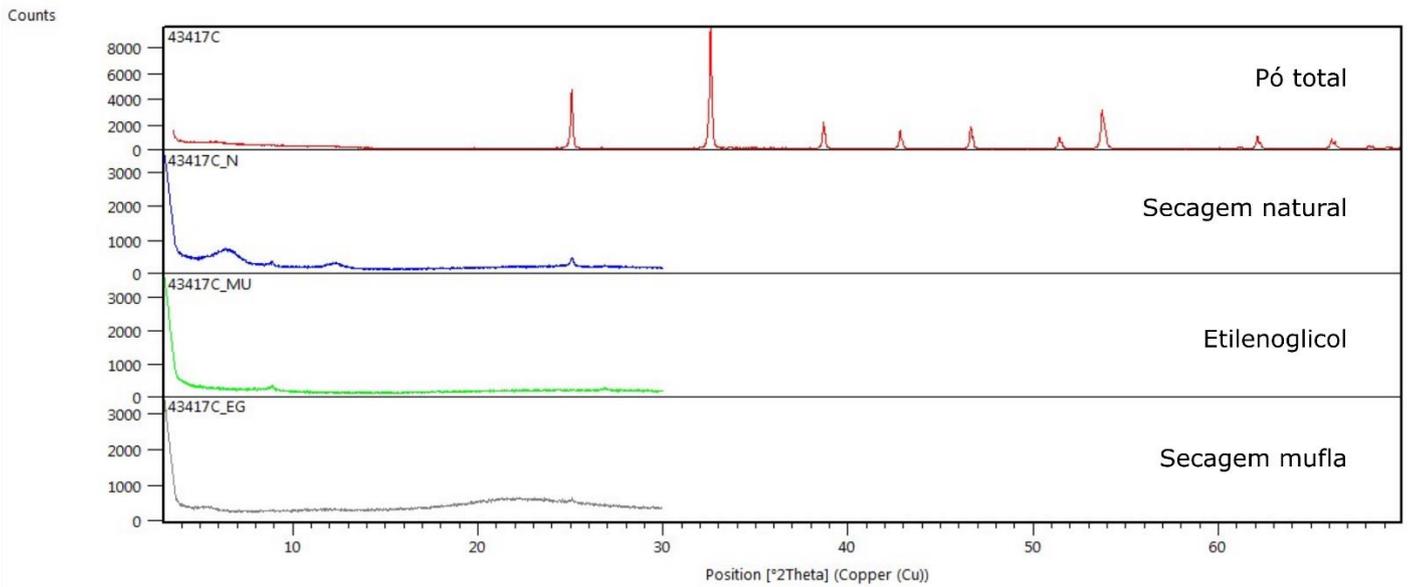
Sangster, D. F., 1990, Mississippi Valley-type and SEDEX lead-zinc deposits: a comparative examination: Institution of Mining and Metallurgy, Transactions, Seção B. *Applied Earth Science*, v. 99, p. 21-42.

