

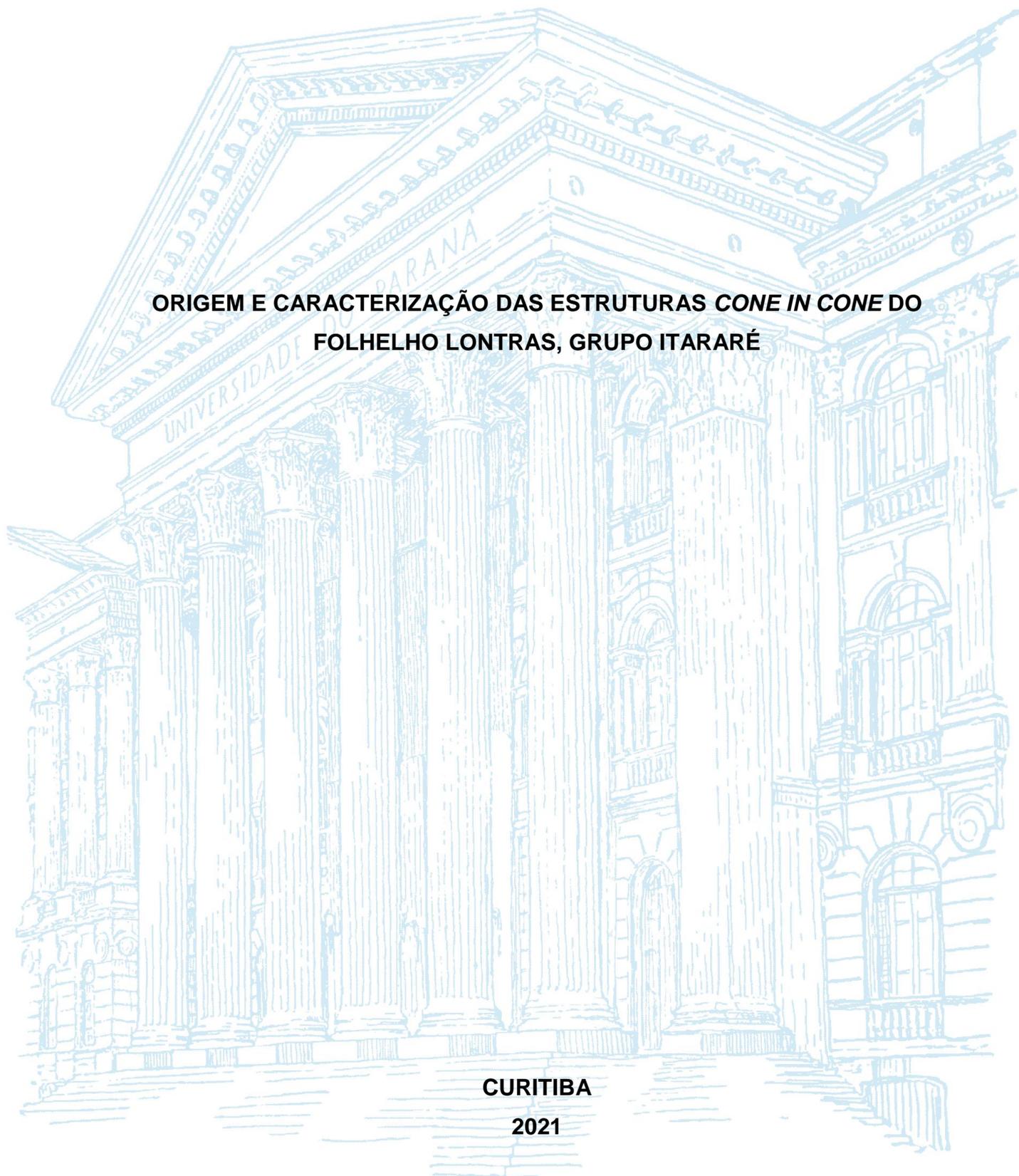
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIOVANA DOS SANTOS AIZONA

**ORIGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS *CONE IN CONE* DO
FOLHELHO LONTRAS, GRUPO ITARARÉ**

CURITIBA

2021



GIOVANA DOS SANTOS AIZONA

**ORIGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS *CONE IN CONE* DO
FOLHELHO LONTRAS, GRUPO ITARARÉ.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carolina Danielski Aquino

Coorientador: Mestrando Victor Amir Cardoso Dorneles

CURITIBA

2021

Dedico este trabalho a minha família, minha mãe Selma, meu pai Danilo (*in memoriam*) e minha irmã Alexandra. Vocês são a minha maior fortaleza.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, meu pai (*in memoriam*) e minha irmã que acreditaram e deram todo o suporte para esse sonho. Por confiarem em meu projeto de ser geóloga, um curso que não faziam ideia do que era até eu decidir cursá-lo. Obrigada por todas as pequenas e grandes ações que me fizeram chegar aqui, desde dar uma carona até aceitar a jornada de buscar amostras cruzando toda a cidade, em um dia de domingo. Muito obrigada por me estimularem sempre, tudo isso só faz sentido por vocês.

Aos meus amigos que foram essenciais durante minha jornada, principalmente por terem me dado forças durante um dos períodos mais difíceis da minha vida. Obrigada pelos momentos de descontração, conselhos, desabaços e principalmente por nunca me deslegitimarem. Agradeço especialmente ao Victor, Camila, Giovana, Amanda Sampaio, Dayane, Franciele, Wagner, Amanda Pereira, Iana e Caroline.

Aos meus orientadores Carolina e Victor, que nunca me deixaram na mão e sempre me ajudaram com minhas dúvidas e angústias. Vocês são brilhantes como cientistas e indivíduos.

Aos demais mestres que foram essenciais nesta jornada acadêmica. Destes, quero citar: Claudia Parellada, Elvo Fassbinder, Fernando Mancini, Pedro Cordeiro e Barbara Trzaskos.

As equipes de Mapeamento Sedimentar (GC-029) do ano de 2019, que me cederam as amostras utilizadas nesta monografia.

Aos técnicos Bruno, Keiji, Ana e Fedalto do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) e ao Adilson do Laboratório de Laminação (LAMIN).

Ao Projeto *Diagenesis* (SHELL) pelo apoio financeiro à esta pesquisa.

Ao PET Geologia pelos ensinamentos pessoais e acadêmicos.

A Universidade Federal do Paraná por ter se tornado minha segunda casa ao longo desses anos.

RESUMO

No Folhelho Lontras do Grupo Itararé ocorre arranjos carbonáticos em formato de cones denominados estruturas *cone in cone* (CIC). O objetivo deste trabalho foi caracterizar a morfologia das estruturas a fim de investigar sua gênese. Para tal foi realizada a descrição macroscópica e microscópica, além de análises em Microscopia Eletrônica de Varredura, com auxílio do *Energy Dispersive Xray Spectroscopy* e Microtomografia Computadorizada. As amostras foram divididas em 4 Fácies (Encaixante, Laminada, Cone e Caótica). A Fácies Encaixante corresponde ao Folhelho Encaixante; a Fácies Laminada apresenta intercalação de níveis de argila com camadas de microcones; a Fácies Cone possui estruturas CICs bem desenvolvidas contornadas por camadas de argila e a Fácies Caótica contém CICs desenvolvidas com níveis de argila em um padrão de menor organização que as outras Fácies. Em geral a Fácies Encaixante, Cone e Laminada ocorrem associadas. As estruturas *cone in cone* são compostas de calcita acicular ou *spindle-shaped*, há grãos detríticos de quartzo e pirita framboidal em meio às estruturas e camadas de argila. Infere-se que as estruturas CIC foram formadas na interface água-sedimento na diagênese precoce, como consequência de atividade de bactérias sulfato-redutoras. O aumento da pressão de fluido causada pela circulação de líquidos associado com ambiente propício serviu de gatilho para a formação das estruturas *cone in cone*.

Palavras-chave: Gênese; Fácies; Pirita Framboidal.

