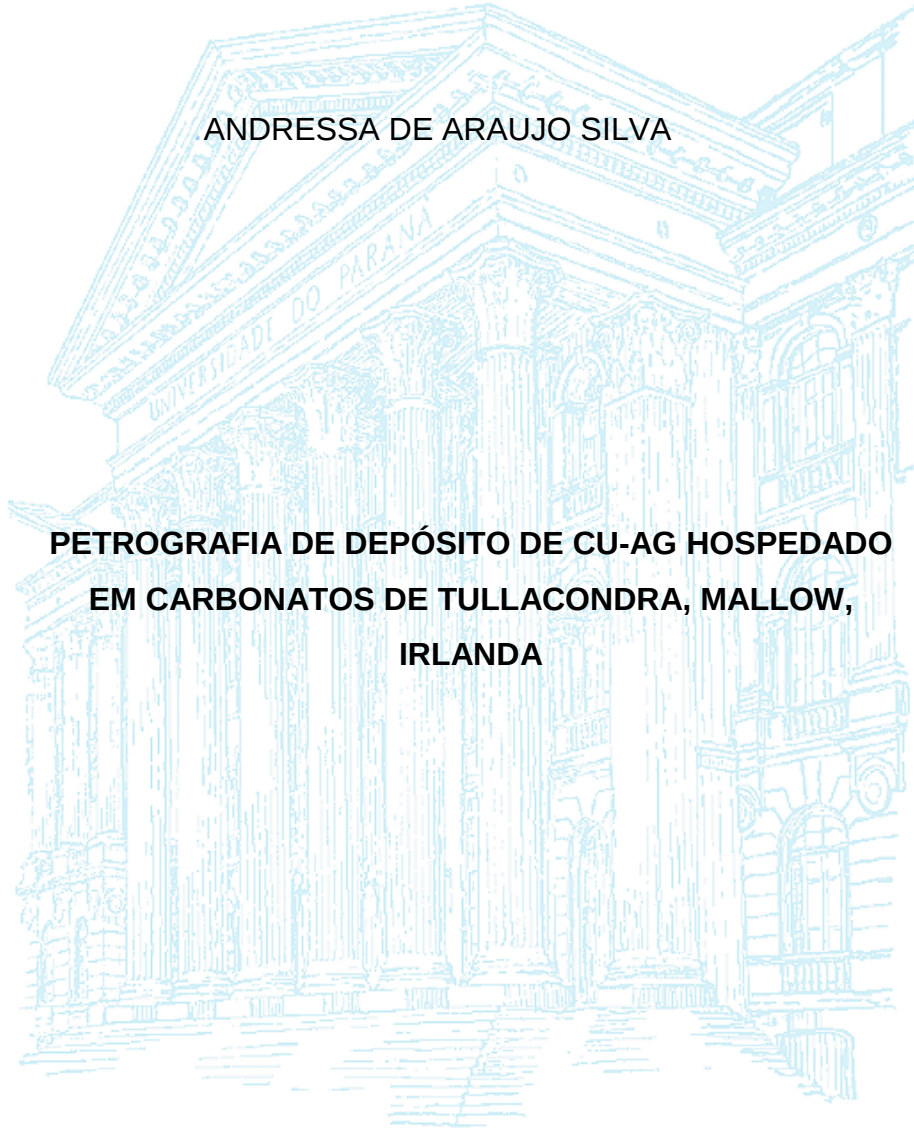


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

ANDRESSA DE ARAUJO SILVA

**PETROGRAFIA DE DEPÓSITO DE CU-AG HOSPEDADO
EM CARBONATOS DE TULLACONDRA, MALLOW,
IRLANDA**



Curitiba

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

ANDRESSA DE ARAUJO SILVA

**PETROGRAFIA DE DEPÓSITO DE CU-AG HOSPEDADO
EM CARBONATOS DE TULLACONDRA, MALLOW,
IRLANDA**

Trabalho de Conclusão de Curso da disciplina TCC-II (GC-132) do Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito para a conclusão do Curso de Graduação em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Filipe de Oliveira Cordeiro

Curitiba

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Universidade Federal do Paraná por ter me dado à oportunidade de realizar este curso gratuitamente.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Departamento de Geologia, em especial, aos meus orientadores de Iniciação Científica e de TCC, João Carlos Biondi e Pedro Cordeiro. Agradeço a vocês pela paciência e companheirismo. Tenho certeza que ganhei dois grandes amigos.

Agradeço ao LAMIR pela disponibilidade de espaço e equipamentos, especialmente aos técnicos Roberto e Leandro Keiji, e ao geólogo Guilherme Fedalto, que me instruíram na laminação, na petrografia e nas análises de EDS. Ao professor Cadu por me ajudar a usar a câmera do LAPEM.

Agradeço aos meus colegas de equipe de mapeamento Luiz Gilberto (Hermione), Sérgio Jaensch (der Schönste) e Taís Zorzetto (Zo) pelos momentos que passamos juntos este ano.

Agradeço aos demais colegas e amigos que estiveram do meu lado aqui ou durante o intercâmbio. Agradeço aos meus amigos Alberto Botelho, Hely Branco, Ana Carolina (Pirata), Ana Paula Rzepkowski, Vinicius Antunes, Pamella Caron e tantos outros por fazerem parte da minha vida durante a graduação.

Ao pessoal do Clube de Dança da UFPR pela oportunidade de estar sempre praticando minha atividade favorita (dança de salão).

Ao pessoal do Curso Pré-Vestibular Em Ação que lá em 2010 se doaram para me ajudar a passar no vestibular. Apesar de não contribuir muito, sou muito grata.

Ao pessoal do Student Chapter pelas discussões e atividades.

Aos meus pais e minha irmã linda pelo apoio e incentivo. Sem eles não chegaria até aqui.



„Gib
jedem Tag
die Chance,
dein schönstes
Sulfid
zu finden“

Silva, A.A.

RESUMO

O depósito de Cu-Ag de Tullacondra contém cerca de 3,6 Mt a 0,7% de Cu e 27,5 g/t de Ag. Situado a NNW e a 10 km da cidade de Mallow no condado de Cork, sul da Irlanda, está hospedado em rochas carbonáticas do estágio Courceyan (início do Carbonífero Inferior) da unidade *Lower Limestone Shale*. A unidade *Lower Limestone Shale* consiste de sedimentos marinhos de carbonatos argilosos. Esta unidade está sobre arenitos da unidade devoniana *Old Red Sandstone* e sob carbonatos micríticos do Complexo Waulsortion nos quais ocorrem os principais depósitos irlandeses de Zn-Pb tipo MVT e intrusões de rochas vulcânicas do final do estágio Courceyan e início do Chadian. É subdividida da base para o topo em *Lower Transition Beds*, *Upper Transition Beds*, *Uniform Calcareenite*, *Lower Shaly Calcareenite*, *Oolitic Calcareenite*, *Upper Shaly Calcareenite*, *Ballyvergin Shale* e *Tullacondra Limestone*. O principal objetivo desta monografia é detalhar os processos de formação metalogenética do depósito de Tullacondra e entender como depósitos de cobre formaram no mesmo ambiente mineralizador de depósitos Zn-Pb MVT. A fim de atingir esse objetivo, estudo detalhado de fluidos mineralizadores é necessário, o qual começa com trabalho petrográfico para o detalhamento de corpos de minério e da sequência paragenética. Propõe-se neste trabalho, então, estudar a petrografia de minério complementado com análises de Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios (MEV-EDS) de rochas que hospedam a mineralização de cobre-prata em Tullacondra. Como resultado, as rochas hospedeiras contêm principalmente calcita, quartzo, dolomita e muscovita, com traços de calcedônia, betume, rutilo, zircão, apatita, clorita, monazita, malaquita e hematita. Tem-se como principal sulfeto em todas as unidades do *Lower Limestone Shale* a calcopirita. Zonação vertical é comum entre tennantita, tetraédrita e possível freibergita/argentotennantita em amostras de camadas da base e de profundidade intermediária, enquanto bornita e calcocita ocorrem em camadas do topo e intermediárias. Cinco texturas de sulfetos têm sido diferenciadas: (a) disseminados; (b) paralelos ao acamamento; (c) maciços em vênulas discordantes ao acamamento; (d) euédrico em veio e (e) em estilólitos. Com base nestes resultados as seguintes conclusões foram tomadas: (1) A deposição das rochas hospedeiras seguiu inicialmente de arenitos para calcarenitos com intercalações de folhelhos e margas; (2) A estilolitização associada à mineralização evidencia origem epigenética do depósito; (3) Possível ordem de cristalização dos sulfetos foi: tennantita/tetraédrita/freibergita-argentotennantita → calcopirita → bornita → calcocita; (4) Os minerais muscovita, quartzo, dolomita, apatita, clorita, calcedônia e betume podem estar associados com a mineralização; (5) O encontro de fluido(s) oxidantes ricos em cobre, arsênio e ferro com camadas/fluidos salinos ricos em H₂S foi responsável pela precipitação dos sulfetos; (6) O depósito pode ter sido contemporâneo ao vulcanismo da região; (7) As texturas atestam para a migração de fluidos verticais acompanhados por percolação horizontal.

Palavras-chaves: Depósito de Cobre, Irlanda, Carbonífero Inferior, Petrografia, Sequência Paragenética, Textura de minério.

ABSTRACT

The Tullacondra deposit contains approximately 3.6Mt of 0.7% copper and 27.7g/t silver. It is situated 10 Km NNW of Mallow, a town in County Cork, Ireland, and is hosted in Lower Carboniferous (Courcayan age) carbonate rocks. Sulfide ore body at Tullacondra are restricted to the Lower Limestone Shale, a laterally equivalent limestone of the Navan Group that is above the stratigraphic level of the Old Red Sandstone and below of the Waulsortian Reef Complex. The Lower Limestone Shale at Tullacondra is subdivided in: Lower Transition Beds, Upper Transition Beds, Uniform Calcarenite, Lower Shaly Calcarenite, Oolitic Calcarenite, Upper Shaly Calcarenite, Ballyvergin Shale and Tullacondra Limestone. These units consist of calcarenite, shale, marl and sandstone. The aim of this study is to detail the metallogenetic formation processes of the Tullacondra deposit. For this purpose, bibliographic review, petrographic studies and SEM-EDS imaging were carried out. The principal gangue minerals are calcite, quartz, muscovite and dolomite, although chalcedony, bitumen, rutile, zircon, apatite, chlorite, monazite, malachite and hematite are also present. Chalcopyrite is the main sulfide and occurs throughout all units. Subsidiary tennantite, tetrahedrite and freibergite/argentotennantite are more abundant in basal and intermediate units, while bornite and chalcocite occur mainly in the near-surface part of the deposit. Five ore body textures have been differentiated: (a) disseminated sulfide; (b) layer-parallel sulfide; (c) discordant veinlet-hosted massive sulfide; (d) hosted-vein euhedral sulfide and (e) stylolite-hosted sulfide. Briefly, this research allowed the following conclusions: (1) the basal units consist of sandstones and the near-surface units consist of calcarenite. Marl and Shale interbedded are common; (2) Stylolitization associated with the mineralization suggests that the deposit is epigenetic; (3) Possible sulfite paragenetic sequence was: tennantite/tetraehdrite/freibergite-argentotennatite → chalcopirite → bornite → chalcocite; (4) Muscovite, quartz, dolomite, apatite, chlorite, chalcedony and bitumen crystallization may be related with the ore body mineralization; (5) The precipitation of the orebody took place likely when a rich-copper oxidant fluid reached an organic-rich reduced layer or when it mixed with low-temperature brines; (6) The deposit can be coeval with the regional volcanism activities; (7) The layered-parallel ore texture proves that verticals fluids migration may be followed by a lateral migration.

KEYWORDS: Copper deposit, Ireland, Lower Carboniferous, Petrography, paragenetic sequence, ore texture.

LISTA DE ABREVIATURAS

ap – apatita

bn – bornita

cal – calcita

ccp - calcopirita

chal – calcedônia

dol – dolomita

hem – hematita

mala – malaquita

mnz - monazita

ms – muscovita

qtz – quartzo

rt – rutilo

td – tetraedrita

tn – tennantita

zr – zircão

Fonte: Chace (1956) e Whitney & Evans (2010)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	10
3.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	10
3.2 GEOLOGIA LOCAL DA REGIÃO DE TULLACONDRA	15
3.3. MINERALIZAÇÃO	Erro! Indicador não definido.
4 RESULTADOS	18
4.1 PETROGRAFIA	18
4.1.1 UNIDADES ENCAIXANTES	18
4.1.2 CORPO DE MINÉRIO	24
4.1.3 TEXTURA DE MINÉRIO	27
4 DISCUSSÃO	30
4.1 PARAGÊNESE	30
4.1.1 ROCHAS HOSPEDEIRAS.....	30
4.1.2 ESTILOLITIZAÇÃO.....	30
4.1.3 MINERALIZAÇÃO DO CORPO DE MINÉRIO	32
4.2 MODELO DO DEPÓSITO E CONSIDERAÇÕES SOBRE O FLUIDO MINERALIZADOR.....	35
5. CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

A presente monografia refere-se ao estudo petrográfico de amostras do depósito de Tullacondra, localizado a NNW e a 10 km da cidade de Mallow no condado de Cork, sul da Irlanda (Fig. 1). Descoberto em 1973, é descrito como depósito de Cu e Ag contendo uma zona enriquecida em cobre, com aproximadamente 3,6 Mt a 0,7% de Cu e 27,5 g/t de Ag, e, ainda, uma zona enriquecida em prata de cerca de 0,6 Mt a 150 g/t Ag e 0,6% Cu (Wilbur & Royall, 1975; Wilbur & Carter, 1986).

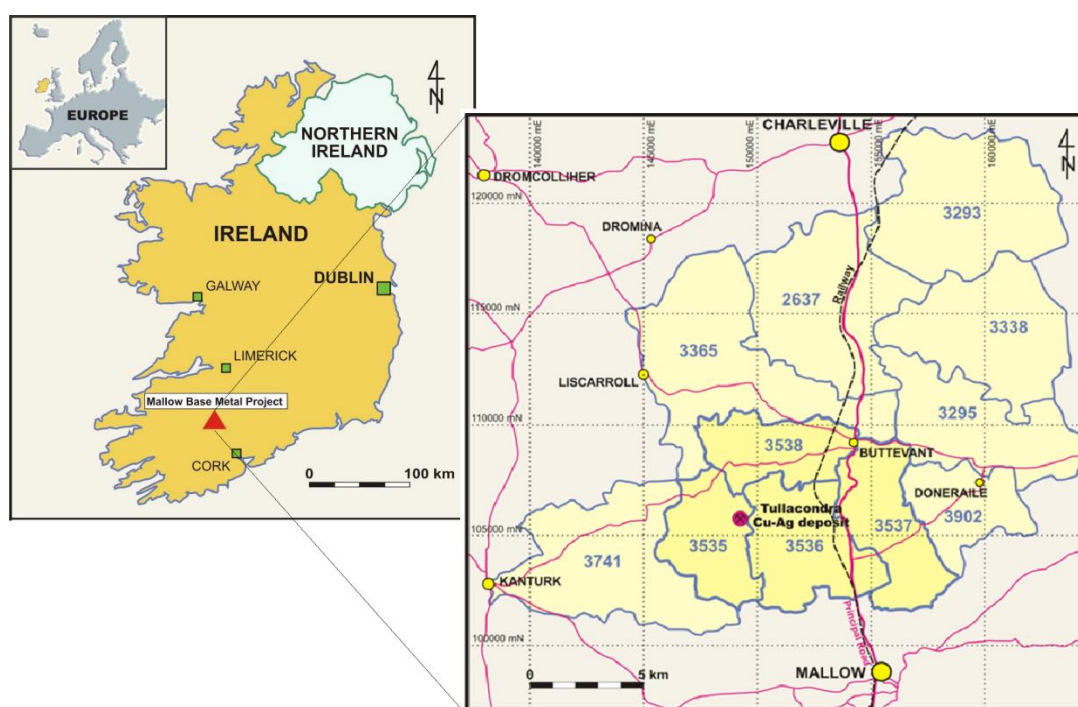


Figura 1 - Figura de localização do depósito de Tullacondra (Slowey, 2010). Em rosa estão as estradas de acesso e os círculos em amarelo a localização de centros urbanos.