ANEXO I: Difractogramas de DRX

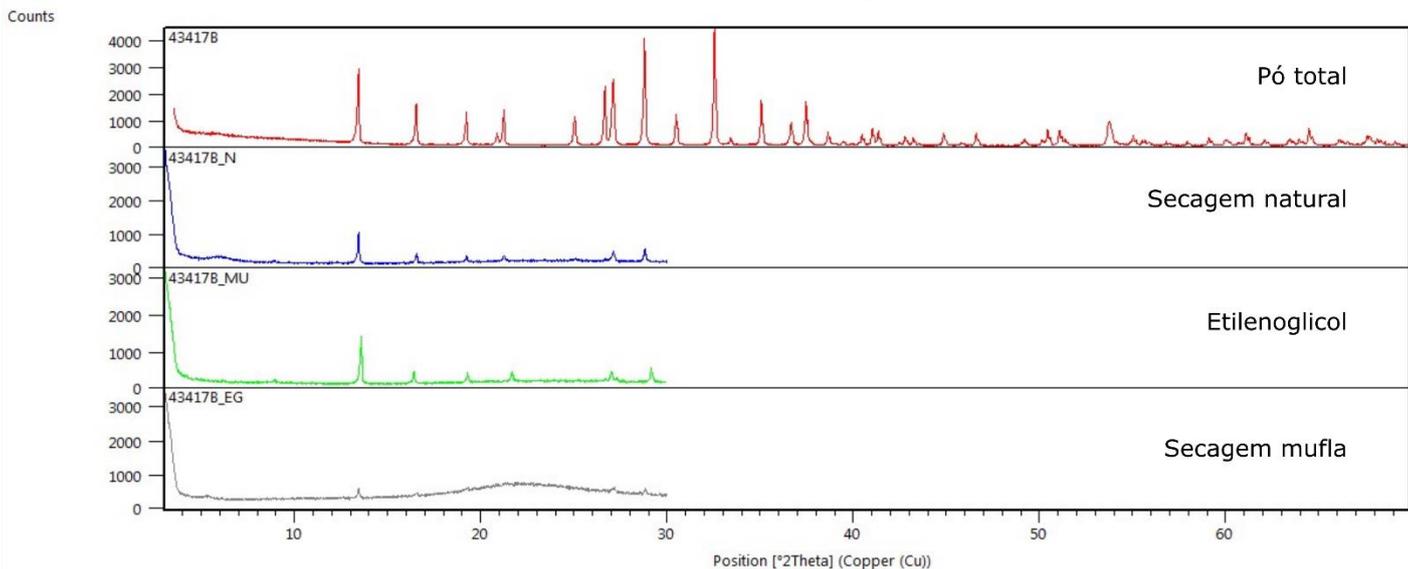
CLD007 - 9.20



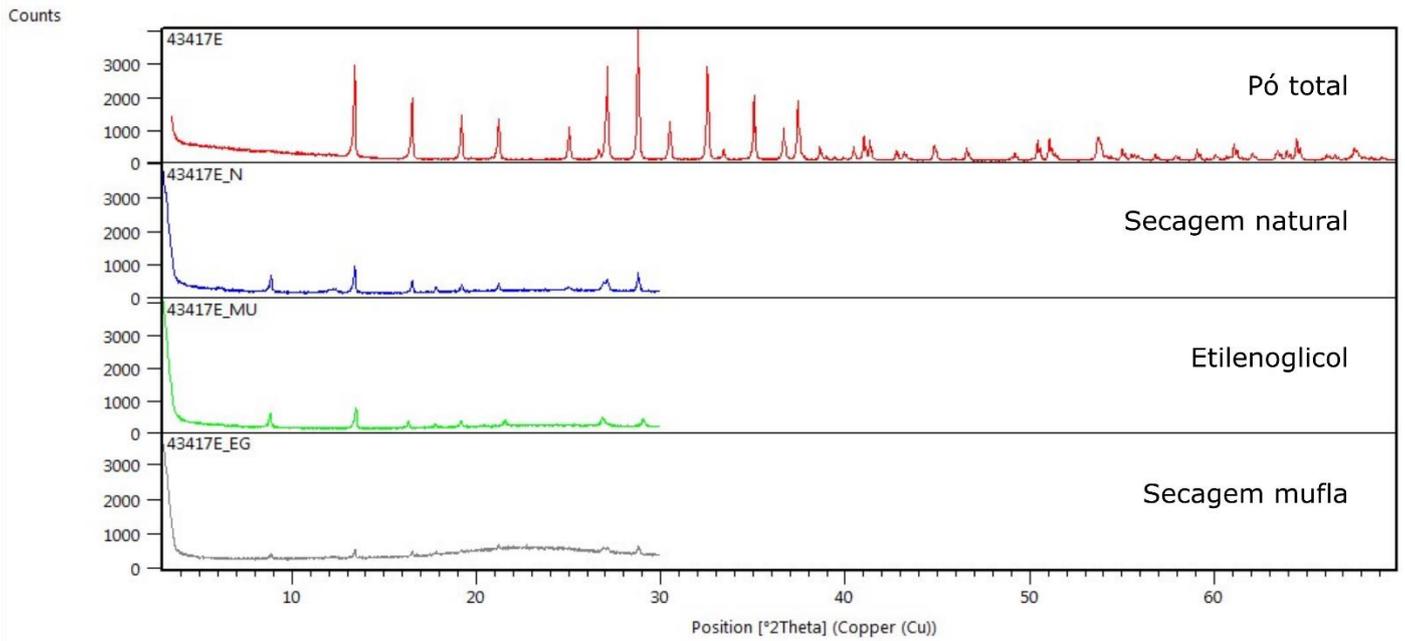