ABSTRACT

In the Lontras Shale of the Itararé Group there are carbonate arrangements in the shape of cones called cone in cone structures (CIC). The aim of this work was to characterize the morphology of the structures in order to investigate their genesis. For this purpose, macroscopic and microscopic descriptions were performed, in addition to analysis in Scanning Electron Microscopy, with the aid of Energy Dispersive Xray Spectroscopy and Computerized Microtomography. The samples were divided into 4 Facies (Host, Lamine, Cone and Chaotic). The Host Facies corresponds to the host shale; the Laminated Facies presents intercalation of clay levels with layers of microcones; the Cone Facies have well-developed CIC structures surrounded by layers of clay and the Chaotic Facies contain CICs developed with clay levels in a pattern less organized than the other Facies. In general, the Host, Cone and Lamine Facies are associated. The cone in cone structures are composed of acicular or spindle-shaped calcite, usually detrital quartz grains and framboidal pyrite occur among the clay structures and layers. It is inferred that CIC structures were formed at the water-sediment interface in early diagenesis, as a consequence of the activity of sulfate-reducing bacteria. The increase in fluid pressure caused by the circulation of liquids associated with the enabling environment initiated the formation of cone in cone structures.

Keywords: Genesis; Facies; Framboidal Pyrite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização do afloramento de onde as amostras contendo estruturas <i>cone in cone</i> provêm.	12
Figura 2: Formação Rio do Sul – Seção Tipo.....	15
Figura 3: Formas de ocorrência das estruturas <i>cone in cone</i>	16
Figura 4: EPS.....	19
Figura 5: Estruturas CIC em afloramento.....	21
Figura 6: Amostras e cortes realizados para confecção de lâminas petrográficas e análise em MEV/ Micro CT.....	23
Figura 7: Grupo 1, amostras compostas por rochas apresentando 3 Fácies associadas (Encaixante, Laminada e Cone).....	25
Figura 8: Grupo 2, composto por rochas apresentando a Fácies Caótica	26
Figura 9: Feições da Fácies Encaixante.	31
Figura 10: Fácies Laminada em amostras macroscópicas	32
Figura 11: Fotomicrografias da Fácies Laminada em polarizadores paralelos	33
Figura 12: Fácies Laminada em MEV	34
Figura 13: Fácies Laminada em Micro CT	35
Figura 14: Fácies Cone em amostra macroscópica	37
Figura 15: Fotomicrografias da Fácies Cone.....	38
Figura 16: Fotomicrografias da Fácies Cone detalhando as camadas de argila.....	39
Figura 17: Fácies Cone em MEV	41
Figura 18: Piritas em MEV.....	42
Figura 19: Feições com alto teor de carbono na Fácies Cone vistas em MEV	43
Figura 20: Imagem obtida por Micro CT da Fácies Cone	45
Figura 21: Fácies Caótica em amostra macroscópica.....	47
Figura 22: Fotomicrografias da Fácies Caótica	49
Figura 23: Sistemas de fraturas menores e maiores.....	52
Figura 24: Comparação entre as feições descritas por Perri & Spadafora com aquelas observadas neste trabalho.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características utilizadas para definir condições redox durante a deposição.....	19
Tabela 2: Relação das amostras e métodos utilizados.....	24
Tabela 3: Relação de amostras separadas pelos 2 grupos predominantes.	26
Tabela 4: Compilação das principais características petrográficas segundo Gresley (1894), Tarr (1922), Woodland (1964), Gilman and Metzger (1967) e Selles-Martinez (1994).....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	11
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	12
2 CONTEXTO GEOLÓGICO	13
2.1 BACIA DO PARANÁ	13
2.1.1 Grupo Itararé e Folhelho/Membro Lontras	13
3 ESTADO DA ARTE	16
4 AFLORAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	20
5 MATERIAIS E MÉTODOS	22
5.1 ANÁLISE FACIOLÓGICA	24
5.1.1 Análise Macroscópica e Microscópica	27
5.1.2 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	28
5.1.2.1 Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS)	28
5.1.3 Microtomografia Computadorizada de Raios X (Micro CT)	29
6 RESULTADOS	30
6.1 DESCRIÇÃO DE FÁCIES	30
6.1.1 FÁCIES ENCAIXANTE	30
6.1.1.1 Descrição Macroscópica	30
6.1.2 FÁCIES LAMINADA	31
6.1.2.1 Descrição Macroscópica e Microscópica	31
6.1.2.2 Microanálise em MEV	33
6.1.2.3 Microanálise em Micro CT	35
6.1.3 FÁCIES CONE	35
6.1.3.1 Descrição Macroscópica e Microscópica	35
6.1.3.2 Microanálise em MEV	40
6.1.3.3 Microanálise em Micro CT	44
6.1.4 FÁCIES CAÓTICA	45
6.1.4.1 Descrição Macroscópica e Microscópica	45
7 DISCUSSÕES	51
8 CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

As estruturas *cone in cone* (CIC) são compostas por minerais fibrosos, geralmente calcita, dispostas em camadas ou em concreções calcárias variando de milímetros a centímetros de espessura e apresentando níveis de argila contornando-as. As CIC são comuns em meio a folhelhos ocorrendo com menos frequência em arenitos (Selles-Martinez, 1994).

Cobbold *et al.* (2013) catalogaram, com base em estudos prévios, ocorrências de *cone in cone* e *beefs* (arranjos formados por minerais fibrosos em veios paralelos ao acamamento, que podem ocorrer associadas às CICs) em 157 localidades pelo mundo. Destas, em 110 localidades as estruturas estavam imersas em folhelhos ricos em matéria orgânica, com prevalência das idades: a) Cambriano-Ordoviciano, b) Devoniano-Carbonífero, c) Jurássico inferior e d) Cretáceo-Paleógeno. No Brasil, as CIC e *beefs* estão imersas em meio a folhelhos marinhos e lacustres e foram catalogadas apenas na Bacia do Solimões, Bacia do Amazonas e Bacia do Araripe.

Zanella *et al.* (2015a) observaram que CICs e *beefs* ocorriam comumente associadas a rochas potencialmente geradoras de petróleo. Além disso, encontraram inclusões sólidas e líquidas de hidrocarbonetos em meio aos cristais ou entre as fibras de calcita. Para os autores há correlação entre a formação das estruturas e a migração e geração de hidrocarbonetos.

Não existe um consenso na literatura quanto ao desenvolvimento da morfologia cônica, a questão se o mineral foi precipitado dando forma ao cone ou se a forma cônica se desenvolveu secundariamente à precipitação. Autores como Woodland (1964) e Franks (1969) defendem a primeira hipótese, enquanto Tarr (1922), Gilman & Metzger (1967) e Selles-Martinez (1994) sustentam a segunda. Além disso, há divergências quanto à fase diagenética em que as CIC são formadas, autores como Cobbold *et al.* (2013) e Zanella *et al.* (2015a e 2015b) defendem a gênese dos arranjos em estágios tardios da diagênese. Para Woodland (1964), Franks (1969) e Tribovillard *et al.* (2018) a formação se dá na diagênese precoce. Existe, ainda, uma hipótese acerca da precipitação do carbonato formador das CIC pela indução de atividade microbiana (Tribovillard *et al.*, 2018).

No contexto do Grupo Itararé, as estruturas *cone in cone* foram descritas pela primeira vez por Schneider *et al.* (1974) em meio ao Folhelho Lontras. Por mais

que não sejam pervasivas por toda extensão do intervalo, as estruturas servem como diagnóstico na identificação desta unidade. As CICs foram mencionadas em diversas bibliografias e relatórios de mapeamento sobre o Grupo Itararé/Folhelho Lontras, mas sem que o foco fosse essas estruturas. Deste modo, a hipótese a ser testada com o auxílio da petrografia e de técnicas analíticas é de que as estruturas *cone in cone* do Folhelho Lontras foram formadas na diagênese precoce com influência microbial.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Apesar de se tratar de um tópico com numerosos estudos, faltam pesquisas que detalhem as características morfológicas das estruturas *cone in cone* no contexto do Grupo Itararé.

A formação das CIC e a geração e migração de hidrocarbonetos podem acontecer de forma síncrona, em estágios avançados da diagênese (Zanella *et al.*, 2015a). Portanto, um estudo de semi-detulhe das CIC do Folhelho Lontras pode contribuir com informações aplicáveis aos estudos dos sistemas petrolíferos no contexto da Bacia do Paraná.