O cobre é um importante metal utilizado na indústria base e confere diversidade de aplicações no desenvolvimento tecnológico industrial (Neto, 2010). Por isso, a exploração de cobre é importante, e geralmente segue modelos metalogenéticos. De acordo com Biondi (2003), modelo genético de um depósito é um modo simplista, mas prático e útil para explicar como se forma um depósito mineral. No Brasil e no mundo, vários são os modelos existentes utilizados para auxiliar na exploração de cobre. Exemplos destes modelos são os depósitos do tipo IOCG, de cobre-pórfiro, de segregação magmática, vulcanogênicos VMS e sedimentares detríticos (Jost *et al.* 2010). O depósito de cobre e prata Tullacondra é

pouco entendido e, dessa forma, estudos sobre a gênese do depósito devem ser úteis na elaboração de um modelo metalogenético, o qual, quem sabe, pode ser aplicado também na exploração de cobre e prata no Brasil.

Tullacondra está inserido em unidades de carbonatos argilosos da base de unidades carbonáticas que hospedam depósitos de Zn e Pb Mississippi-Vale Type (MVT), ambas do Carbonífero Inferior. Entretanto, depósitos de cobre e prata geralmente não se formam no mesmo contexto tectônico que grandes depósitos de zinco e chumbo do tipo MVT. Assim, uma das perguntas que ainda não foram respondidas é como os processos formadores de depósitos de cobre, como o de Tullacondra, se relacionam com a gênese de depósitos de zinco e chumbo na província.

A gênese de depósitos minerais pode ser detalhada por estudo de fluidos mineralizadores, o qual começa com trabalho petrográfico para o detalhamento de corpos de minério e da sequência paragenética. Propõe-se neste trabalho, então, estudar a petrografia de minério complementado com análises de Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios (MEV-EDS) de rochas que hospedam a mineralização de cobre-prata em Tullacondra. O objetivo é iniciar um estudo que possibilite o entendimento dos processos de formação metalogenética de Tullacondra e entender como depósitos tão não usuais se formaram no mesmo ambiente mineralizador de depósitos Zn-Pb MVT, que normalmente não possuem Cu em quantidades significativas. Desse trabalho espera-se responder as seguintes perguntas: (a) Qual é a sequência paragenética do depósito? (b) Quais modelos metalogenéticos conhecidos podem ser aplicados na gênese de Tullacondra? (c) Quais fluidos mineralizadores fizeram parte da deposição? (d) Qual a relação desses fluidos com a paragênese e com a textura de minérios?

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foi realizado levantamento bibliográfico e compilação de dados geológicos dos depósitos hospedados em rochas do Carbonífero do sul da Irlanda, em especial do depósito de Tullacondra. Para análise petrográfica foram selecionadas 23 amostras de testemunho de

sondagem de furo que corta o corpo mineralizado identificado como M73-3 (Fitzell, 1973). A identificação do furo segue a ordem: M de Mallow, 73 referente ao ano em que o furo foi feito (1973) e 3 é a sequência do furo em relação aos demais.

As amostras foram coletadas, cortadas e fotografadas pelo professor orientador durante seu trabalho de pós-doutorado da região centro-sul da Irlanda. Destas amostras, 23 foram confeccionadas lâminas polidas no Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia (DEGEOL) da UFPR. Em seguida, deu-se a descrição das seções polidas via microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida para caracterização da paragênese mineral do Laboratório de Pesquisa em Microscopia (LAPEM), também do DEGEOL, e do LAMIR. As amostras foram fotografadas em escala microscópica com o auxílio do *Software AxioVision* e de máquina fotográfica pertencente ao DEGEOL.

Para minerais não identificados por microscopia óptica, análises de 15 amostras pelo MEV-EDS (Microscópio Eletrônico de Varredura - Sistema de Energia Dispersiva) foram feitas no LAMIR. O dispositivo utilizado foi o JEOL JSM-6010LA operado sobre um vácuo a 20 Kv e com 15 segundos como tempo de aquisição com amostras previamente metalizadas. A metalização consistiu na precipitação, também a vácuo, de uma película micrométrica de ouro sobre a superfície do mineral, possibilitando a condução da corrente elétrica (Duarte *et al.*, 2003).

A relação de amostras com seções polidas confeccionadas e analisadas por EDS segue no quadro 1. As amostras são identificadas por M73-3 e terceiro componente relacionado à profundidade em que a amostra foi coletada em pés. M73-3-27, por exemplo, foi estava a 27 pés de profundidade.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 GEOLOGIA REGIONAL

A Geologia Regional tratada nesse capítulo refere-se à evolução tectônica e estratigrafia das principais unidades devonianas e carboníferas que hospedam depósitos de Zn-Pb e Cu da Irlanda. A evolução dessas rochas, assim como a estratigrafia, é importante para entender a gênese dos depósitos irlandeses.

As sequências sedimentares que hospedam depósitos de metais base assentam-se sobre o embasamento pré-devoniano caracterizado por terrenos acrescidos de rochas vulcânicas e metassedimentares falhadas e dobradas (Phillips & Sevastopulo, 1986; Gregg *et al.*, 2001). Esse embasamento registra a abertura e fechamento do Oceano Iapetus, no Neoproterozoico e Siluriano, respectivamente, durante a Orogenia Caledoniana (Phillips & Sevastopulo, 1986; Cawood *et al.*, 2001). Rochas aflorantes deste embasamento formam o Maciço de Leinster, na porção sudeste da Irlanda (Fig. 2 Max *et al.*, 1990).

Quadro 1 – Relação de amostras com seções polidas confeccionadas e analisadas por MEV-EDS

Amostra	Prof. (pés)	Prof. (m)	Seção Polida	MEV-EDS	Amostra	Prof. (pés)	Prof. (m)	Seção Polida	MEV-EDS
M73-3-027	27	8,23	X		M73-3-233	233	71,02	X	X
M73-3-039	39	11,89	X		M73-3-241	241	73,46	X	
M73-3-069	69	21,03	X		M73-3-254	254	77,42	X	X
M73-3-094	94	28,65	X	X	M73-3-283	283	86,26	X	X
M73-3-119	119	36,27	X	X	M73-3-293	293	89,31	X	X
M73-3-132	132	40,23	X		M73-3-318	318	96,93	X	X
M73-3-143	143	43,59	X		M73-3-328	328	99,97	X	X
M73-3-154	154	46,94	X	X	M73-3-347	347	105,77	X	X
M73-3-162	162	49,38	X	X	M73-3-374	374	113,99	X	X
M73-3-196	196	59,74	X		M73-3-393	393	119,79	X	X
M73-3-203	203	61,87	X		M73-3-412	412	125,58	X	X
M73-3-218	218	66,45	X	X					

Entre o Devoniano e o estágio *Arundian* no Carbonífero Inferior (coluna estratigráfica com os nomes das idades citadas neste trabalho está disponível na figura 3), o ambiente tectônico da região tornou-se extensional, o que permitiu a deposição da plataforma carbonática irlandesa. As sequências sedimentares da Irlanda depositaram-se no final do Devoniano Superior ao final do Carbonífero Inferior chegando ao estágio *Brigantian*. De forma resumida, consistem da bacia clástica de *Munster* sotopostas por carbonatos Carboníferos da Província de *Midlands* que se estendem até o norte da Irlanda (Fig. 2 Johnston, 1999). A sequência reflete uma transgressão progressiva para o norte e posterior subsidência durante o Carbonífero Inferior (Andrew, 1992).

A base da sequência das rochas sedimentares da Irlanda inicia-se com espessas camadas de arenitos e lamitos verdes, cinza e vermelhos, finos a médios

da unidade *Old Red Sandstone* (ORS), depositadas no final do Devoniano ao longo da Bacia de *Munster* no sul da Irlanda (Fig. 2 Johnston, 1999). Conglomerados e arenitos conglomeráticos ocorrem localmente (Hitzman & Large, 1986; Phillips & Sevastopulo, 1986). Graham (1983) sugeriu como origem para as ORS leques desenvolvidos nas terminações de sistemas fluviais.

Sobrejacentes aos arenitos do ORS deu-se início à deposição da plataforma carbonática irlandesa no início do Carbonífero (estágio *Courceyan*) com carbonatos do Grupo Navan (Fig. 3). A deposição de carbonatos indica o início da transgressão marinha na plataforma irlandesa no final do devoniano (Hitzman & Large, 1986). No sul e centro das *Midlands*, o Grupo Navan consiste de sedimentos marinhos de carbonatos argilosos e folhelhos denominados como *Lower Limestone Shale* (Philcox, 1984).

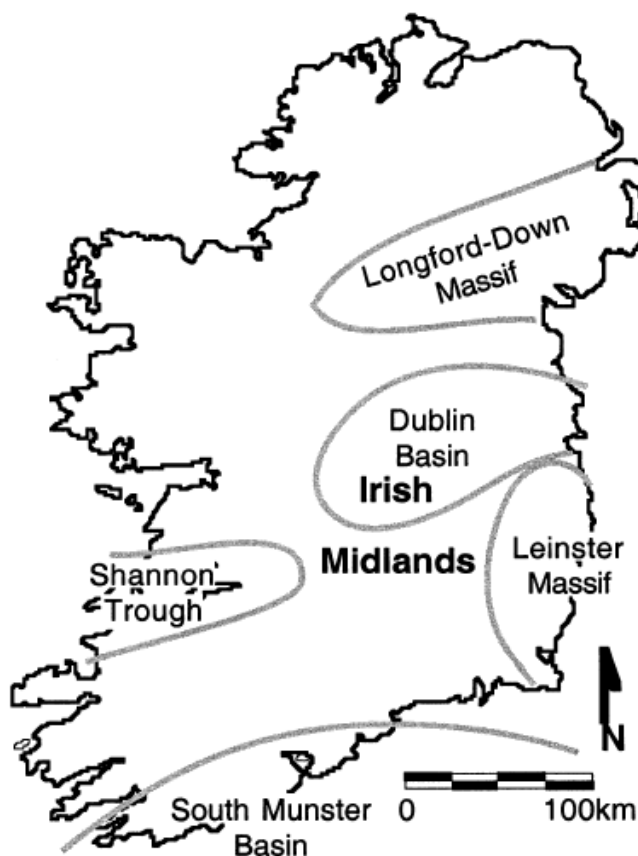


Figura 2 – Maiores províncias estratigráficas da Irlanda. Notar localização da *Irish Midlands*, província na qual ocorrem as rochas carbonáticas que hospedam os maiores depósitos de metais bases do carbonífero irlandês. Fonte: Gregg *et al.* (2001)

Sobreposto ao Grupo Navan encontram-se carbonatos micríticos do Complexo *Waulsortian* que abrangem depósitos do *Courceyan* Médio no sul ao começo do *Chadian* no NE (Fig. 3) (Lees, 1961; Hitzman & Large, 1986). Muitas das mineralizações que ocorrem em rochas carbonáticas na Irlanda estão litoestratificamente restritas a rochas do *Waulsortian* e do Grupo Navan, ou em seu equivalente lateral *Lower Limestone Shale*, como no caso de Mallow (Johnston, 1999).

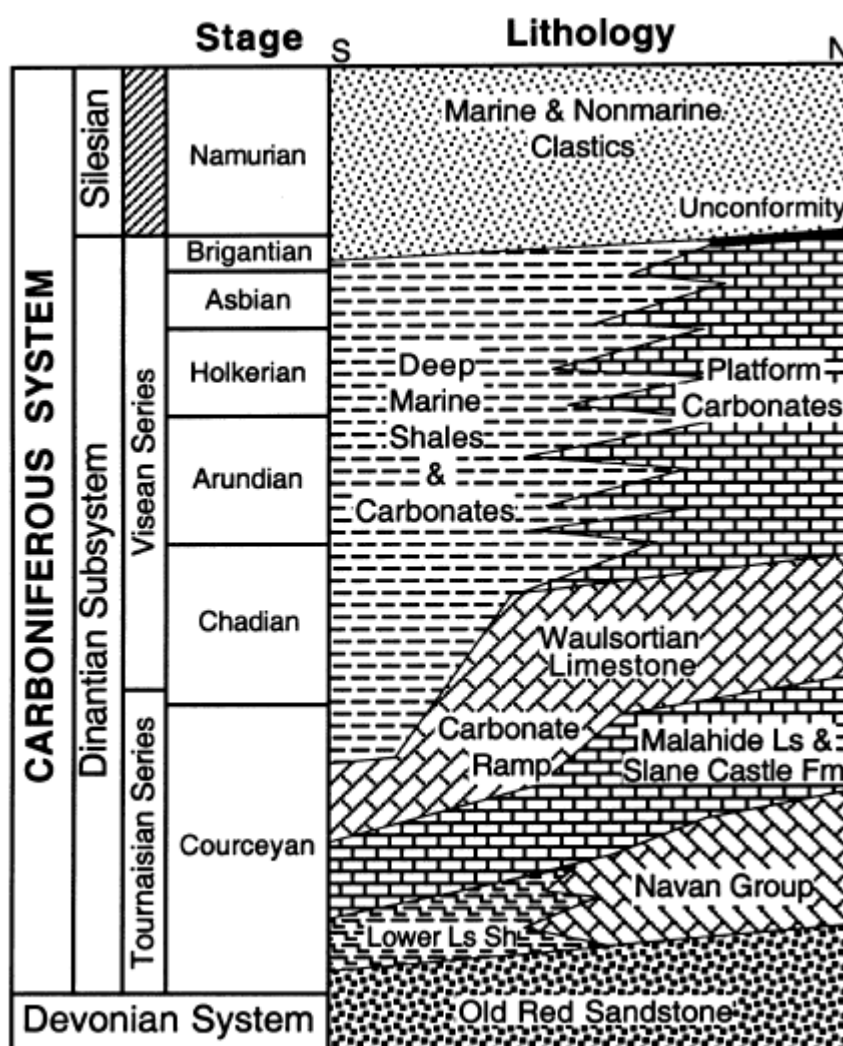


Figura 3 – Coluna geológica mostrando estratos e relações de fácies do *Irish Midlands*. Fonte: Gregg *et al.* (2001). Notar posição do Lower Limestone shale, carbonatos argilosos equivalente ao sul do Grupo Navan, que hospedam o depósito de Mallow.

Vulcanismo evidenciado por diques máficos, bandas finas de tufos, de composição bimodal a alcalino, do *Chadian* ao *Asbian*, intrude rochas da base da plataforma carbonática irlandesa na porção oeste e sul da bacia (Hitzman & Large,

1986). Rochas vulcânicas do *Chadian* e *Asbian* parecem estar associadas diretamente com depósitos de cobre de Gortdrum no sul da Irlanda (Steed, 1986) e ocorrem também nas proximidades de Mallow (Wilbur & Carter 1986).

Entre o final do Carbonífero e o Permiano, a Orogenia Herciniana afetou as rochas carbonáticas irlandesas mudando o regime tectônico de extensional para compressional/transpressional (Hitzman & Large, 1986). A deformação herciniana envolveu metamorfismo, plutonismo e fortes compressões NS (Hitzman & Large, 1986, Wilbur & Carter, 1986) associadas à reativação de falhas caledonianas NE-SW (Fig. 4 Johnston 1999). Zonas de empurrões predominaram no sul da Irlanda (Wilbur & Carter, 1986), enquanto cisalhamentos com componentes dextrais E-NE ou N-NE eram também comuns (Johnston 1999). Ao norte da Irlanda, registros dos efeitos dessa compressão são menos comuns e se ocorrem como amplos dobramentos ao longo de eixos EW com falhamentos reversos e de cavalgamento menores (Fig. 4 Wilbur & Carter, 1986).