CLD007 - 9.75



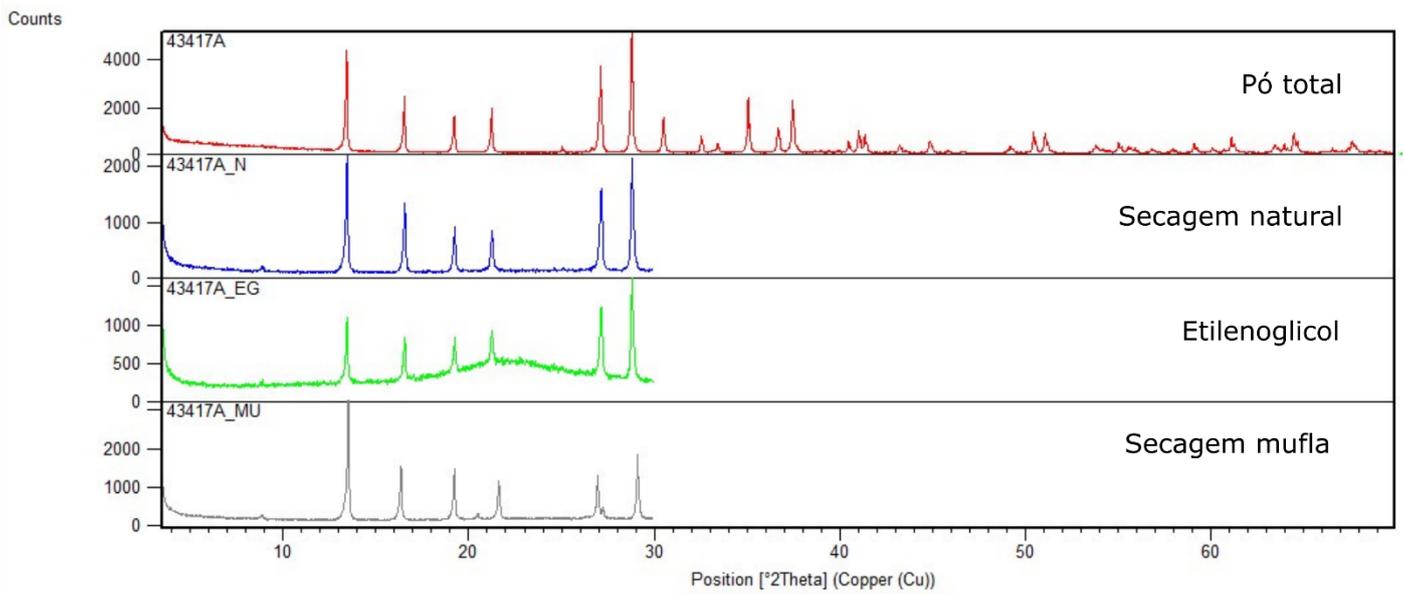
CLD007 - 18.80



CLD007 - 19.78



CLD012 - 22.70



CLD017 - 18.97