Além disso, testar a hipótese acerca da indução microbiana na precipitação carbonática em diagênese inicial das CIC é uma forma de colaborar com o refinamento das informações no campo da biomineralização.

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização morfológica das CICs, a fim de investigar a gênese das estruturas que ocorrem no Folhelho Lontras do Grupo Itararé. Para tal, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Compreender a relação das estruturas com a rocha encaixante através de feições estruturais;
- Entendimento do arranjo cristalino;
- Buscar estruturas que indiquem atividade biogênica.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As amostras analisadas são provenientes de um afloramento localizado próximo à divisa do município de Presidente Getúlio com Dona Emma, no estado de Santa Catarina (Figura 1). Para o acesso ao local, tendo como ponto de partida o município de Blumenau (SC), segue-se pela BR-470 em direção a Rio do Sul até a entrada de Ibirama e, em seguida, em uma conversão à esquerda, acessa-se a SC-340 e, então, chega-se na cidade de Presidente Getúlio. Para acessar o afloramento continua-se na SC-340 em torno de 10 Km do centro de Presidente Getúlio, o afloramento está ao lado esquerdo da via.

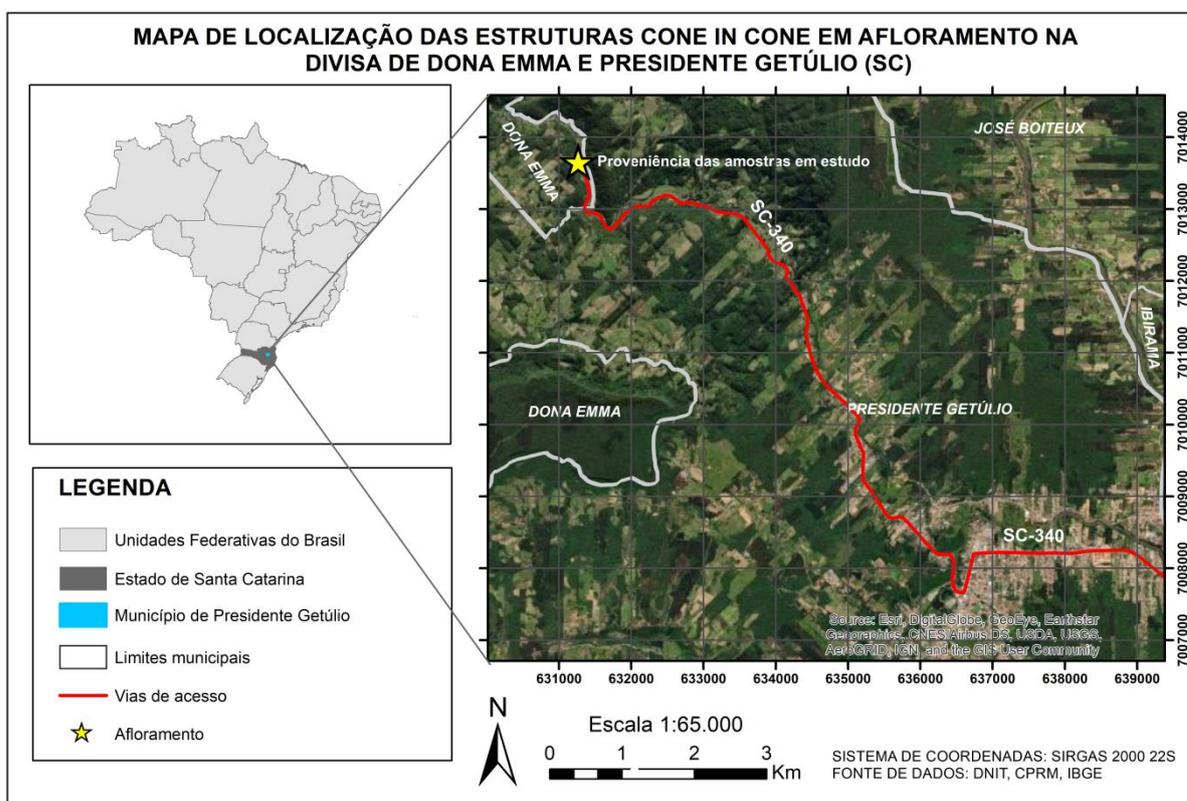


Figura 1: Mapa de localização do afloramento de onde as amostras contendo estruturas *cone in cone* provêm.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná se localiza na porção centro-leste do continente Sul-Americano, cobrindo em torno de 1.500.000 km², sendo que a maior parcela, 1.000.000 km², situa-se no Brasil enquanto o restante abrange Argentina, Paraguai e Uruguai. A bacia contempla um registro estratigráfico entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo (Milani *et. al.*, 1998). Sua espessura máxima é de aproximadamente 7 km e possui formato ovalado de eixo maior N-S, englobando um intervalo sedimentar-magmático no qual o depocentro estrutural encontra-se na localidade da calha do Rio Paraná (Milani *et. al.*, 2007).

Seis Supersequências foram reconhecidas por Milani (1997): Rio Ivaí (Ordoviciano- Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As Supersequências Rio Ivaí, Paraná e Gondwana I são sucessões sedimentares de ciclos transgressivo-regressivos associados ao nível do mar no Paleozóico, enquanto as demais representam sedimentos continentais com rochas ígneas relacionadas.

2.1.1 Grupo Itararé e Folhelho/Membro Lontras

O Grupo Itararé é uma sequência sedimentar de idade Neocarbonífera-Eopermiana, de até 2.500 m em subsuperfície (Milani *et al.*, 2007), que possui registros da sedimentação em um contexto de glaciação conhecido como Glaciação do Paleozóico tardio (*Late Paleozoic Ice Age – LPIA*) que reflete em sua sedimentação influências glaciais diretas e indiretas (Vesely & Assine, 2004). O Grupo está na base da Supersequência Gondwana I, que devido a altas latitudes do posicionamento do Gondwana sul-ocidental se tornou um espaço para ampla glaciação continental (Milani *et al.*, 2007).

A divisão litoestratigráfica feita por Schneider *et al.* (1974) foi realizada com base em seções aflorantes no estado de Santa Catarina e Sul do Paraná. Para os autores, o Grupo Itararé se divide em três Formações, sendo elas: Campo do

Tenente, Aquidauana, Mafra e Rio do Sul. Sendo que a Formação Aquidauana aflora apenas no Mato Grosso, Goiás e nordeste de São Paulo.

França & Potter (1988) propuseram uma divisão litoestratigráfica que abrange toda a Bacia do Paraná e não só nos estados estudados por Schneider *et al.* (1974). Os autores realizaram um trabalho com base na análise estratigráfica de subsuperfície utilizando perfis de poços do Grupo Itararé. Delimitando, assim, três ciclos deposicionais (inferior, médio e superior) correspondente a mudanças climáticas e do nível do mar evidenciado pelo padrão de aumento de argilosidade crescente para cima, observado principalmente em perfis de Raio Gama A Formação Lagoa Azul refere-se à unidade inferior, a Formação Campo Mourão como unidade intermediária e a unidade superior corresponde a Formação Taciba.

Há correspondência entre as unidades propostas por Schneider *et al.* (1974) e França & Potter (1988), com exceção à posição do Folhelho/Membro Lontras. Originalmente posicionado na porção inferior da Formação Rio do Sul (Schneider *et al.*, 1974) para França & Potter (1988) este se localiza no topo da Formação Campo Mourão. Como este estudo abrange dados de afloramentos, foi adotada a subdivisão litoestratigráfica definida por Schneider *et al.* (1974).

O Folhelho Lontras, caracterizado por Schneider *et al.* (1974), possui laminação plano paralela, rítmica e estrutura *cone in cone*. A Figura 2 ilustra a seção tipo da Formação Rio do Sul descrita pelo autor.