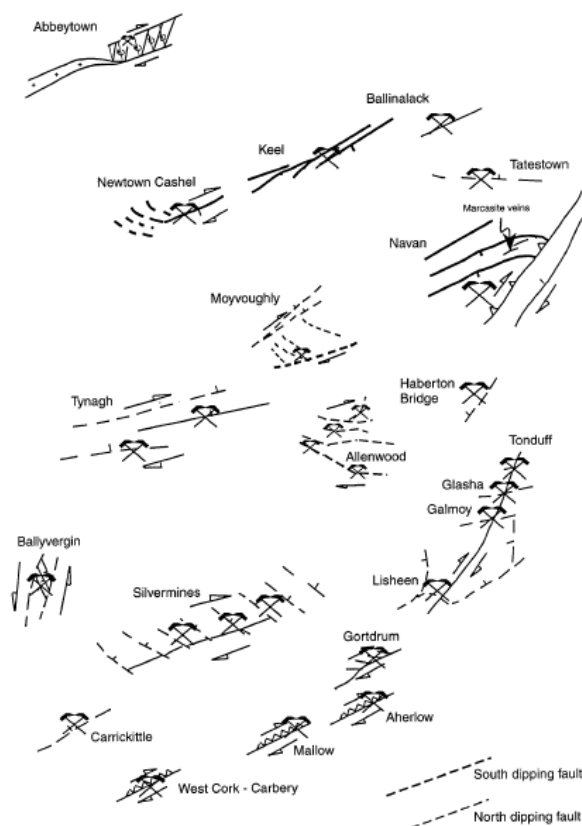


Figura 4 – Ilustração do ambiente estrutural dos depósitos de metal base da Irlanda. Sem escala. Notar predomínio de zonas de cavalgamento no sul e transcorrências dextrais no país como um todo. Dobramentos parecem ser mais comuns no norte. Além disso, as falhas seguem um padrão NE e padrões de mergulho diferentes entre sul e o norte. Fonte: Johnston (1999).

3.2 GEOLOGIA LOCAL DA REGIÃO DE TULLACONDRA

As unidades hospedeiras do depósito de Tullacondra estão localizadas no flanco norte da anticlinal *Kilmaclenine* (Fig. 5 e 6). O depósito é caracterizado por dois corpos de minério, um sub-vertical rico em Cu e outro *stratabound* rico em Ag (Fig. 6 Wilbur & Carter, 1986). Os estratos contidos no flanco são compostos por rochas do Devoniano Superior ao Carbonífero Inferior. A anticlinal ocorre ao longo do eixo E-NE com flancos de mergulhos suaves para o norte e para o sul e é cortada por cavalgamentos ENE-WSW e falhas normais de direções N-S (Fig. 5 Wilbur & Carter 1986).

A unidade basal, exposta no centro da anticlinal, é o *Old Red Sandstones* (ORS) (Fig. 5) composta por arenitos a argilitos de mais de 500 m de espessura do Devoniano Superior (Wilbur & Carter 1986). Acima do ORS estão os carbonatos e calcarenitos do *Courceyan* (início do Carbonífero Inferior) pertencentes ao *Lower Limestone Shale* subdivididos da base para o topo em *Lower* e *Upper Transition Beds*, *Uniform Calcarenite*, *Lower Shaly Calcarenite*, *Oolitic Calcarenite*, *Silty Calcarenite*, *Upper Shaly Calcarenite*, *Ballyvergin Shale*, *Tullacondra Limestone* e a Formação *Kilmaclenine* (Fig. 6 e Quadro 2 James, 2013). Os detalhes litológicos e de espessura de cada uma dessas unidades são descritos a seguir e estão sumarizados no Quadro 1 com base nos trabalhos de Wilbur & Carter (1986) e James (2013).

As Séries de Transição *Lower* e *Upper Transition Beds* consistem em arenitos, arenitos calcários, folhelhos, calcarenitos, conglomerados e carbonatos conglomeráticos de cerca de 2 a 30 m e 3 a 28 m de espessura, respectivamente, sendo a primeira série mais arenosa e a segunda mais argilosa (James, 2013). Entre as séries de transição aparece característico horizonte de hematita (Quando 2). Conhecido como *Hematite Marker*, este horizonte é constituído por uma camada fina menor que 1 m de espessura que contém pequenas e frequentemente arredondadas concentrações de hematita (Wilbur & Carter, 1986).

Acima das séries de transição é identificado o *Uniform Calcarenite*, variando de 3 a 10 m de espessura de calcarenitos maciços (James, 2013). Em seguida, ocorre o *Lower Shaly Calcarenite* composto por calcarenitos uniformes intercalados

com calcarenitos folhelhosos de 5 a 18 m de espessura. Variando de 5 a 15 m ocorrem calcarenitos crinoidais e oolíticos do *Oolitic Calcarenites*, sobrepostos por um segundo *Horizonte Marker* chamado de *Ballyvergin Shale* (James, 2013).

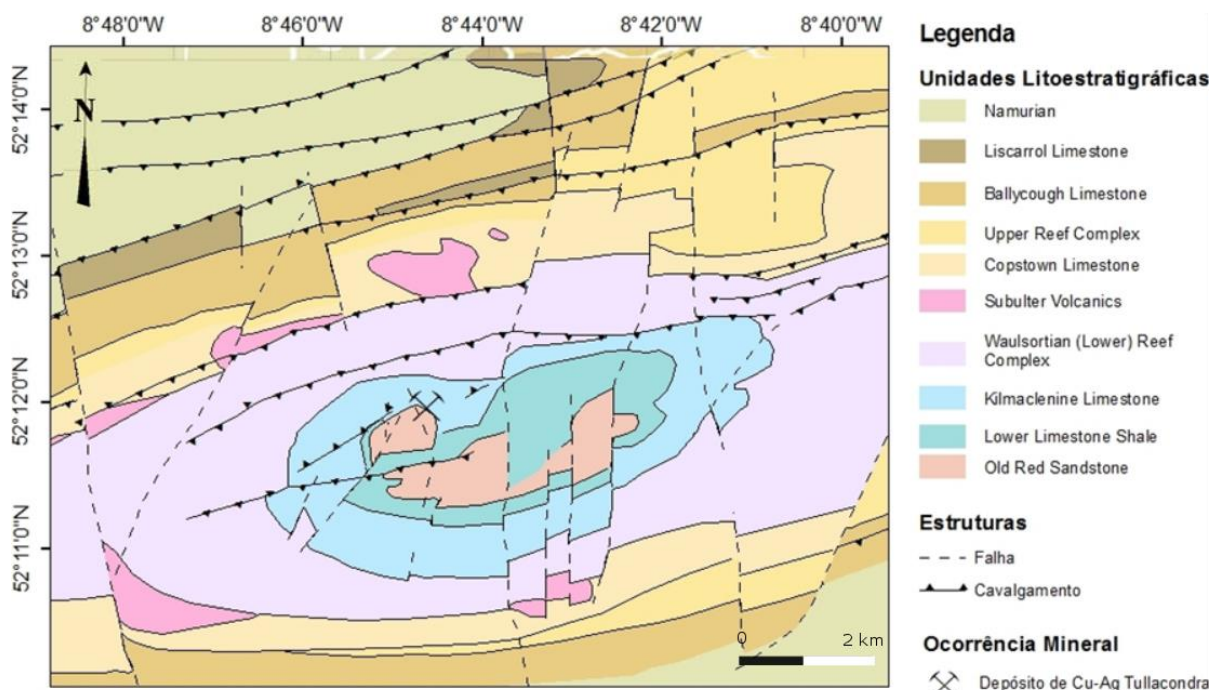


Figura 5 – Mapa geológico da anticlinal Kilmaclenine no noroeste de Mallow. Notar a localização do depósito de Cu-Ag hospedado em carbonatos expostos junto com arenitos da série ORS próximo ao núcleo da anticlinal Kilmaclenine. Posicionamento das principais unidades litoestratigráficas, assim como estruturas de cavalcamento e falhamentos associados à Orogenia Herciniana aparecem no mapa (Wilbur & Carter, 1986).

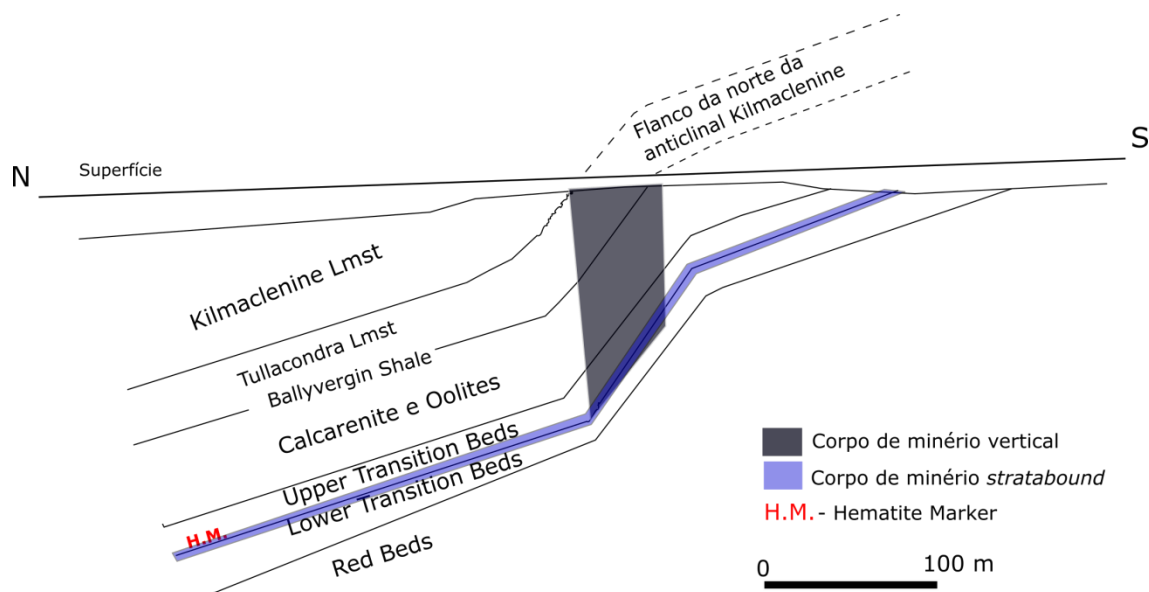


Figura 6 – Secção transversal N-S do flanco norte da anticlinal *Kilmaclenine*. Notar a disposição das unidades do *Lower Limestone Shale* e das zonas de mineralização sub-vertical rica em cobre e *stratatabound* rica em prata. Fonte: Wilbur & Carter (1986).

O *Ballyvergin Shale* é composto por folhelho cinza esverdeados finos de 0.1 a 1.7 m de espessura (James, 2013). Esse horizonte é um marcador característico conhecido no sudoeste das *Midlands* (Fig. 6 Wilbur & Carter 1986). Superior a este marcador ocorrem camadas da unidade *Tullacondra Limestone* com 10 a 45 m de espessura de carbonato médio acinzentado bioclástico com finas camadas irregulares de folhelho. Acima das rochas de *Tullacondra* são identificadas camadas da Formação *Kilmaclenine* compostas por calcarenitos uniformes crinoidais, algumas vezes dolomitizados (Fig. 5 James, 2013).

Quadro 2 – Estratigrafia das rochas do *Lower Limestone Shale* em Tullacondra.

Fonte: James (2013)

ESPESSURA (m)	UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	LITOLOGIA DOMINANTE
10 - 45	Tullacondra Limestone	Calcarenito médio cinza bioclástico com finas camadas de folhelho
0,1 - 0,7	Ballyvergin Shale	Folhelho cinza acinzentado
10 - 40	Upper Shaly Calcarenite	Calcarenito médio acinzentado bioclástico com abundantes camadas de folhelho
2 - 7	Silty Calcarenite	Calcarenito cinza escuro poucos fósseis
5 - 15	Oolitic Calcarenite	Calcarenito bioclástico e oolítico
5 - 18	Lower Shaly Calcarenite	Calcarenito uniforme com intercalações de calcarenito siltosos
3 - 10	Uniform Calcarenite	Calcarenito maciço sem folhelho
3 - 28	Upper Transition Beds	Folhelho escuro, calcarenito arenoso e arenito
0,1 - <1	Hematite Marker	Banda(s) difusa(s) com pequenos grãos de hematita
2 - 30	Lower Transition Beds	Arenito, arenito calcareo, folhelho, conglomerado, carbonato conglomerático
>500	Old Red Sandstone	Siliciclásticas; red beds, arenito quartzítico, folhelho, conglomerado

O Complexo *Waulsortian* aparece logo acima das unidades do *Lower Limestone Shale*, pertence ao topo do *Courceyan* e consiste de calcilutito dolomitizado e de uma base silicificada, de 450 a 600 m de espessura, localizado próximo ao centro da anticlinal (Fig. 5). Sobrepostas ocorrem as Vulcânicas *Subulter* do *Chadian* compostas por finas camadas de rochas piroclásticas de 0 a 100 m e localizam-se a oeste do depósito. Mais ao topo e nas bordas da anticlinal são descritas camadas de carvão, arenitos e carbonatos das formações *Copstown*, *Upper Reef Complex*, *Ballyclough*, *Liscarrol* e *Namurian*, formações do final do Carbonífero Inferior (James, 2013).

4 RESULTADOS

4.1 PETROGRAFIA

Dados petrográficos foram obtidos por microscópios de luz transmitida e refletida, e, para os minerais não identificados, foi utilizado análises de EDS. Das 23 amostras descritas é exposto nesse trabalho dados petrográficos das unidades encaixantes, do corpo e textura de minério.

4.1.1 UNIDADES ENCAIXANTES

As rochas hospedeiras estudadas são arenitos, calcarenitos, margas e folhelhos pertencentes às unidades da base para o topo: *Lower Transition Beds*, *Upper Transition Beds*, *Uniform Calcarenite*, *Lower Shaly Calcarenite*, *Oolitic Calcarenite*, *Upper Shaly Calcarenite*, *Ballyvergin Shale* e *Tullacondra Limestone* do *Lower Limestone Shale* (*Courceyan* Inferior – início do Carbonífero). Amostras do *Hematite Marker* e do *Old Red Sandstones* não foram estudadas neste trabalho. De forma geral, as unidades da base são mais arenosas e do topo carbonáticas, com recorrentes intercalações de folhelhos e margas (Quadro 3). As principais características de cada unidade com base em descrições petrográficas seguem abaixo.

Quadro 3 – Principais características das rochas hospedeiras dos minérios de Tullacondra nas amostras estudadas

Unidade	Amostras	Espessura*	Características da seções polidas por unidade	Assembleia Mineral
Tullacondra Limestone	M73-3-27 M73-3-39 M73-3-69 M73-3-94	28 m	Calcarenito médio com bioclastos e veios de calcita. Localmente fino. Ocorrência de calcedônia em bioclastos e veios.	$cal \pm dol \pm qtz \pm chal \pm mala \pm hem$
Ballyvergin Shale	M73-3-119	1 m	Folhelho cinza esverdeado.	$ms \pm cal \pm dol \pm qtz \pm ap \pm chl \pm zr \pm rt$
Upper Shaly Calcarenite	M73-3-132 M73-3-143 M73-3-154 M73-3-162 M73-3-196 M73-3-203 M73-3-218 M73-3-233 M73-3-241 M73-3-254	40 m	Calcarenito médio cinza claro com bioclastos intercalados por camadas de marga e folhelho cinza claro a escuro. Feições estilolíticas são comuns e ocorrem algumas vezes no meio de clastos. Ocorrência de calcedônia em bioclastos e veios.	$cal \pm dol \pm qtz \pm ms \pm chal \pm rt \pm ap \pm zr$
Oolitic Calcarenite	M73-3-283 M73-3-293	9 m	Calcarenito médio cinza claro com feições estilolíticas locais. Ocorrência de quartzo euédrico.	$cal \pm dol \pm qtz \pm ms \pm zr$
Lower Shaly Calcarenite	M73-3-318 M73-3-328	14 m	Marga fina a localmente média cinza esverdeada com feições estilolíticas locais.	$cal \pm dol \pm qtz \pm ms \pm rt$
Uniform Calcarenite	M73-3-347	4 m	Arenito médio com feições estilolíticas locais.	$qtz \pm cal \pm ms \pm rt$
Upper Transition Series Beds	M73-3-374	9 m	Arenito médio esverdeado.	$qtz \pm cal \pm ms \pm mnz$
Lower Transition Beds	M73-3-393 M73-3-412	12 m	Arenito médio esverdeado e folhelho cinza escuro brechado com veio e vênulas de calcita.	$qtz \pm cal \pm ms \pm rt$

* Espessura segundo Fitzell (1973)

Lower Transition Beds

Duas amostras foram estudadas nesta unidade. A M73-3-412 é caracterizada como arenito médio verde claro e a M73-3-393 como folhelho cinza escuro brechado com veios e vênulas de calcita. O arenito consiste predominantemente de quartzo com menores proporções de calcita e traços de rutilo e muscovita (Fig. 7a), enquanto o folhelho possui predominantemente quartzo e muscovita com menores proporções de calcita (Fig. 7b). Em ambas as amostras, muscovita ocorre euédrica tabular (Fig. 7c) e rutilo anédrico, algumas vezes granular (Fig. 7d). A ocorrência de rutilo ao longo de algumas unidades foi comprovada por análises de EDS, como mostra a Fig. 7d.