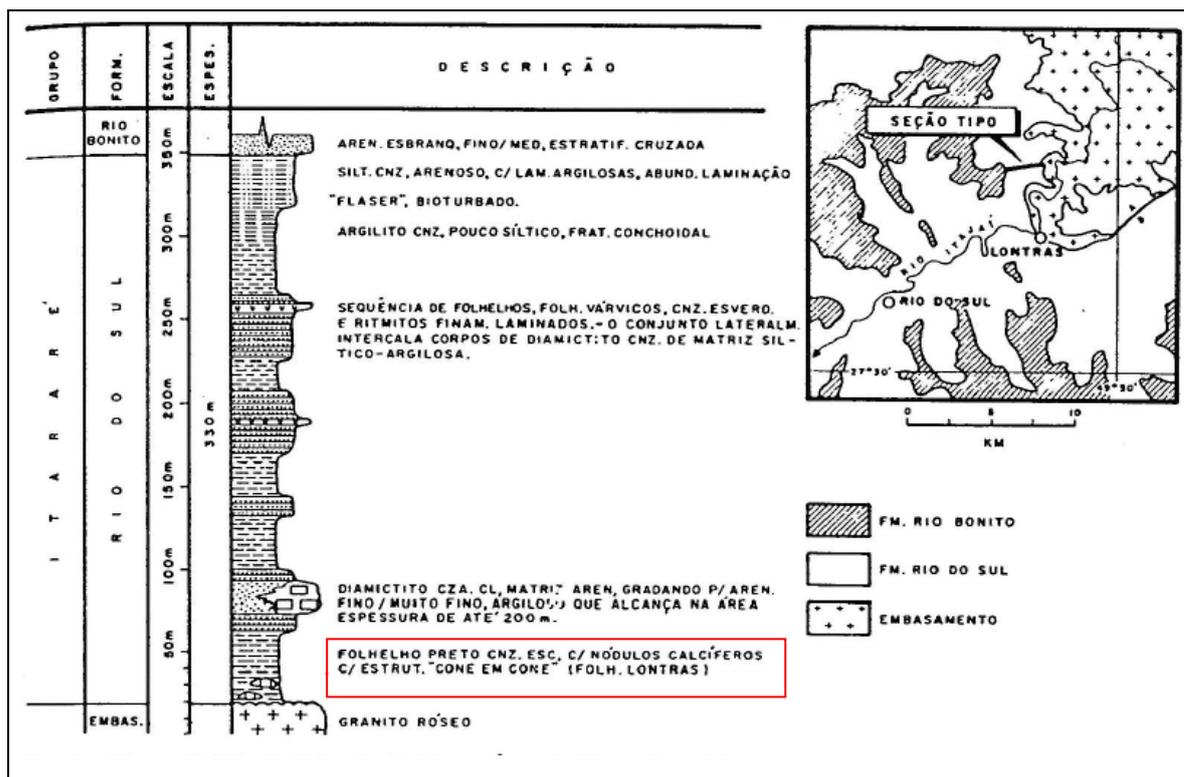


Figura 2: Formação Rio do Sul – Seção Tipo. Retângulo indicando a descrição do Folhelho Lontras. Fonte: Schneider *et al.* (1974).

Com a correlação estratigráfica de 21 poços, Castro (1999) apontou o Folhelho Lontras como sendo um *datum* para o Grupo Itararé, na margem leste da Bacia do Paraná. Devido a sua extensa distribuição e contato abrupto, foi caracterizado como um evento transgressivo e possível superfície de inundação máxima.

Mouro *et al.* (2020) estudaram a assembleia fóssilífera mista existente no Folhelho Lontras. Composta por organismos terrestres e marinhos. A assembleia é extremamente diversa: compreende peixes, poríferos, insetos, amonóides, conodontes, braquiópodes, anelídeos, plantas e icnofósseis. Além disso, a unidade contém alto teor de carbono orgânico total (Mouro *et al.*, 2017).

3 ESTADO DA ARTE

As estruturas *cone in cone* correspondem a séries de cones circulares que podem se encaixar um dentro do outro (Figura 3A) ou ocorrer de modo singular (Figura 3B) (Tarr, 1922). Em geral ocorrem diversos *nested cones* (estruturas cone in cone desenvolvidas ao longo de um eixo comum) formando colunas densamente compactadas ou não (Woodland, 1964).

Os cones exibem corrugações marcadas que dão a argila o aspecto dentado na parte externa. Para Gilman & Metzger (1967) esta característica está atrelada a um sistema de fraturas. A fratura maior é lisa e sem interrupção, enquanto o lado oposto possui fraturas menores que geram as superfícies dentadas. Assim que o faturamento vai se desenvolvendo as camadas de argila vão preenchendo o espaço.

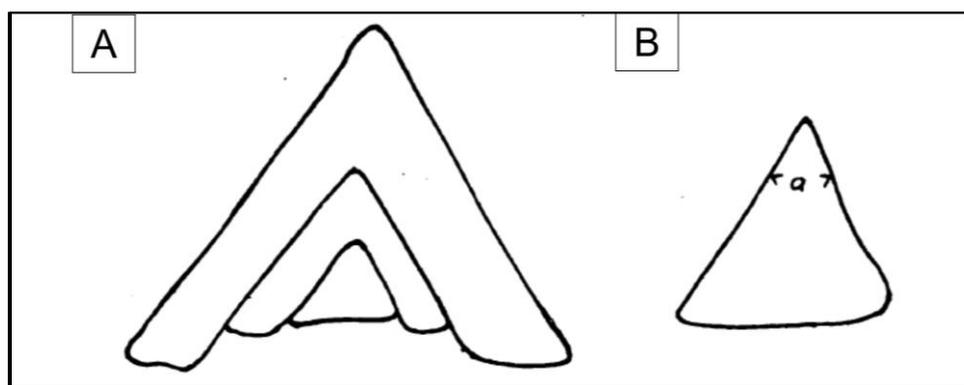


Figura 3: Formas de ocorrência das estruturas *cone in cone*. A) Cones dentro de cone. B) Cone singular. Fonte: Tarr (1922).

Segundo Gilman & Metzger (1967), as argilas podem se concentrar, no entorno de cones por dois métodos. Um é residual, que se refere aos folhelhos encaixantes que conforme a estrutura de CIC cresce há a flexão das argilas que migram para o entorno dos cones. O outro é introduzido, através do sedimento ainda plástico, como por exemplo, a orientação da argila paralela aos limites do cone e a presença fragmentos de calcita em meio às argilas. Para Woodland (1964) é provável que os sedimentos ainda possuíssem grande quantidade de água no momento de cristalização das estruturas, dessa forma os cristais de calcita seriam capazes de deformar as argilas que os circundavam. Além disso, Woodland (1964) defendia que a variação das formas cônicas era causada pela sobrecarga da compactação durante a cristalização do carbonato.

Existem diversas vertentes que explicam os mecanismos de formação das estruturas. Tarr (1922) justifica que as estruturas *cone in cone* possuíam a aragonita como composição inicial. A pressão causada pelo aumento de volume envolvido na transição da aragonita para calcita causou a formação das estruturas. Gilman & Metzger (1967) assumem uma teoria similar, na qual a mudança da aragonita-vaterita para a calcita culmina em excesso de pressão que gera deslocamento das argilas e formação das estruturas.

Woodland (1964) defende que a força de cristalização tem papel fundamental para produzir um estado físico favorável ao desenvolvimento das CIC. Para Franks (1969) as estruturas são formadas durante a diagênese precoce na interface água sedimento pela força de cristalização das calcitas enquanto os sedimentos ainda são plásticos. O *stress* causado pela compactação dos sedimentos ao redor das estruturas pode ter sido responsável pela orientação quase vertical das calcitas. Franks (1969) ainda afirma que a ação de bactérias sulfato-redutoras nos poros do sedimento provavelmente modificou o equilíbrio e favoreceu a precipitação da calcita e crescimento das CIC. Para Kolokol'tev (2002) as estruturas são formadas por meio de um fluido convectivo ascendente em contexto fracamente ou não litificado.