Upper Transition Beds

Embora essa unidade seja considerada mais rica em pelitos do que a *Lower Transition Beds* (James, 2013; Wilbur & Carter 1986), a amostra da unidade (M73-3-374) é um arenito. Este arenito é médio esverdeado, consistindo de quartzo, calcita e traços de muscovita, monazita e rutilo (Fig. 7e). Assim como em todas as amostras, a muscovita é euédrica e os demais minerais são subédricos a anédricos. Veios locais de calcita são descritos.

Uniform Calcarenite

A amostra M73-3-347 é um arenito médio cinza esverdeado composto por quartzo e calcita e traços de muscovita e rutilo. Feições estilolíticas ocorrem localmente associadas à muscovita euédrica (Fig. 7f). Apesar de ser uma unidade calcarenítica, a amostra que caracteriza a mesma é um quartzo-arenito.

Lower Shaly Calcarenite

As amostras M73-3-318 e M73-3-328, pertencente ao *Lower Shaly Calcarenite*, caracterizam-se de marga muito fina a média cinza esverdeada composta por calcita, quartzo, muscovita com traços de rutilo. Estas rochas são carbonáticas argilosas e ocorrem comumente associadas a estilólitos (Fig. 8a).

Oolitic Calcarenite

As amostras do *Oolitic Calcarenite* são as M73-3-283 e M73-3-293 e consistem de calcarenito médio cinza claro composto por calcita e quartzo com traços de dolomita, muscovita e rutilo (Fig. 8b). As amostras dessa unidade apresentam cristais de quartzo anédricos a euédricos prismáticos com inclusões de zircão (Fig. 8c). Veios e vênulas de calcita ocorrem.

Upper Shaly Calcarenite

A unidade *Upper Shaly Calcarenite* é a que apresenta maior número de amostras descritas, sendo elas: M73-3-132, M73-3-143, M73-3-154, M73-3-162, M73-3-196, M73-3-203, M73-3-218, M73-3-233, M73-3-241 e M73-3-254. A unidade consiste de calcarenito médio cinza claro intercalado por camadas de marga e folhelho cinza claro a escuro.

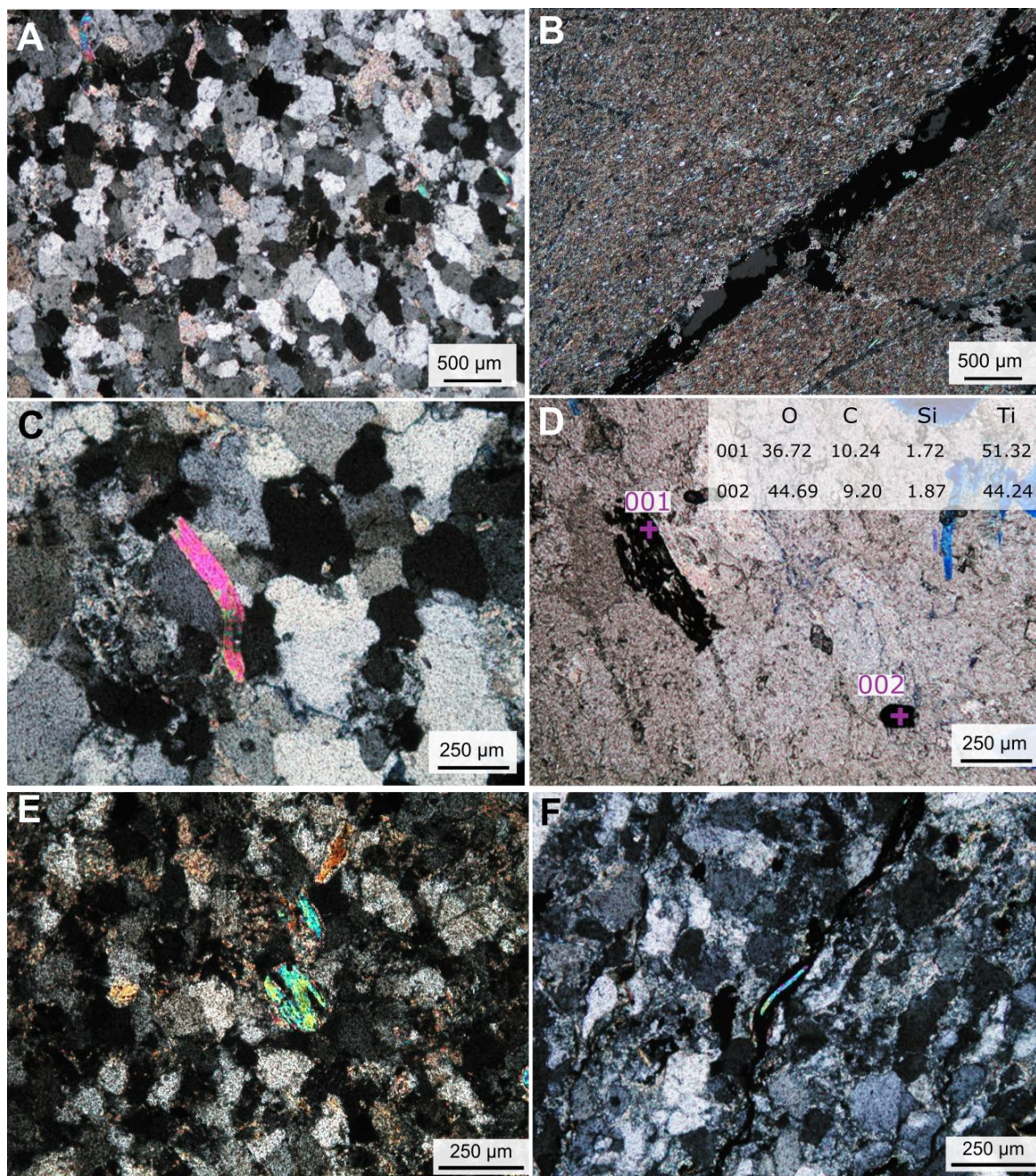


Figura 7 – Fotomicrografias de amostras do *Lower Transition Beds* de arenito médio (a), (c) e (d), e folhelho (b); (a) Arenito ocorre com quartzo e traços de calcita; (b) Folhelho com vênula de calcopirita e tennantita (mineral opaco); (c) Muscovita euédrica tabular, comum em todas as unidades estudadas; (d) Cristais de rutilo e resultado de sua composição por EDS. (e) Seção polida de arenito médio esverdeado da *Upper Transition Beds*. Notar cristais de muscovita, quartzo e calcita; (f) Seção polida de arenito da *Uniform Calcarenite*. No centro da imagem f a muscovita ocorre em estilólito.

A única amostra de folhelho do *Upper Shaly Calcarenite* estudada é a M73-3-241. O folhelho é cinza claro a amarelado, localiza-se na base da unidade e é composto por muscovita, quartzo, dolomita, calcita e traços de rutilo, apatita e zircão (Fig. 8d). Tons amarelos na rocha ocorrem devido alteração para jarosita. O calcarenito desta unidade é caracterizado pelas amostras M73-324, M73-3-218,

M73-3-203 e M73-3-196. Estas amostras são rochas bioclásticas (Fig. 8e) e, algumas vezes, esparíticas sem bioclastos, compostas principalmente por calcita com subordinada dolomita, quartzo e zircão. A marga é a principal litologia desta unidade e é descrita nas amostras M73-3-233, M73-3-218, M73-3-162, M73-3-154, M73-3-143 e M73-3-132. Estas amostras consistem de clastos e bioclastos de calcita médios em meio a quartzo, muscovita e dolomita de granulação fina a muito fina (Fig. 8f).

Estilolitos são comuns e ocorrem por vezes em volta dos clastos médios de calcita ou cortando os mesmos (Fig. 8f). Ocorrência de calcedônia foi comprovada por análises de EDS na substituição de bioclastos e em veios tanto em calcarenitos quanto em margas (Fig. 8g e 8h). Localmente marga pode ocorrer brechada com matriz composta por material muito fino a fino.

Ballyvergin Shale

O folhelho pertencente a esta unidade é o M73-3-119. É caracterizado pela cor cinza claro a escuro e composto por muscovita, quartzo, calcita e dolomita com traços de apatita, clorita, zircão e rutilo (Fig. 9a). Clastos de calcita estão localmente preservados em meio a matriz predominantemente fina com traços de muscovita euédrica, e rutilo e zircão anédricos granulares. Apatita euédrica e clorita de granulação média são descritas localmente associadas a sulfetos (Fig. 9b).

Tullacondra Limestone

A unidade *Tullacondra Limestone* está situada no topo de todas as outras unidades com amostras descritas neste trabalho e é representada pelas seções polidas M73-3-27, M73-3-39, M73-3-69 e M73-3-94. A unidade é composta principalmente por calcarenito bioclástico médio cinza claro localmente fino e subordinadamente por marga, consistindo de calcita, calcedônia, dolomita, traços de malaquita e hematita (Fig. 9c). Substituições de bioclastos por calcedônia e calcita são comuns e dobras convolutas micrométricas nas porções muito finas a finas de carbonatos ocorrem. Estilolitos ocorrem no contorno de clastos, assim como na *Upper Shaly Calcarenite*. O topo da unidade (M73-3-27) é descrito localmente como dolomito cinza avermelhado sem bioclastos, com traços de malaquita e hematita (Fig. 9d). Veios e vênulas de calcita ocorrem ao longo de toda unidade.

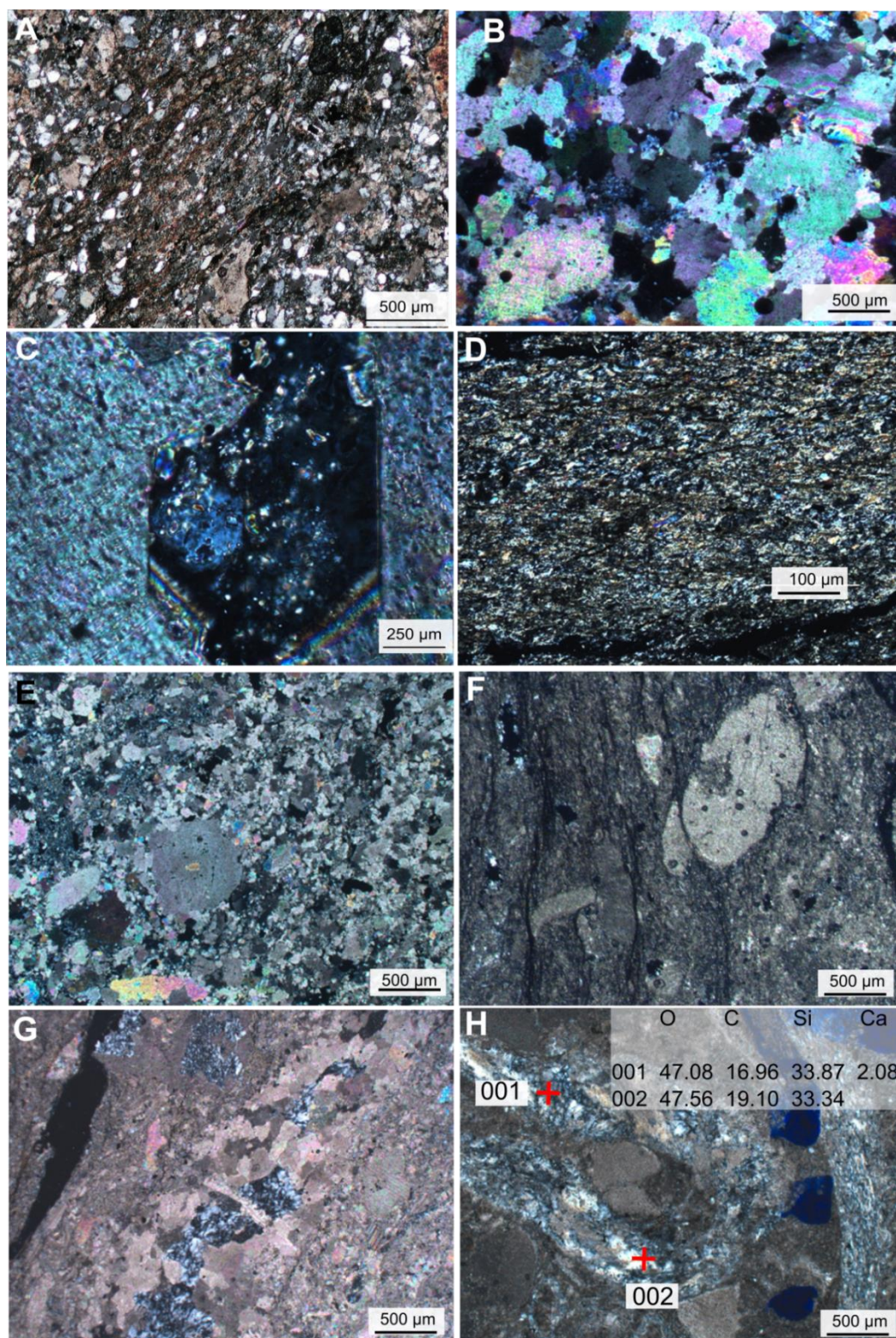


Figura 8 – (a) Fotomicrografia de marga da *Lower Shaly Calcarenite*. Na seção polida, a granulação da rocha varia entre muito fina a fina (cor castanho escuro) e média (composta predominantemente por cristais de quartzo); (b) Fotomicrografia de calcarenito da *Oolitic Calcarenite*. Em (c) ocorre cristal de quartzo subédrico com inclusões de zircão. Notar que o cristal está parcialmente dissolvido no lado esquerdo superior. (d) Fotomicrografia de folhelho de granulação muito fina; (e) Fotomicrografia de calcarenito com bioclasto (feição arredondada a esquerda da foto); (f) Micrografia de marga com clasto de calcita cortada por estilolito; (g) Fotomicrografia de veio de calcedônia em calcarenito, e (h) calcedônia substituindo bioclastos.