Já para Selles-Martinez (1994), as estruturas *cone in cone* são características secundárias subordinadas a agregados de cristais que crescem em sistemas de sobrepressão como resultado de fraturamento induzido pelo decréscimo na pressão de poro próximo a interface sedimento-água. Para os autores as fraturas cortando os agregados de cristais possuem padrão cônico, pois dois componentes do *stress* são iguais. A pressão residual desenvolve fraturas cônicas pré-formadas que são orientadas e preenchidas com argila. Cartens (1985) estudou estruturas *cone in cone* em meio a concreções de pirita, no entanto possui uma hipótese similar a de Selles-Martinez (1994). Para o autor a formação das estruturas é similar aquelas compostas por carbonato, sendo produto de pressão de fluido anormal associada a leitos sedimentares compactados durante o crescimento concrecionário.

Cobbold *et al.* (2013) com base nas inclusões de hidrocarbonetos em meio aos cristais de calcita e a proximidade das estruturas *cone in cone* com rochas geradoras de petróleo, argumentam que a formação das estruturas se deu em estágios mais avançados da diagênese enquanto havia a geração de óleo em profundidades de quilômetros e a altas temperaturas (70-120°C). Zanella *et al.*

(2015a,b) justifica a mesma teoria como sendo produto do faturamento hidráulico como resultado da sobrepressão de fluido.

Israelson *et al* (1996) dataram concreção contendo CIC, usando U-Pb e obtiveram a idade de 478.2 +- 4.9 Ma para as estruturas que eram 30 Ma mais novas que a idade estratigráfica do folhelho encaixante (510-514 Ma). Concluíram, assim, que as estruturas CIC foram formadas 30 Ma depois da deposição do sedimento.

Para Tribovillard *et al.* (2018) a precipitação de carbonato deu início pelo aumento da alcalinidade dentro dos poros do sedimento ou na interface água-sedimento com a influência de bactérias sulfato-redutoras nutridas por carbono orgânico dissolvido. Este circulava ou era expelido graças a deformações sinsedimentares, como falhas. Os autores levantam a possibilidade de dois tipos de redução de sulfato que podem estar envolvidos, organotrófica ou metanotrófica, ambas mediadas por bactérias. Segundo os autores as CIC em análise possuem assinatura isotópica de C que pode remeter ao carbono degradado da metanogênese. Para o autor as bactérias eram alimentadas por fluidos que circularam de baixo para cima. Essa migração para cima aumentou a poro pressão e serviu de gatilho para a formação das estruturas CIC.

Meinhold *et al.* (2019) estudaram concreções contendo esferulitos e estruturas *cone in cone* circundando-as. Para os autores a formação das estruturas CIC se deu em um estágio mais avançado da diagênese após a redução da porosidade. O autor cita brevemente sobre a possibilidade da influência de microbiota na precipitação de calcita, sustentado pela ocorrência de Substâncias Poliméricas Extracelulares (EPS) e pelo crescimento fibro-radial de esferulitos.

Tribovillard *et al.* (2018) e Meinhold *et al.* (2019) citam em seus trabalhos possível influência microbial nos processos de formação das CIC, mas não discutem se os processos possuem caráter bio-induzido ou bio-influenciado. Dupraz *et al.* (2009) utiliza o termo organomineralização para processos que podem ser conduzidos intrinsecamente (metabolismos microbiais) ou extrinsecamente (evaporação e desgaseificação, por exemplo). Podendo ser processos biologicamente induzidos ou influenciados. Para Dupraz *et al.* (2009), na mineralização bio-induzida as atividades metabólicas dos organismos induzem as condições de precipitação. Já na mineralização bio-influenciada não dependem da ação direta de um organismo, pois a matriz orgânica apenas influencia a morfologia dos cristais e sua composição. Segundo o autor, os EPS podem ser produzidos por

diversos microorganismos, seja fototrófico ou heterotrófico. Levando em conta a organomineralização, os EPS podem ser a matriz orgânica na qual os carbonatos nucleiam e crescem. A Figura 4 expõe exemplos de ocorrência de EPS em estromatólitos.

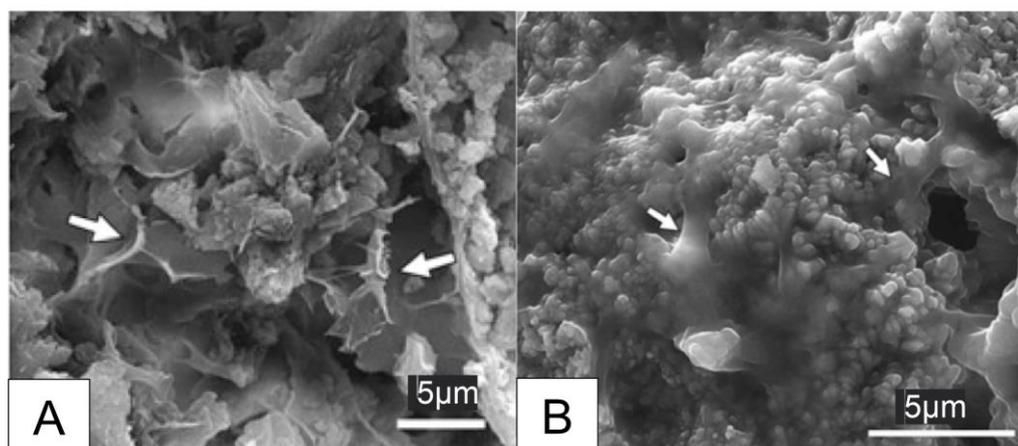


Figura 4: EPS. A) e B) EPS “*Mucus-like*” Fonte: Compilado e modificado de Perri & Spadafora (2011).

A presença de pirita framboidal em meio aos CIC é comentada nos trabalhos de Tribovillard *et al.* (2018), Meinhold *et al.* (2019). Bond & Wignall (2010) com base na variação dos diâmetros de piritas framboidais elencaram cinco estados redox de formação deste mineral (Tabela 1).

Tabela 1: Características utilizadas para definir condições redox durante a deposição Fonte: Bond & Wignall (2010).

Conditions	Framboid parameters	Sedimentary fabric
<u>Euxinic</u> (persistently sulfidic lower water column)	Small (mean 3–5 µm), abundant, with narrow size range. Framboids dominate pyrite fraction.	Finely laminated
<u>Anoxic</u> (no oxygen in bottom waters for long periods)	Small (mean 4–6 µm), abundant, with a few, larger framboids. Framboids dominate pyrite fraction.	Finely laminated
<u>Lower dysoxic</u> (weakly oxygenated bottom waters)	Mean 6–10 µm, moderately common, with a few, larger framboids and some crystalline pyrite.	Finely laminated with rare bioturbation
<u>Upper dysoxic</u> (partial oxygen restriction in bottom waters)	Moderately common to rare, broad range of sizes, only a small proportion <5 µm. Majority of pyrite as crystals.	Microburrowed. Bioturbation may obscure laminated fabric.
<u>Oxic</u> (no oxygen restriction)	No framboids, rare pyrite crystals.	Burrowed and/or massive

4 AFLORAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

A breve descrição do afloramento, aqui apresentada, é uma compilação dos relatórios das equipes do Mapeamento Sedimentar do ano de 2019 do curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

O afloramento com ocorrência das CIC (Figura 5A) está em corte de estrada e a maior exposição possui aproximadamente 30 m de altura por 30 m de comprimento. É constituído por intercalações de folhelho cinza escuro e arenito, com granocrescência ascendente. A base é constituída predominantemente por folhelho com esporádicas intercalações de camadas delgadas de arenito, sendo que em direção ao topo a concentração e espessura das camadas de arenito aumentam.

Três níveis de estruturas foram identificados na porção inferior do folhelho. As estruturas ocorrem em camadas lenticulares (Figura 5B) em meio a folhelhos silicificados (Figura 5C). A espessura das lentes pode chegar a 25 cm e pode variar lateralmente. Em algumas áreas as camadas de CIC deformam o folhelho encaixante (Figura 5D). Lentes carbonáticas sem estruturas CIC aparentes também foram observadas.

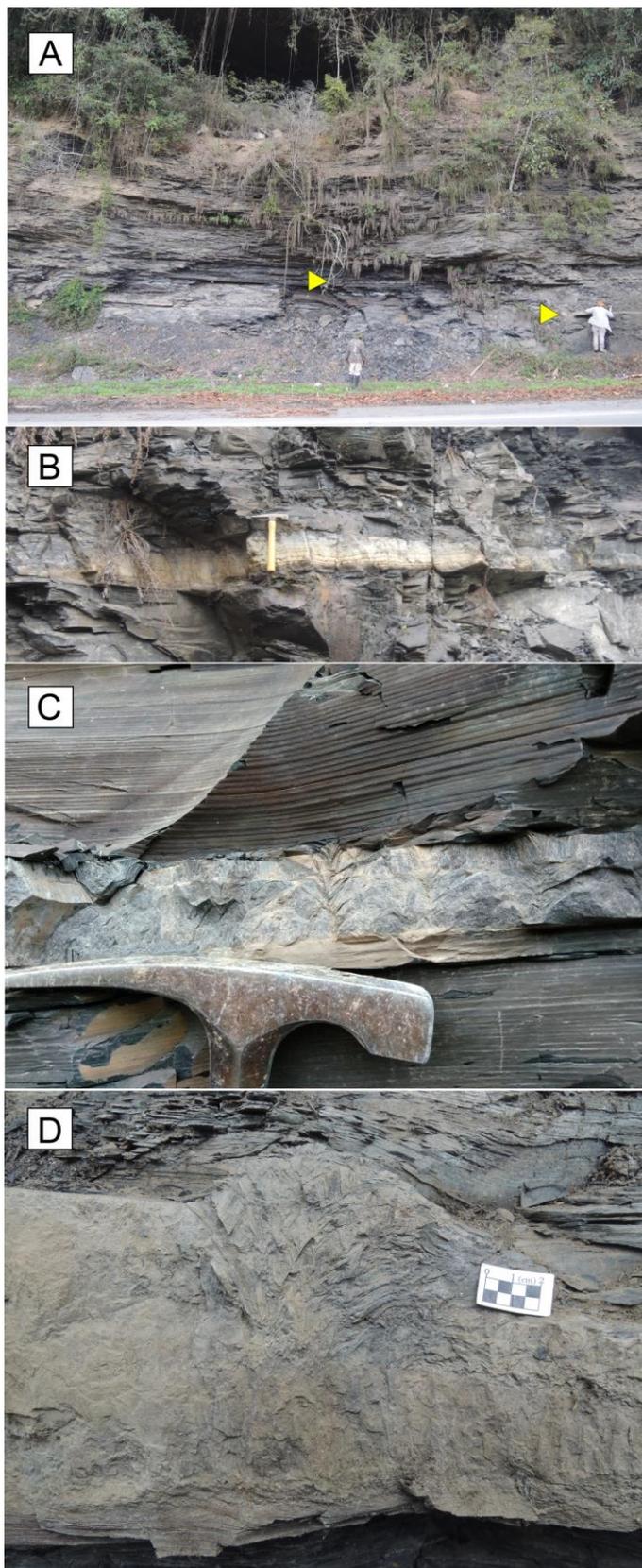


Figura 5: Estruturas CIC em afloramento: A) Afloramento onde as estruturas CIC foram descritas, estas localizadas em lentes indicadas pelas setas amarelas. B) Camada lenticular onde ocorre CIC. C) Estruturas CIC em meio a folhelhos silicificados. D) Lente contendo CIC e deformando folhelho encaixante.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras utilizadas neste trabalho foram coletadas pelas equipes da disciplina de Mapeamento Sedimentar do ano de 2019 do curso de graduação em Geologia da UFPR. Todos os exemplares analisados pertencem ao Folhelho Lontras da Formação Rio do Sul.

A descrição macroscópica foi realizada em 9 amostras, e entre essas, 4 rochas representativas foram selecionadas para a confecção de 5 lâminas delgadas para a descrição microscópica. A Figura 6 apresenta as áreas nas quais foram executados os cortes para a confecção das lâminas petrográficas.

Da mesma forma, a partir da descrição macroscópica definiram-se 4 áreas de interesse para caracterização micromorfológica e geoquímica semi-quantitativa por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), equipada com Espectrômetro de Dispersão de Energia (*Energy Dispersive XRay Spectroscopy* – EDS) e Microtomografia Computadorizada (Micro CT). A Figura 6 mostra as áreas onde foram feitos os cortes para análise em MEV e Micro CT, e a Tabela 2 compila a relação das análises e as amostras escolhidas para tais.

A confecção das seções delgadas foi realizada no Laboratório de Laminação (LAMIN) e analisadas no Laboratório de Pesquisa em Microscopia (LAPEM), enquanto o MEV e Micro CT foram feitas no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) da UFPR.

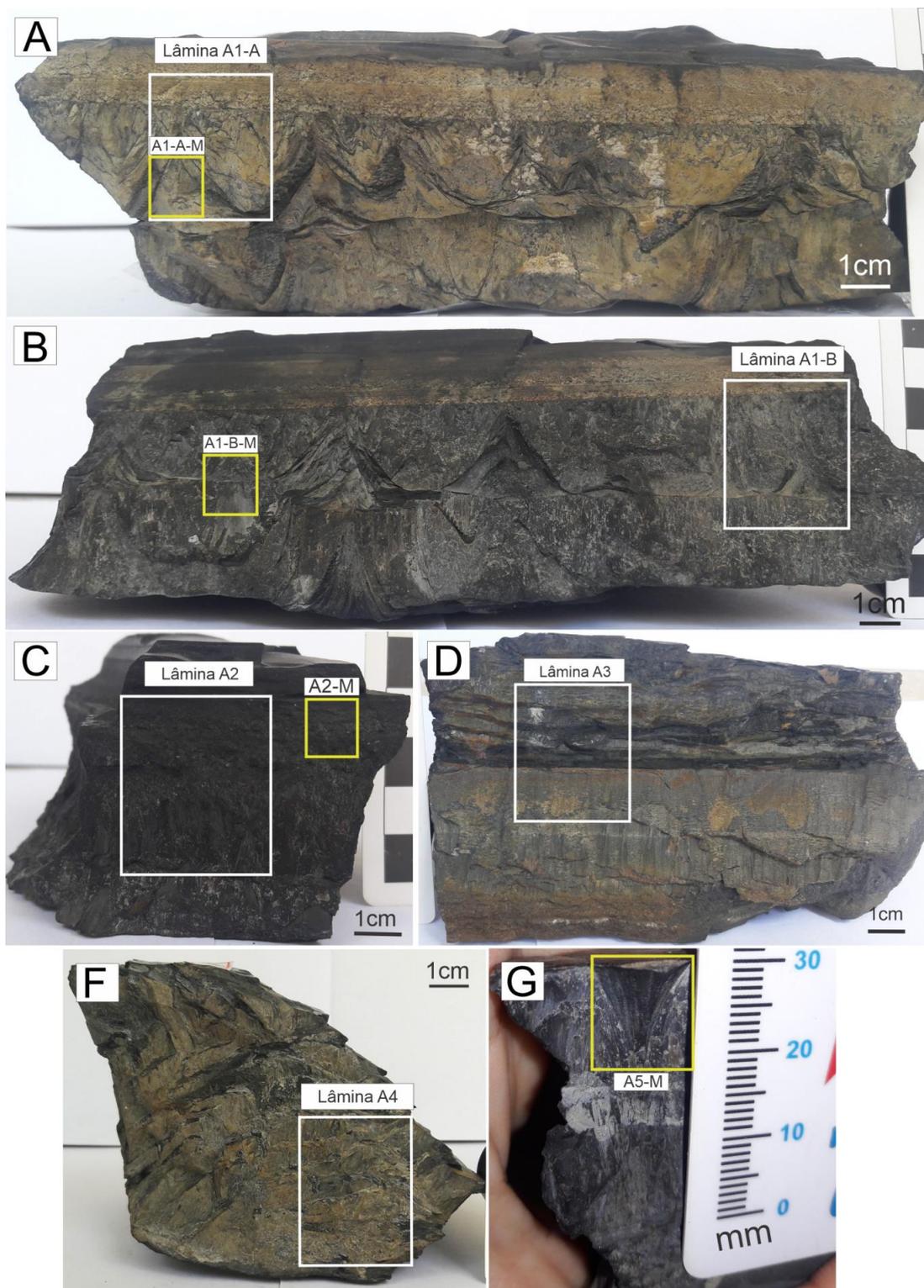


Figura 6: Amostras e cortes realizados para confecção de lâminas petrográficas e análise em MEV/ Micro CT. A) e B) Amostra A1. C) Amostra A2, D) Amostra A3, E) Amostra A4 e F) Amostra A5. O retângulo branco representa o corte aproximado para as lâminas petrográficas e o retângulo amarelo representa o corte aproximado para as análises de MEV e Micro CT.