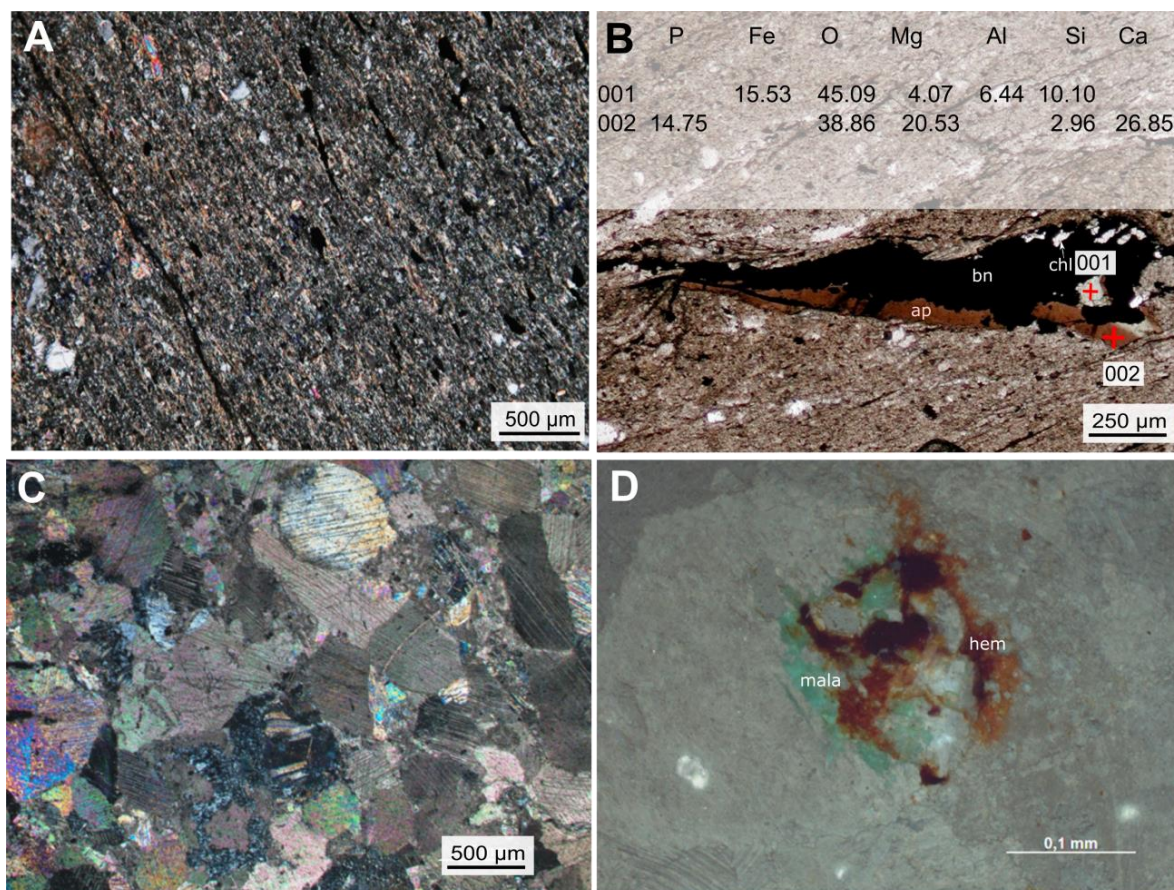


Figura 9 – (a) Fotomicrografia de folhelho do *Ballyvergin Shale* de granulação fina com alguns clastos maiores de quartzo e muscovira; (b) Cristal de bornita espacialmente associada com apatita e com inclusões de clorita; (c) Seção polida de calcarenito bioclastico do *Tullacondra Limestone*; (f) Malaquita e hematita em calcarenito bioclastico. Imagem de microscópio de luz refletida em nicois cruzados.

4.1.2 CORPO DE MINÉRIO

As rochas estudadas hospedam corpo de minério vertical que consiste principalmente de calcopirita, com variações de bornita, calcocita, tennantita, tetraedrita e provável argentotennantita/freibergita. Bornita e calcocita predominam nas unidades do topo, enquanto tennantita e tetraedrita ocorrem em níveis médios da *Upper Shaly Calarenite* ou em unidades basais como a *Lower Shaly Calarenite* e a *Lower Transition Beds* (Fig. 10). O corpo de minério *stratabound* não foi registrado nas amostras desse trabalho.

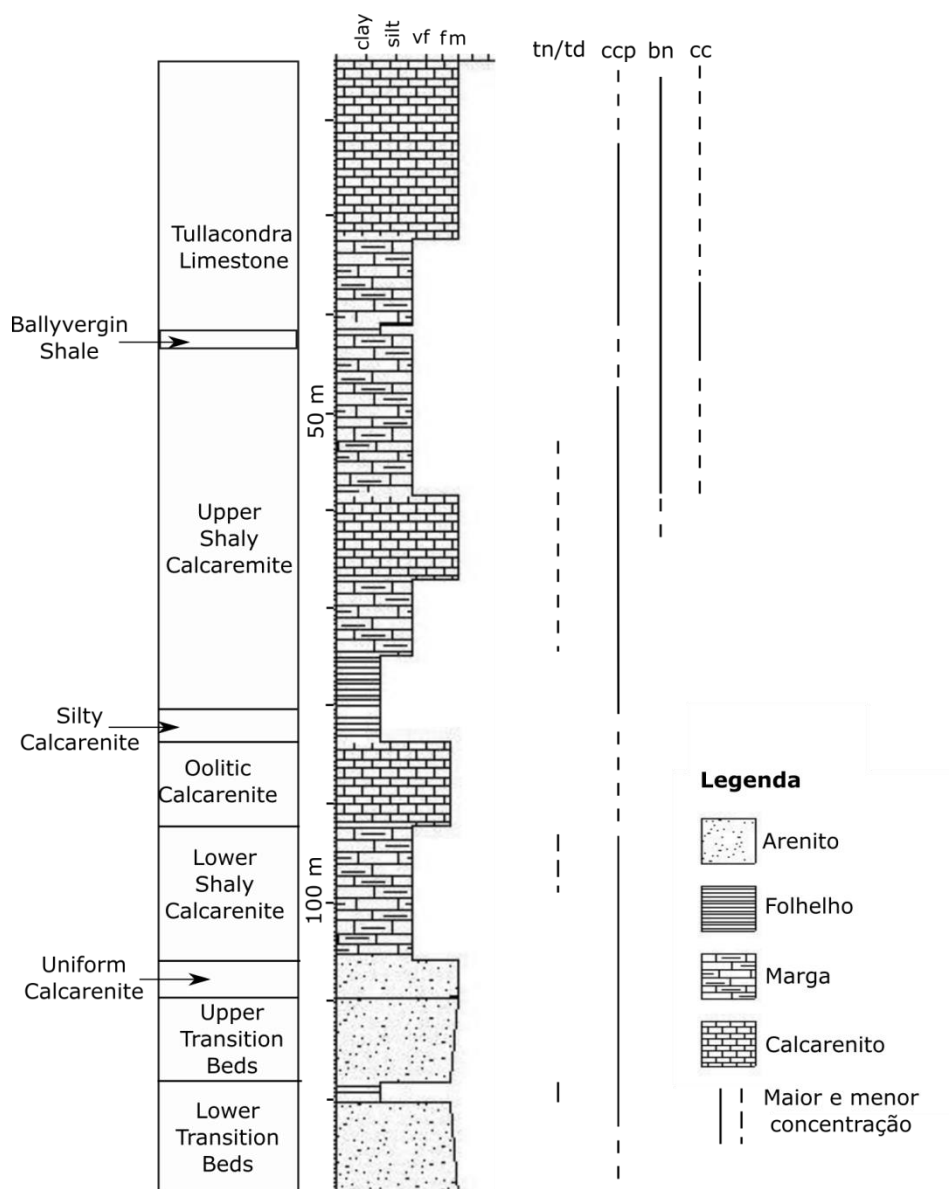


Figura 10 – Coluna estratigráfica simplificada com base em relatório de descrição do furo 3 da Fitzell (1973) e de descrições petrográficas. Notar a variação dos sulfetos e das rochas hospedeiras ao longo da coluna.

Nas amostras estudadas é comum a ocorrência de zonações entre os sulfetos. No topo e em profundidades intermediárias ocorrem zonações de calcopirita envolvida por bornita e calcocita nas bordas (Fig. 11a), ou apenas entre bornita e calcocita. Em profundidades intermediárias a basais, a tennantita e tetraedrita ocorrem no núcleo junto à calcopirita ou mais raramente com bornita nas bordas (Fig. 11b-e). Associados aos sulfetos é comum à ocorrência de material castanho escuro a luz refletida com alto teor de carbono (Fig. 11f). Esse material castanho é interpretado como betume, material recorrente em rochas carbonáticas na Irlanda (Parnell 1993).

Segundo análises de EDS, a tennantita pode consistir não somente de sulfeto de As, Cu e Fe, mas também de Zn e/ou Sb (Fig. 11b-d). Nesses casos sua composição é semelhante à da argentotennantita e a freibergita, sulfetos que normalmente apresentam prata associada (Pracejus, 2008). No depósito de Cu-Ag-Hg de Gortdrum hospedados nas mesmas unidades que Tullacondra, Steed (1986) detectou Hg na tennantita, elemento não ocorrente nas amostras de Mallow.

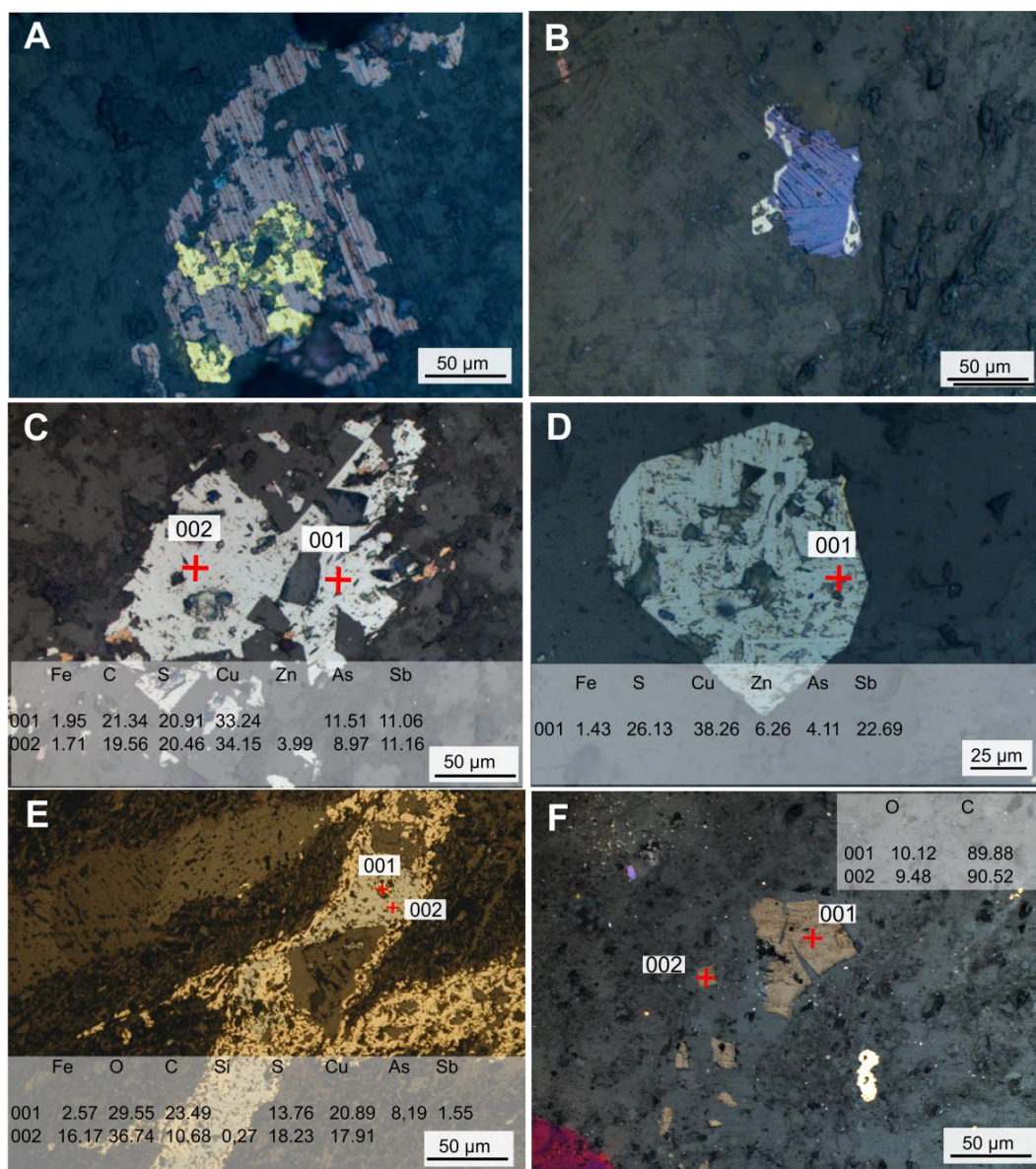


Figura 11 – Fotomicrografias em luz refletida em nicóis paralelos com dados de EDS. (a) Calcopirita no centro com zonação de bornita (rosa) e calcocita (azul) nas bordas; (b) Calcocita (azul) com zonações de tennantita na borda; (d) Possível Argentotennantita (ou freibergita) em cinza claro com pontuais bornitas na borda (em rosa); (e)) Possível Argentotennantita (ou freibergita); (f) Cristal de tennantita no centro (cinza esverdeado) e calcopirita na borda. (a) Material de cor castanho escuro rico em carbono identificado em quase todas das amostras do corpo de minério vertical;

4.1.3 TEXTURA DE MINÉRIO

Ao menos cinco texturas de minérios foram identificadas: sulfeto disseminado, paralelo ao acamamento, maciço discordantes a sub-paralelos em vênulas, discordante euédrico hospedado em veio e associados a estilolitos. Essas texturas foram diferenciadas com base na relação do minério com a rocha hospedeira e da associação com veios e estilolitos.

Disseminado

Sulfetos disseminados são os mais abundantes e ocorrem em todas as unidades e litologias (Fig. 12a-b). Como principais características, costuma ser muito fino a médio com hábitos subédricos, a localmente euédricos. Consistem de calcopirita, bornitas e calcocitas em níveis superiores, e tennantita e tetraedrita em maior profundidade.

Paralelo ao acamamento

Subordinadamente aos sulfetos disseminados, sulfetos paralelos ao acamamento ocorrem em folhelhos e margas, e são finos a médios, subédricos a anédricos e alongados. Consistem de calcopirita, bornita e calcocita (Fig. 12c-d). Nos folhelhos, ocorrem junto com sulfetos disseminados.

Maciços discordantes a sub-paralelos

Essa textura ocorre em vênulas de calcopirita e localmente bornita, calcocita e tennantita. São sulfetos maciços de espessura milimétrica e hábito anédricos (Fig. 12e-f) que ocorrem principalmente em folhelhos do *Ballyvergin Shale*, dos *Upper Shaly Calcarenite* e *Lower Transition Beds*.

Discordante hospedado em veio

Bornita média ocorre hospedada em veio discordante as camadas de calcarenito da unidade *Tullacondra Limestone*. Diferente dos sulfetos descritos em vênulas, a bornita ocorre subordinada a calcita e tem hábito euédrico retangular (Fig. 12g-h). Este tipo de textura foi descrita em apenas uma seção polida.