Tabela 2: Relação das amostras e métodos utilizados. Na amostra A1 houve 2 seleções de amostragem para Micro CT/MEV.

Amostra	Lâmina	Micro CT	MEV e EDS
Amostra A1	A1-A	X	X
	A1-B		
Amostra A2	A2	X	X
Amostra A3	A3		
Amostra A4	A4		
Amostra A5		X	X
Amostra A6			
Amostra A7			
Amostra A8			
Amostra A9			
Total:	5	4	4

5.1 ANÁLISE FACIOLÓGICA

Para Tucker (2003) uma Fácies é definida por um conjunto característico de atributos, como: uma litologia particular, textura, grupo de estruturas sedimentares, assembleia fossilífera, cor, geometria, etc. A divisão faciológica foi realizada com o objetivo de facilitar a estruturação do trabalho, de modo a compreender com mais clareza a relação das CICs com a rocha encaixante e com as camadas de argila que as circundam.

As Fácies definidas foram: Encaixante, Laminada, Cone e Caótica. As Fácies Encaixante, Laminada e Cone ocorrem, em geral, associadas. Enquanto a Fácies Caótica ocorre isoladamente ou com pequenos níveis da Fácies Laminada. Sendo assim, subdividiram-se as 9 amostras em estudo em dois grupos, ilustrados na Figura 7 e 8 e organizados na Tabela 3.

Todas as Fácies foram descritas macroscopicamente. As Fácies Laminada, Cone e Caótica passaram por análise petrográfica, e para aprofundar o estudo as Fácies Laminada e Cone tiveram pontos examinados em microescala por MEV e Micro CT.

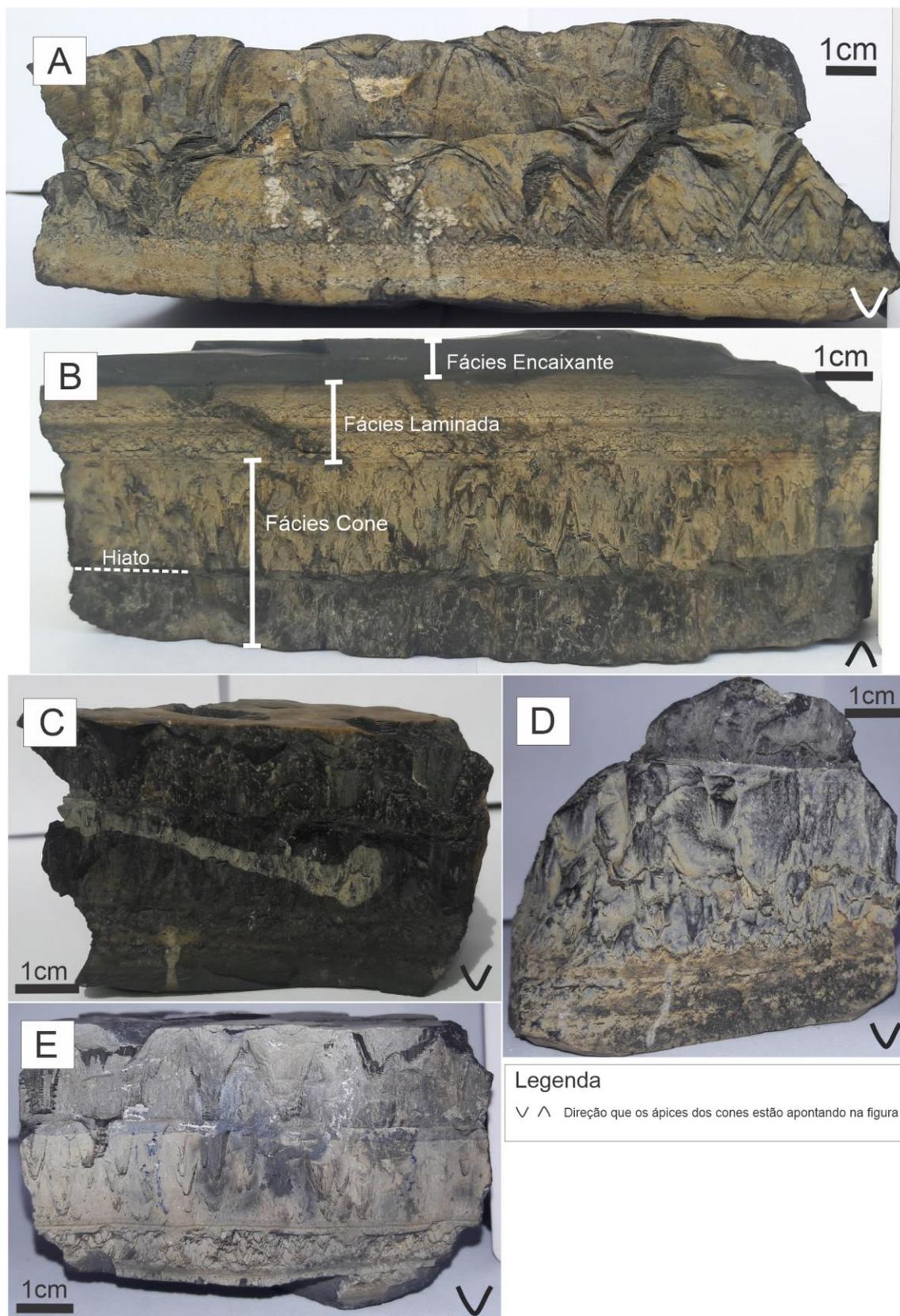


Figura 7: Grupo 1, amostras compostas por rochas apresentando 3 Fácies associadas (Encaixante, Laminada e Cone). A) Amostra A1. B) Amostra A2, na imagem está indicada as 3 Fácies. C) Amostra A5. D) Amostra A6 e E) Amostra A7.