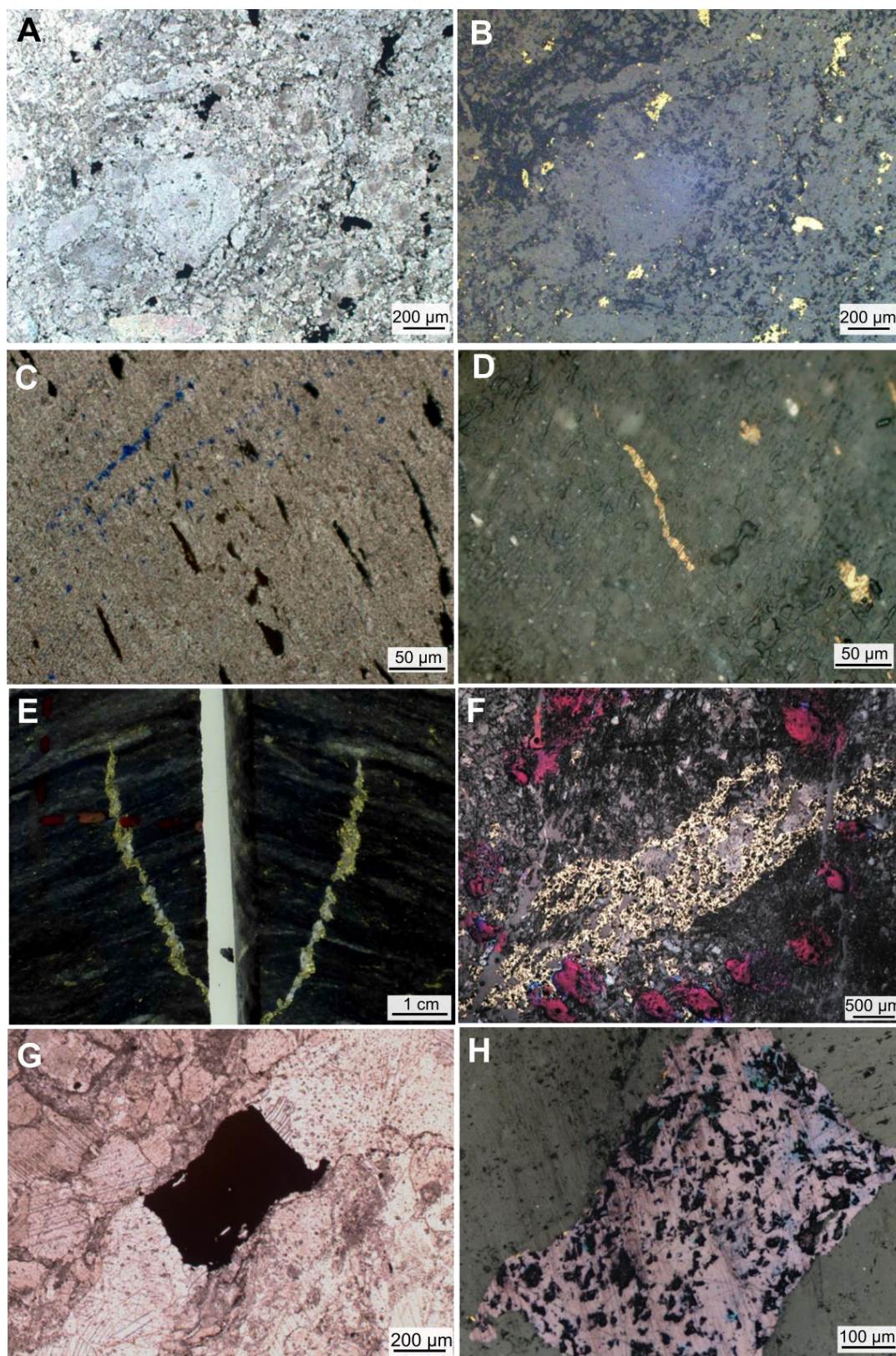


Figura 12 – (a) e (b) Fotomicrografias a luz transmitida e refletida, respectivamente, com cristais de calcopirita com textura disseminada; (c) e (d) Fotomicrografias a luz transmitida e refletida, respectivamente, com cristais de calcopirita (amarelo) e bornita (rosa) com textura paralela ao acamamento; (e) e (f) Amostra de mão e seção polida a luz refletida de vênula de calcopirita maciça e discordante ao acamamento; (g) e (h) Fotomicrografias a luz transmitida e refletida, respectivamente, com cristal euédrico de bornita com exsoluções de calcocita em veio de calcita.

Associada a estilolitos

Minerais como calcopirita, tennantita, bornita e muscovita ocorrem algumas vezes junto a estilolitos. Isto ocorre em unidades com feições estilolíticas como a *Tullacondra Calcarenita*, Upper Shaly Calcarenite e a Uniform Calcarenite (Fig. 13a-f).

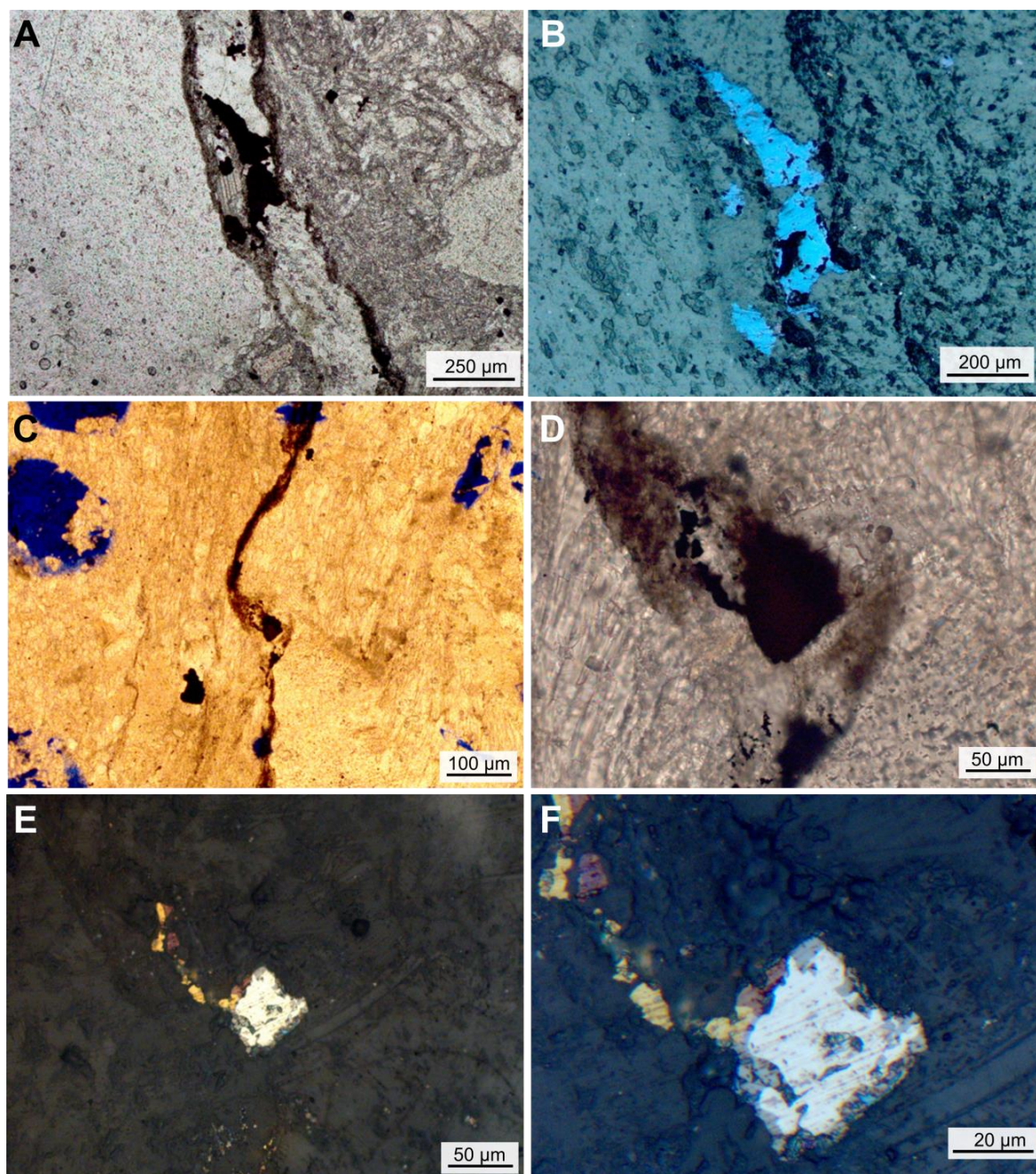


Figura 13 - Fotomicrografias de luz transmitida e refletida de sulfetos associados à estilolitos. (a), (b) e (c) Cristal de calcocita; (d), (e) e (f) cristal de tennantita com calcopirita (amarelo) e bornita (rosa).

4 DISCUSSÃO

Com base em descrições petrográficas das rochas hospedeiras e das texturas de minério, e em revisão bibliográfica são propostos: uma sequência paragenética, possíveis modelos metalogenéticos e a evolução dos fluidos mineralizantes.

4.1 PARAGÊNESE

4.1.1 ROCHAS HOSPEDEIRAS

Inicialmente, no final do Devoniano e início do *Courceyan* (Carbonífero Inferior), ocorreu deposição das rochas clásticas do *Old Red Sandstone* seguida de carbonáticas e siliclásticas finas do *Lower Limestone Shale* (Hitzman & Large, 1986). As amostras estudadas neste trabalho sugerem que ocorreu a deposição de sedimentos clásticos, como quartzo, monazita, zircão e rutilo, com precipitação de calcita. A origem detrítica dos minerais clásticos é descrita por alguns autores. O'Connor *et al.* (1989), por exemplo, registra a ocorrência de zircão e monazita no granito Leinster, sudeste da Irlanda, possível fonte do zircão e monazita de Mallow, e Duane (1988) de rutilo detrítico no depósito de Cu-Ag-Hg de Gortdrum.

4.1.2 ESTILOLITIZAÇÃO

Estilolitos são estruturas comuns nas amostras de Tullacondra e propõe-se que sejam formadas depois da deposição das rochas hospedeiras no depósito, ocorrendo associados à mineralização. A formação tardia dessa estrutura é evidenciada pela presença de clastos de calcita cortados por estilolito (Fig. 14a-b). Além disso, de acordo com Nicolaidis & Wallace (1997) e Lind (1993), são estruturas diagenéticas de soterramento e a profundidade mínima requerida para sua formação é de 800 m. Conforme mostra o diagrama de Reed & Wallace (2001 Fig. 15) para região de Courtbrown, cerca de 70 km de distância e a noroeste de Mallow, essa profundidade corresponderia ao final do *Courceyan* e início do *Chadian* para sedimentos do *Lower Limestone Calcareenite*, portanto posterior à deposição das rochas hospedeiras.

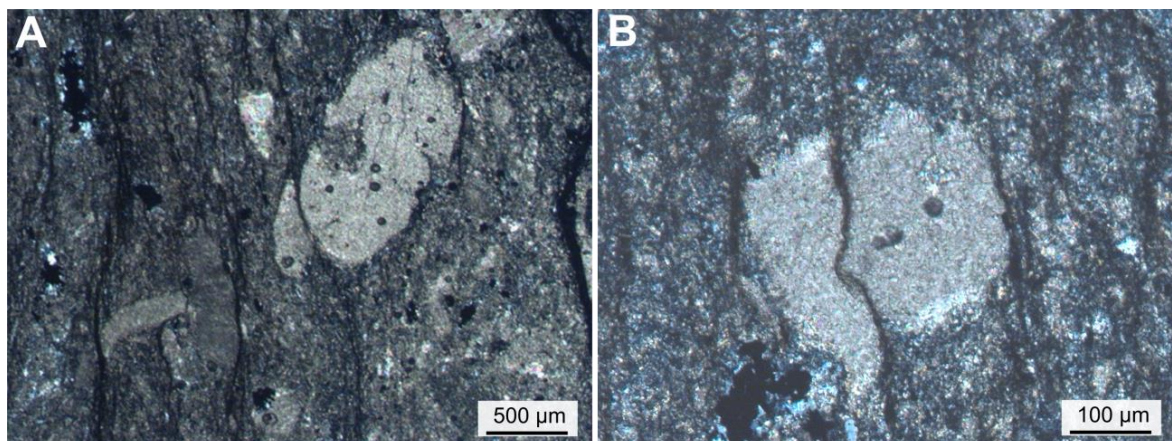


Figura 14 – Estilolitos no meio de clastos de calcita em marga da unidade Upper Shaly Calcarenite.

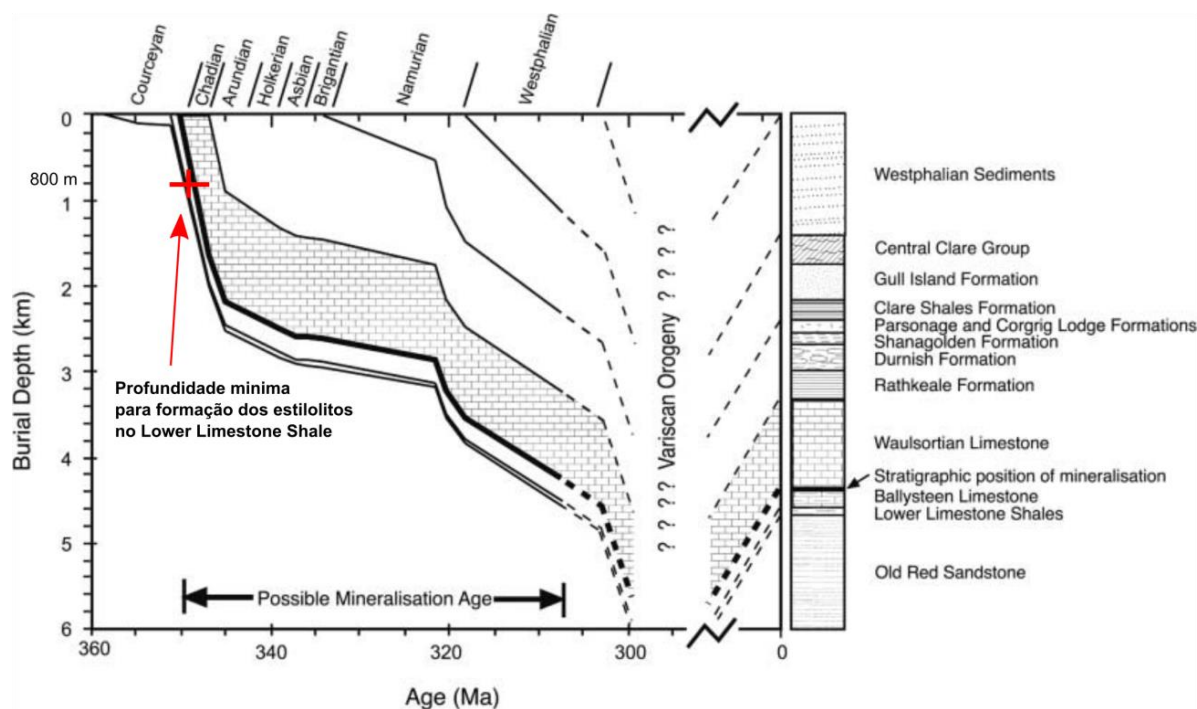


Figura 15 – Diagrama de história de soterramento para a região de Courtbrown, sudoeste da Irlanda e noroeste de Mallow (adaptado de Reed e Wallace 2001). A 800 m de profundidade (profundidade mínima para a formação de estilolitos) estilolitos das camadas do *Lower Limestone*. Calcarenito são formados no final do *Courceyan*, início do *Chadian* (cruz vermelha na figura). Sulfetos de Tullacondra ocorrendo dentro de estilolitos sugerem que idade de mineralização poderia ser igual ou posterior a estilolitização.

Nas amostras estudadas alguns sulfetos estão ao longo dos estilolitos, formando as texturas estilolíticas, e são, dessa forma, epigenéticos com provável idade mínima de mineralização para o final do *Courceyan*. Em depósitos de Pb-Zn hospedados no Complexo *Waulsortian*, como *Silvermine* e *Courtbrown* (Reed & Wallace, 2001; Reed & Wallace, 2004), sulfetos substituem resíduos insolúveis ao longo de estilolitos.

4.1.3 MINERALIZAÇÃO DO CORPO DE MINÉRIO

Propõe-se neste trabalho que a mineralização do corpo vertical tenha começado com a deposição de sulfetos de arsênio, seguida por sulfetos de cobre e ferro. Isso porque, unidades da base e de profundidades intermediárias possuem zonações em cristais de sulfetos de arsênio no centro, como tennantita, tetrahedrita e possível freibergita ou argenntotennantita, de acordo com análises de EDS, e com calcopirita na borda. Nas unidades do topo a calcopirita ocorre no centro e bornita e calcocita nas bordas (Fig. 16a-b). Supondo que a cristalização começou das unidades basais para as do topo e que os minerais do centro das zonações foram os primeiros a formar, a seguinte sequência de cristalização é esperada: tennantita/tetraedrita/freibergita-argentotennantita → calcopirita → bornita → calcocita. Essa sequência paragenética é citada por Duane (1988) para o depósito de Cu-Hg de Gortdrum hospedados nas mesmas unidades que Mallow e inversa para o depósito de Pb-Zn de Lesheen hospedada em carbonatos do Complexo Waulsortian (Hitzman *et al.* 2002).

A presença de muscovita euédrica, quartzo euédrico e calcedônia pode ter relação com a mineralização. Embora muscovita euédrica em carbonatos da região de Tullacondra seja descrita como detritica por Clipstone & Roycroft (1992), evidências de origem hidrotermal existem. Um exemplo disso é a ocorrência de muscovita ao longo de estilólitos (Fig. 16c), comprovando que, assim como os sulfetos, muscovita formou-se depois ou durante a estilólitização. Além disso, muscovita descrita nesta monografia ocorre principalmente associada a camadas com maior concentração de sulfetos, outra evidência de associação entre esses minerais. Quartzo euédrico em carbonatos, com possíveis feições de dissolução (Fig. 16d), mostram que estes cristais poderiam ter cristalizado por fluidos de temperaturas elevada, e estes fluidos poderiam posteriormente ter dissolvido cristais de quartzo. Por sua vez, cristais de calcedônia ocorrem em veios e na substituição de carbonatos nas unidades do topo e é descrita por alguns autores como alteração junto com dolomitos e hematitas em depósitos de Pb-Zn no *Waulsortian* (Hitzman *et al.*, 2002). Dolomitização é também esperada, uma vez que a dolomita ocorre principalmente nas zonas de maior mineralização. Entretanto, mais estudos são necessários para entender a sequência de alterações em Tullacondra.

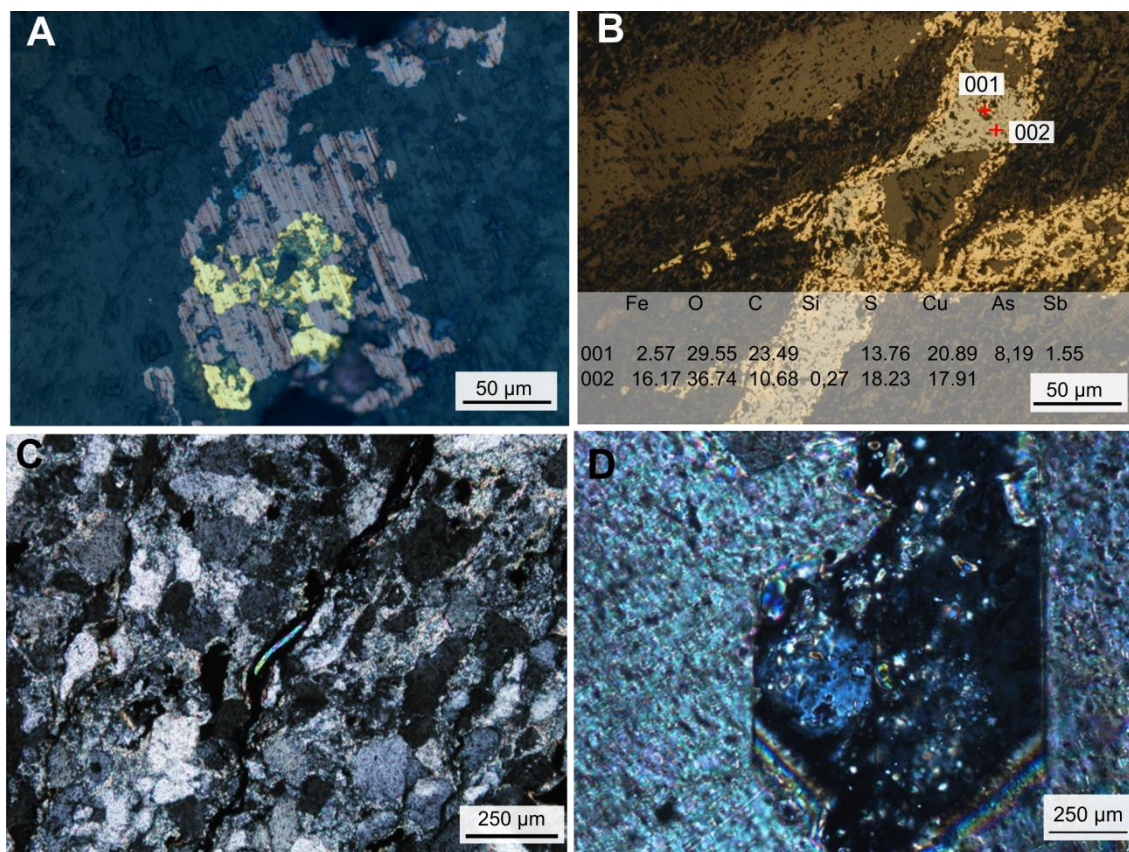


Figura 16 – (a) Fotomicrografia em luz refletida de cristal zonado com calcopirita (amarelo) no centro, e bornita (rosa) e calcocita (azul) nas bordas. Seção Polida da *Upper Shaly Calcarenite*; (b) Fotomicrografia em luz refletida com dados de EDS de cristal zonado com tennantita no centro (cinza esverdeado) e calcopirita na borda (amarelo). Seção polida da *Upper Transition Series*; (c) Fotomicrografia em luz transmitida de muscovita em estilolito da *Uniform Calcarenite*; (d) Quartzo euédrico mostrando possível superfície solubilizada do quartzo no lado esquerdo superior do quartzo do *Oolitic Calcarenite*.

Outros minerais que ocorrem localmente associados com os sulfetos são apatita e clorita. No *Ballyvergin Shale*, esses minerais estão dispostos junto a cristais de bornita e calcocita. Neste caso, a apatita está euédrica com granulação média, mesma dos sulfetos, enquanto a clorita ocorre inclusa na bornita. Com suporte de análises de EDS, material carbonoso de cor castanho escuro a luz refletida, possível betume, é descrito nas amostras estudadas e é comum em camadas com maiores teores de sulfetos. Rochas carboníferas da Irlanda contêm ampla ocorrência de betume sólido, o qual pode estar enriquecido em inclusões da mineralização. Parnell (1993) sugere que muitos betumes de carbonatos irlandeses foram depositados com sulfetos a partir de fluidos hidrotermais. Segundo autor, estes fluidos teriam extraído matéria orgânica solúvel da rocha e reprecipitado betume enriquecido em metais. Apesar de não ser encontrado enriquecimento de metais em betume de Mallow, a possibilidade de ocorrência de betume associado à mineralização existe. Por fim,

minerais de alteração supergênica são comuns em rochas da superfície de Tullacondra. O principal é a hematita, seguido por traços de malaquita. Com base nessas informações segue abaixo a sequência paragenética proposta (Fig. 17):

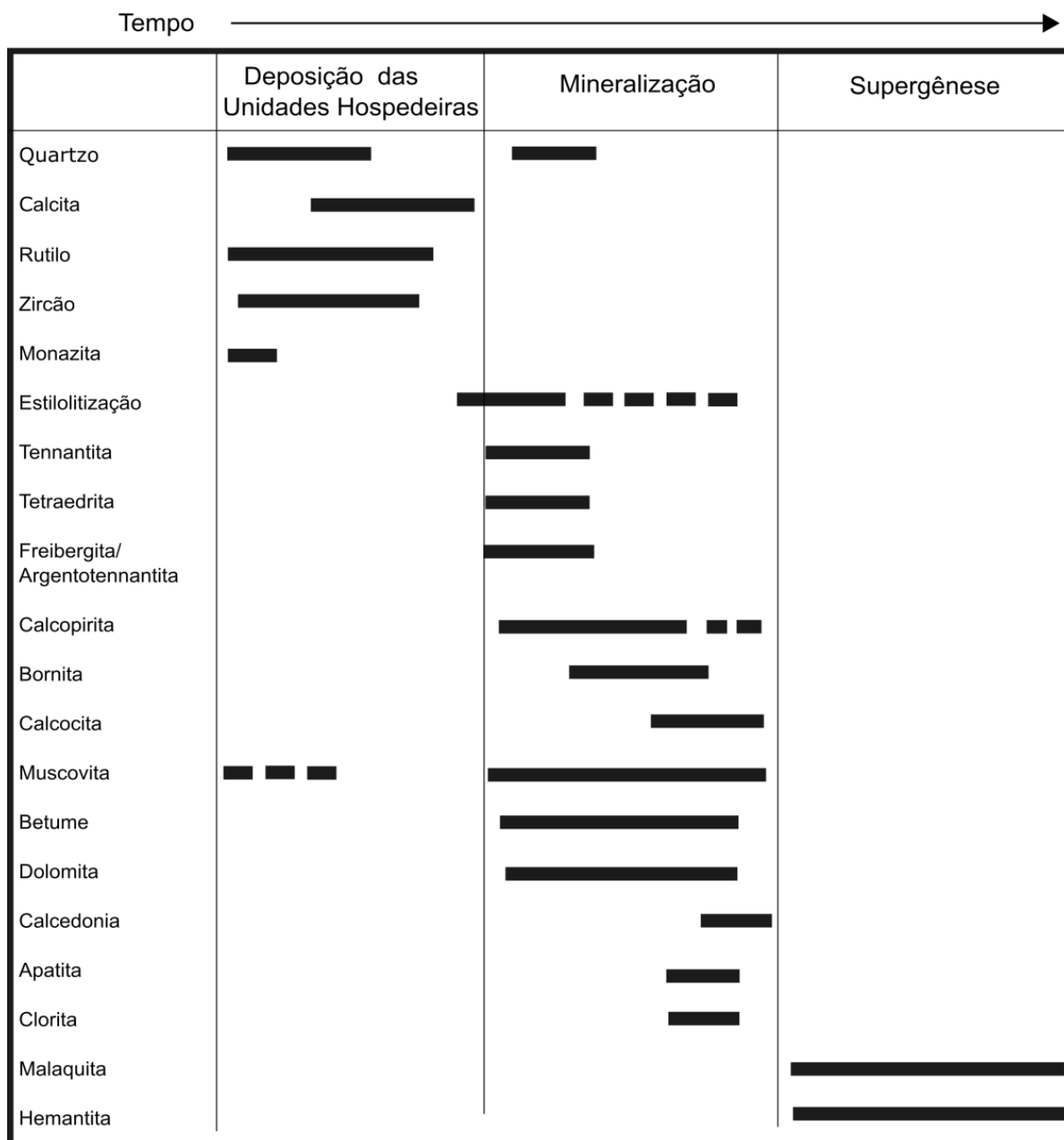


Figura 17 – Sequência paragenética proposta para o depósito de Tullacondra.

4.2 MODELO DO DEPÓSITO E CONSIDERAÇÕES SOBRE O FLUIDO MINERALIZADOR

O presente trabalho propõe dois modelos metalogenéticos para a formação dos depósitos de Tullacondra: a partir do encontro de fluidos oxidantes ricos em cobre, arsênio e ferro com camadas redutoras ricas em matéria orgânica (Fig. 18a) ou a partir da mistura de fluidos oxidantes ricos em cobre, arsênio e ferro com fluidos redutores rico em matéria orgânica (Fig. 18b). O primeiro modelo é considerado para depósitos tipo *White Pine*, depósitos sedimentares de cobre com comum zonação de pirita, calcopirita, bornita e calcocita (Ripley *et al.*, 1985). Nestes casos, minerais ricos em cobre (bornita e calcocita) substituem sulfetos ricos em ferro (pirita e calcopirita) em folhelhos carbonosos. A segunda possibilidade é semelhante com o que é descrito na literatura para depósitos de Zn-Pb irlandeses tipo MVT, e envolve a mistura de fluidos salinos derivados da água do mar evaporada (Johnston *et al.*, 2009). Este tipo de mineralização, entretanto, é descrita até agora apenas para depósitos de Zn e Pb (Wilkinson, 2010), mas não pode ser descartada, uma vez que é possível que haja uma correlação entre os depósitos de Zn-Pb e os depósitos de Cu-Ag irlandeses.

Outra observação a ser feita sobre a origem dos fluidos de Mallow é a possível fonte magmática de calor, água e metais. Isso porque, em comum com Gortdrum, Mallow tem evidente atividade vulcânica local. Em cerca de 5 km de distância do depósito, ocorrem camadas piroclásticas da unidade vulcânica *Subulter* do *Chadian* (Wilbur & Carter, 1987). Além disso, se a idade mínima para os estilólitos de Mallow for entre final de *Courceyan* e início do *Chadian*, é possível que os fluidos de Mallow sejam contemporâneo as rochas vulcânicas da região.

Independente da origem magmática e da existência de dois tipos de fluidos, os fluidos oxidantes ricos em cobre percolaram as camadas ORS enriquecendo-se assim de sílica e potássio até encontrarem camada e/ou fluidos redutores no flanco norte da anticlinal Kilmaclenine. Arenitos como do *Old Red Sandstone* fornecem porosidade e permeabilidade ideal para a passagem de fluidos mineralizadores (Metcalf *et al.*, 1994). Além disso, em depósitos irlandeses de Zn-Pb MVT, a percolação de fluidos interage com minerais félsicos das rochas do embasamento ou com arcósios do *Old Red Sandstone* (Johnston 2009). Isso pode explicar a deposição de muscovita e quartzo hidrotermal nas amostras de Mallow.

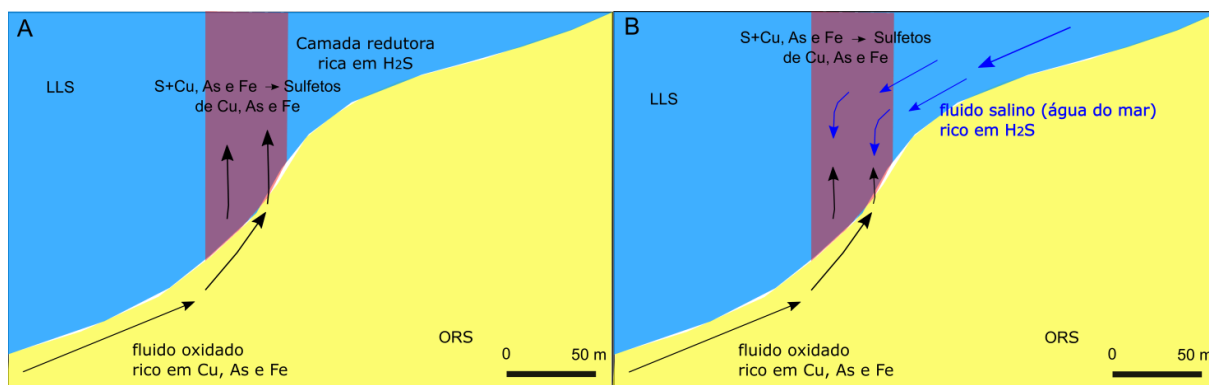


Figura 18 – Modelos metalogenéticos possíveis para o depósito de Mallow. (a) Depósito formado a partir do encontro de fluidos oxidantes ricos em cobre com camadas redutoras ricas em matéria orgânica. Esse modelo é semelhante com o de depósitos de cobre tipo *White Pine*. (b) A partir da mistura de fluidos oxidantes ricos em cobre e de fluidos redutores rico em H_2S . Esse modelo assemelha-se com depósitos MVT irlandeses para Zn-Pb, mas neste caso haveria enriquecimento em Cu, As e Fe. LLS: Lower Limestone Shale; ORS: Old Red Sandstones. Cor roxa representa o corpo de minério vertical.

O padrão vertical de zonação dos sulfetos sugere um percurso vertical dos fluidos mineralizadores, enquanto texturas de minério paralelas ao acamamento apontam migração lateral acompanhando a vertical (Fig. 19a). Como ocorrem sulfetos paralelos ao acamamento e discordantes a ele, sugere-se nesse trabalho que mais de um pulso hidrotermal tenha formado o minério. O pulso ou os pulsos iniciais teriam sido responsáveis pela precipitação de sulfetos alongados paralelos ao acamamento em rochas finas e disseminado em rochas sem foliação (Fig. 19a-c). Estes sulfetos teriam precipitado em espaços vazios das rochas ou substituindo carbonatos. Possivelmente, sulfetos em estítolitos possam ter originado desse(s) pulso(s). Em seguida, um ou mais pulsos hidrotermais teriam gerado os sulfetos discordantes ao acamamento em veios e vênulas, formando novas texturas de minério (Fig. 19d-f).

Devido à presença de falhas normais e de cavalgamento (Wilbur & Carter, 1986) no depósito de Tullacondra é possível que estas tenham agido como fonte de zonas de alívio para que os fluidos pudessem encontrar condições favoráveis à precipitação. Wilbur & Carter (1986) e Steed (1986), descrevem os depósitos de Cu de Mallow e Gortdrum na Irlanda com claro controle estrutural na extensão da mineralização no *Lower Limestone Shale*. Segundo Wilbur & Carter (1986), o *emplacement* de sulfetos em zonas de movimento e o fraturamento sugere isso. Outra evidência é que, no presente trabalho, foram descritas amostras localmente

brechadas. Maiores discussões sobre a influencia estrutural neste depósito devem ser tomadas em trabalhos futuros.

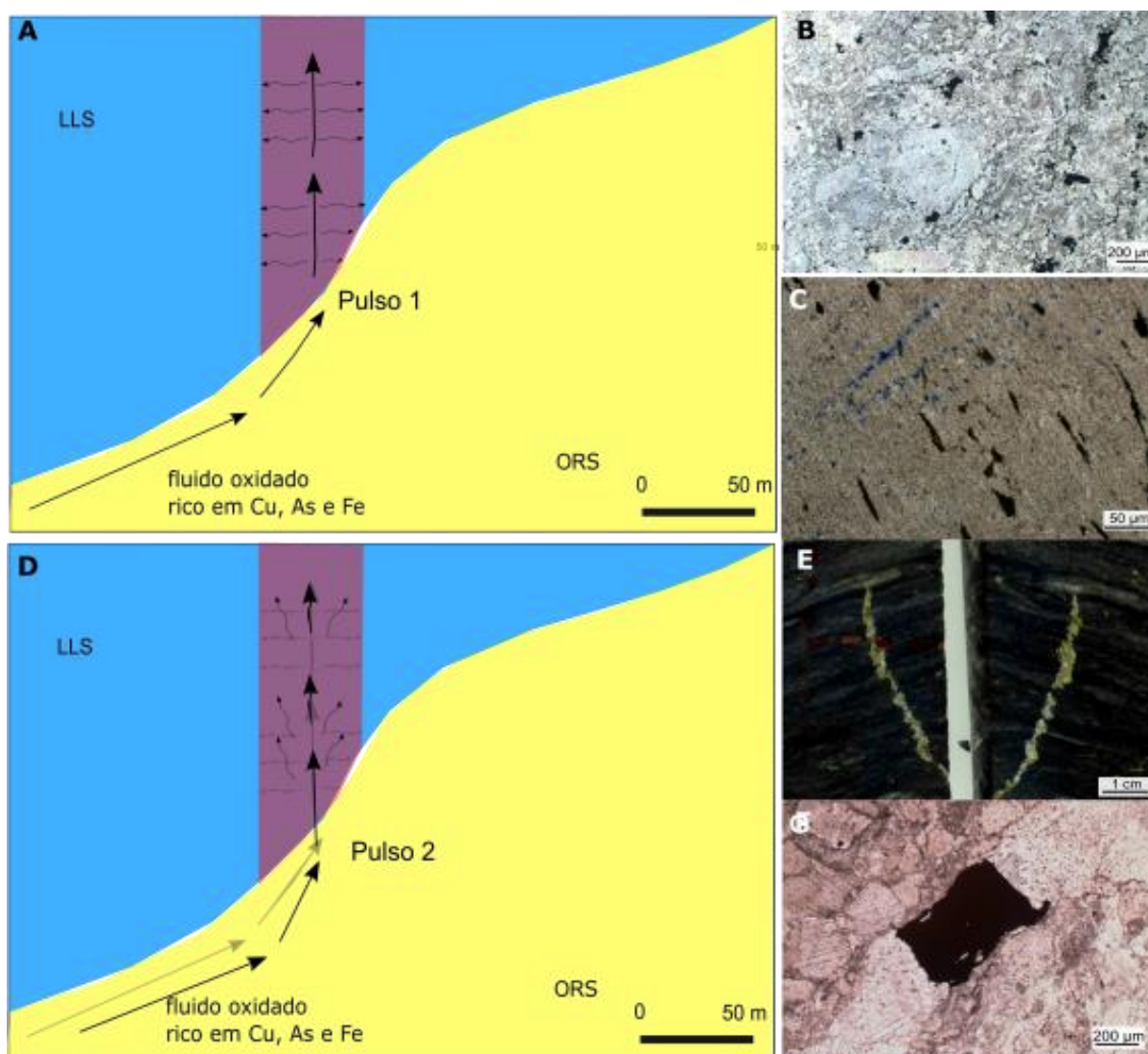


Figura 19 – (a) Modelo de distribuição vertical acompanhada com migração lateral do fluido. Esta distribuição pode ter relação com uma ou mais entradas iniciais de fluidos hidrotermais, identificadas na figura como Pulso 1; (b) e (c) Texturas de minério disseminado em calcarenito e paralelos ao acamamento em folhelhos, respectivamente, são resultados desse(s) pulso(s); (d) Entrada de fluidos com distribuição discordantes a camada (pulso 2) gerando texturas de minério relacionadas com veios e vênulas (e) e (f). Notar na imagem (e) que a calcopirita é oblíqua ao acamamento. Apesar de não mostradas nas figuras, possíveis falhas podem ter agido como zona de alívio para que os fluidos encontrassem condições ideais para precipitação.

5. CONCLUSÃO

Análise petrográfica e textural de rochas e minério de Tullacondra sugerem as seguintes conclusões:

- (1) As rochas hospedeiras foram formadas primeiramente pela deposição de materiais clásticos e posteriormente por precipitação de carbonatos. Alguns minerais clásticos ocorrem também em carbonatos formando as margas e os folhelhos carbonosos;
- (2) Estilolitização é posterior a deposição das rochas hospedeiras e pode ter ocorrido antes ou durante a mineralização. Isso comprova origem epigenética dos sulfetos;
- (3) Os sulfetos apresentam zonação vertical e entre os cristais de tennantita/tetraédrita/freiberguita-argentotennantita → calcopirita → bornita → calcocita. Devido a aspectos texturais é possível que essa fosse a sequência paragenética entre os sulfetos;
- (4) Muscovita, quartzo, dolomita, apatita, clorita, calcedônia e betume podem ter formado em algum momento junto com os sulfetos;
- (5) Dois modelos são sugeridos para a precipitação de sulfetos: (a) envolvendo o encontro de fluido(s) oxidantes ricos em cobre, arsênio e ferro com camadas redutoras ricas em matéria orgânica ou (b) envolvendo o encontro de fluido(s) oxidantes ricos em cobre, arsênio e ferro com fluidos redutores ricos em H₂S. Em ambos os casos, fluido(s) oxidantes percolariam os arenitos do ORS até encontrarem a camada/fluidos redutores no flanco norte da anticlinal *Kilmaclenine*. O primeiro modelo (a) se assemelha com o que é descrito para os depósitos tipo *White Pine*, nos quais pirita, calcopirita, bornita e calcocita ocorrem zonadas em folhelhos carbonosos. O segundo modelo (b) é semelhante ao o que é considerado para depósitos de Zn-Pb irlandeses. Este modelo é possível, devido à proximidade estratigráfica entre os depósitos de Zn-Pb irlandeses e depósito de cobre de Tullacondra.
- (6) Sendo o depósito de Tullacondra epigenético, é possível que o corpo de minério seja contemporâneo ao vulcanismo da região. Se isso for provado, esse vulcanismo pode ter servido de fonte de água, calor e/ou metais, assim como ocorre no depósito de Cu-Ag-Hg de Gortdrum hospedados nas mesmas unidades que Tullacondra;

- (7) Aspectos texturais do corpo de minério sugerem que junto com a distribuição vertical ocorreu uma percolação horizontal dos fluidos mineralizadores. Isso porque sulfetos paralelos ao acamamento ocorrem. Distribuições verticais, possivelmente posteriores, também se deram devido à formação de vênulas de sulfetos discordantes ao minério paralelo ao acamamento.

REFERÊNCIAS

- Andrew C.J. 1992. The relationship between mineralisation and basin development chronology in the Irish central midlands. In: Black A., Earls G.V., O'Connor P., Pyne J.F. (eds). *The Irish minerals industry - a review of the decade*, Galway 1990. Irish Association for Economic Geology, p. 143-170.
- Biondi J.C. 2003. *Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros*. Oficina de Textos, São Paulo, p. 528.
- Cawood P.A., McCausland P.J.A., Dunning, G.R. 2001. Opening Iapetus: Constraints from the Laurentian margin in Newfoundland: *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 443–453
- Chace 1956. Abbreviations in field and mine geological mapping, *Economic Geology*, 51: 712-723.
- Clipstone D., Roycroft P. 1992. Detrital magmatic muscovite from the Lower Carboniferous of southwest Ireland: buried granites uncovered? *Journal Geological Society*, 149:163–166
- Duane M.J. 1988. Genesis, mineralogy and geochemistry of uranium in the Gortdrum stratiform copper deposit, Ireland. *Mineralium Deposita*, 23: 50-57.
- Duarte L.C., Juchem P.L., Pulz G.M., Martini T.M.B., Chodur N., Liccardo A., Fischer A.C., Acauan R.B. 2003. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros. *Pesquisas em geociências*, 30 (2): 3–15.
- Fitzell M. 1973. Mallow: COBH Exploration Ltd. *Relatório de Perfuração*. p. 8.
- Graham J. R. 1983. Analysis of the Upper Devonian Munster Basin, an example of a fluvial distributary system. In: Collinson, J. D., Lewin, J. (eds) *Modern and Ancient Fluvial Systems*. International Association of Sedimentologists, Special Publications, 6: 473-483.
- Gregg J.M., Shelton K.L., Johnson A.W. *et al.* 2001. Dolomitization of the Waulsortian limestone (Lower Carboniferous) Irish Midlands. *Sedimentology*, 48:745–766
- Hitzman M.W., Large D. 1986. A review and classification of the Irish carbonate-hosted base metal deposits. In: Andrew C.J., Crowe R.W.A., Finlay S., Pennell W.M., Pyne J.F. (eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p. 217-238.
- Hitzman, M.W., Redmond, P.B., Beaty, D.W. 2002. The carbonate-hosted Lisheen Zn-Pb-Ag deposit, County Tipperary, Ireland. *Economic Geology*, 97: 1627–1655.

James J. 2013. Mallow Base Metal Exploitation Project Counties e Limerick South Irish Midlands Zn-Pb Orefield: Part I. Dublin: Mayfly Resources. Relatório Técnico. p. 379.

Johnston, J.D. 1999. Regional fluid flow and the genesis of Irish Carboniferous base metal deposits. *Mineralium Deposita*, 34: 571–598.

Johnston, A.W., Shelton, K.L., Gregg, J.M., Somerville, I.D., Wright, W.R., Nagy, Z.R. 2009. Regional studies of dolomites and their included fluids: recognizing multiple chemically distinct fluids during the complex diagenetic history of Lower Carboniferous (Mississippian) rocks of the Irish Zn-Pb ore field. *Mineralogy and Petrology*, 96: 1–18.

Jost H., Silva M.G., Kuyumjian R.M., Brito. 2010. Principais modelos de depósitos de cobre no Brasil: Aspectos históricos, contextos geológicos e importância econômica. In: Brito R.S.C., Silva M.G., Kuyumjian R.M.(eds). *Modelos de depósitos de cobre e sua resposta ao intemperismo*. Brasília. CPRM, p.216.

Lees A. 1961. The Waulsortian 'reefs' of Eire: a carbonate mud-bank complex of Lower Carboniferous age. *Journal of Geology*, 69: 101-109.

Lind I.L. 1993. Stylolites in chalk from leg 130, Ontong Java Plateau. Proceedings of the Ocean Drilling Program. *Scientific Results*, 130:445–451

Max M.D., Barber A.J., Martinez, J. 1990. Terrane assemblage of the Leinster Massif, SE Ireland, during the Lower Palaeozoic. *Journal of the Geological Society*, London. 147: 1035-1050.

Metcalf, R., Rochelle, C.A., Savage, D., Higgo, J.W. 1994. Fluid-rock interactions during continental red bed diagenesis: Implications for theoretical models of mineralization in sedimentary basins. In: Parnell, J. (ed.) *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins: Geological Society Special Publication*, 78: 301–324

Neto M.B.R. 2010. Apresentação. In: Brito R.S.C., Silva M.G., Kuyumjian R.M.(eds). *Modelos de depósitos de cobre e sua resposta ao intemperismo*. Brasília. CPRM, p.216.

Nicolaidis S., Wallace M.W. 1997. Pressure-dissolution and cementation in an Oligo-Miocene non-tropical limestone (Clifton Formation), Otway Basin, Australia. In: James N.P., Clarke J.A.D. (eds) *Cool-water carbonates*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 249–26.

O'Connor P. J., Aftalion M., Kennan, P. S. 1989. Isotopic U–Pb ages of zircon and monazite from the Leinster Granite, southeast Ireland. *Geological Magazine*, 126: 725–8.

Parnell, J. 1993. Metal enrichments in bitumens from the Carboniferous of Ireland: Potential in exploration for ore deposits. In: J. Parnell, H. Kucha and P. Landais (Editors), *Bitumens in Ore Deposits*. Springer, Berlin, pp. 475-489.

Philcox M.E. 1984. Lower Carboniferous lithostratigraphy of the Irish Midlands. Spec Publ, *Irish Association for Economic Geology*, p. 89.

Phillips W.E.A., Sevastopulo G.D.S. 1986. The stratigraphic and structural setting of Irish mineral deposits. In: Andrew CJ, Crowe RWA, Finlay S, Pennell WM, Pyne JF (eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, pp 1±30

Pracejus B. 2008. *The Ore Minerals Under the Microscope*. Elsevier, p. 875.

Reed C.P., Wallace M.W. 2001. Diagenetic evidence for an epigenetic origin of the Courtbrown Zn-Pb deposit, Ireland. *Mineralium Deposita*, 36(5):428–441.

Reed C.P., Wallace M.W. 2004. Zn-Pb mineralisation in the Silvermines district, Ireland: a product of burial diagenesis. *Mineralium Deposita*, 39:87– 102

Ripley E.M., Merino M., Moore C., Orteleva P. 1985. Mineral zoning in sediment-hosted copper deposits, In: Wolf K.H. (ed) *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits*, 13: 237±260. Elsevier, Amsterdam

Slowey, E. 2010. *Technical Report on the Mallow base metal exploration project, county Cork, Ireland*. Kildare, Cork Irlanda: Rathdowney Resources Limited.

Steed G.M. 1986. The geology of the Gortdrum Cu-Ag-Hg orebody. In: Andrew C.J., Crowe R.W.A., Finlay S., Pennell W.M., Pyne J.F. (eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p. 481-500.

Whitney D.L., Evans B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *The American Mineralogist*, 95:185–187.

Wilbur D. G., Carter J. S. 1986. Cu-Ag mineralization at Tullacondra, Mallow, Co. Cork. In: Andrew C. J., Crowe R. W. A., Finlay S., Pennell W. M., Pyne J. F. (eds) *Geology and genesis of mineral deposits in Ireland*. Irish Association for Economic Geology, p. 501-508.

Wilbur D. G., Royall J. J. 1975. Discovery of the Mallow copper-silver deposit, County Cork, Ireland. In: Jones M. J. (ed) *Prospecting in areas of glaciated terrain*. Edinburgo. Inst Mining Metall. London, p. 60-70.

Wilkinson, J.J., 2010. A review of fluid inclusion constraints on mineralization in the Irish ore field and implications for the genesis of sediment-hosted Zn-Pb deposits. *Economic Geology*, 105, 417–442.