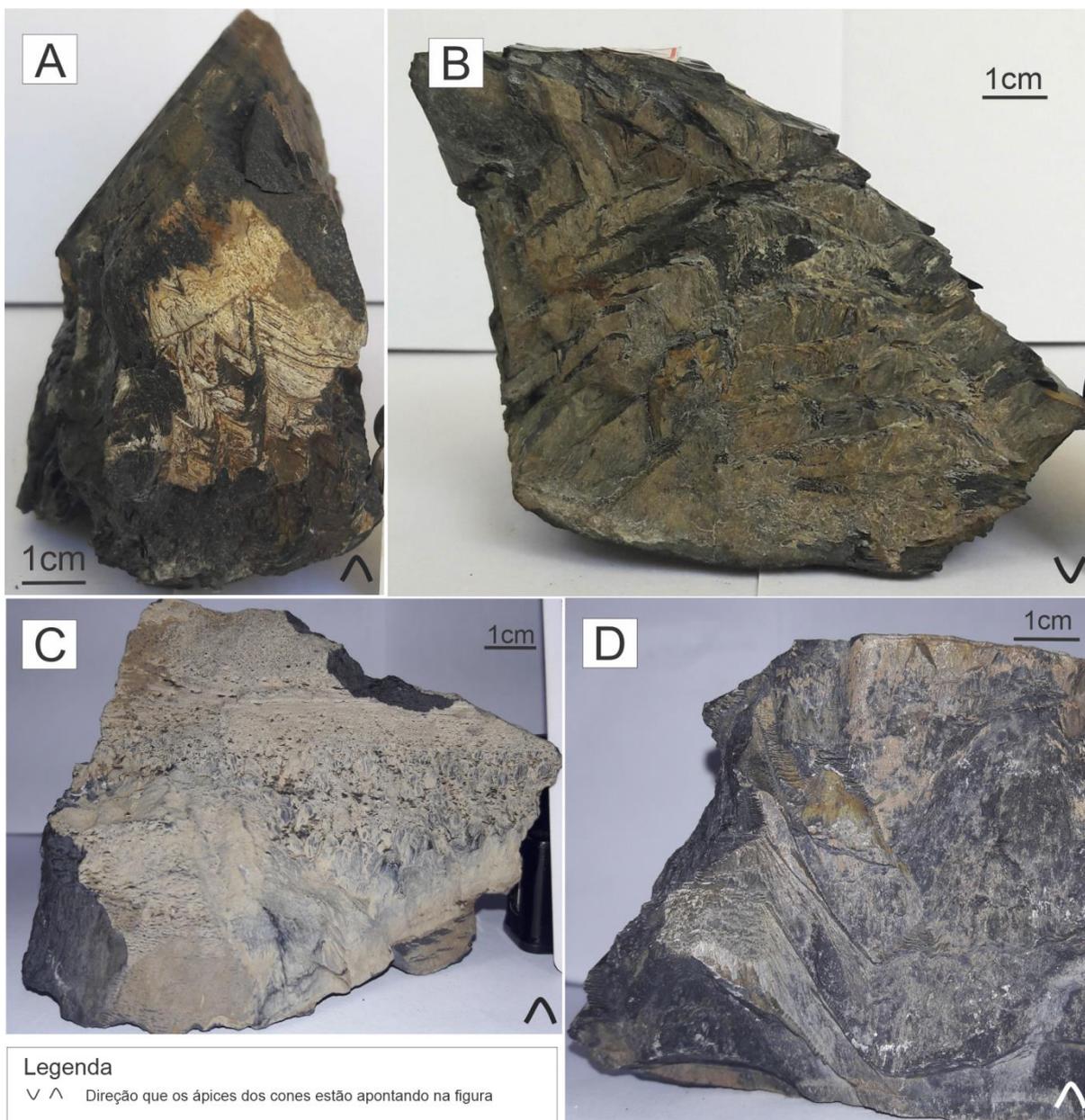


Figura 8: Grupo 2, composto por rochas apresentando a Fácies Caótica. A) Amostra A3, B) Amostra A4, C) Amostra A8 e D) Amostra A9.

Tabela 3: Relação de amostras separadas pelos 2 grupos predominantes.

Grupo 1: composto por rochas apresentando 3 Fácies (Encaixante, Laminada e Cone)	Grupo 2: composto por rochas apresentando a Fácies Caótica
A1	A3
A2	A4
A5	A8
A6	A9
A7	

5.1.1 Análise Macroscópica e Microscópica

A descrição macroscópica foi realizada com auxílio de lupa de 10x, canivete e ácido clorídrico (10%). A caracterização microscópica foi realizada com auxílio do microscópio petrográfico. Este é composto por duas lentes convergentes (objetiva e ocular), a lente objetiva forma uma imagem real e aumentada do objeto que é observado (como imagem virtual) na lente ocular (Machado e Nardy, 2017).

A análise petrográfica foi efetuada de modo a observar as estruturas, texturas e o arranjo cristalino. Trabalhos anteriores propuseram feições petrográficas para CICs de diversas localidades ao redor do mundo (Tabela 4), as quais foram consideradas no presente estudo.

Tabela 4: Compilação das principais características petrográficas segundo Gresley (1894), Tarr (1922), Woodland (1964), Gilman and Metzger (1967) e Selles-Martinez (1994).

Feição	Definição	Autor
Agregados do tipo pena	Cristais de calcita aciculares curvados associados com a junta entre um cone e o copo do cone	Gresley (1894)
Cone dentro de cone	Cone(s) menor (es) incluso (s) em cone(s) maior(es)	Tarr (1922)
Estrias	Estrutura semelhante a <i>slickenside</i>	Tarr (1922)
<i>Nested cones</i>	Estruturas <i>cone in cone</i> desenvolvidas ao longo de um eixo comum	Woodland (1964)
Microcones	Cones de menor magnitude comparados com cones penetrantes	Woodland (1964)
Cones parciais	Fragmento menor de cone ligado a um cone principal	Woodland (1964)
<i>Spindle shaped</i>	Formato em fuso dos cristais de calcita observados em lâmina petrográfica	Woodland (1964)
Superfície ondulada sobrepostas	Localizada no interior dos cones	Woodland (1964)
Superfície dentada	Argila dos cones	Woodland (1964)
Copo do cone	Superfície cônica deixada por um cone quando é removido	Woodland (1964)
Extinção radial	Padrão de extinção radial dos cristais de calcita quando observados em microscópio óptico	Gilman and Metzger (1967)
Anéis de argila	Se desenvolvem paralelamente as bases dos cones, cobrem copos de cone e são triangulares em corte paralelo ao eixo dos cones	Selles-Martinez (1994)
<i>Telescoped cones</i>	Bases de cones que se projetam positivamente ou negativamente	Selles-Martinez (1994)

As 5 seções delgadas foram confeccionadas no LAMIN, com o corte realizado paralelamente ao eixo do cone, e analisadas no LAPEM do Departamento de Geologia (DEGEOL) da UFPR. Para a análise das lâminas petrográficas e obtenção das fotomicrografias utilizou-se o microscópio de luz transmitida do modelo *Leica DFC-295* com câmera acoplada. Para tratamento das imagens empregou-se o software *Leica Application Suite V4*.

5.1.2 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV opera com a incidência de feixe de elétrons que varrem a superfície da amostra produzindo elétrons e fótons que através de detectores são convertidos em sinal de vídeo (Dedavid *et al.*, 2007). Neste trabalho, utilizaram-se dois sinais emitidos: de elétrons secundários (SEI) e de elétrons retroespalhados (BEC). O de elétrons secundários compõem imagens em que o contraste se dá pelo relevo da amostra, já no de elétrons retroespalhados as imagens são obtidas com base no contraste da composição de acordo com o número atômico dos elementos da amostra (Dedavid *et al.*, 2007).

O MEV foi utilizado no intuito de caracterizar a microestrutura das estruturas C/CS, além de buscar evidências microbiais e identificação da química mineral por meio do EDS acoplado. Para a obtenção das imagens houve a metalização das amostras e em seguida a aquisição das imagens empregando o equipamento da marca JEOL - 6010LA com o auxílio do software *In Touch Scope JSM-6010*. A observação ocorreu no LAMIR da UFPR.

5.1.2.1 Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS)

O EDS acoplado ao MEV é capaz de identificar os elementos presentes em fases minerais através de um espectro de raio X, emitido pela amostra, após o bombardeio de feixes de elétrons (Dedavid *et al.*, 2007). Os raios X emitidos estão relacionados ao número atômico do objeto e através da energia ou comprimento de onda é possível a identificação do elemento químico que emite a radiação (Dedavid *et al.*, 2007).

Para este trabalho o uso do EDS foi realizado de modo a obter uma análise química semi-quantitativa de pontos específicos durante as análises do MEV. E para a análise por Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS) foi usado o equipamento da marca JEOL - EX-94410T1L11. A investigação ocorreu no LAMIR da UFPR.

5.1.3 Microtomografia Computadorizada de Raios X (Micro CT)

Os componentes do Micro CT são: a) uma fonte de raios X, b) um detector e c) um sistema de rotação. Segundo Mees *et al.*, 2003, trata-se de uma técnica não destrutiva que expõe as estruturas internas de objetos analisados de acordo com as variações atômicas e de densidade, sendo que as imagens capturadas registram diferenças no grau de atenuação dos raios X. As figuras tridimensionais são formadas a partir da aquisição de várias imagens bidimensionais obtidas pela rotação em um eixo central (Mees *et al.*, 2003).

O Micro CT foi utilizado no intuito de observar estruturas internas de forma tridimensional em áreas delimitadas das amostras. Para tal, as amostras foram preparadas em tabletes de aproximadamente 15 mm de altura por 10 mm de largura, seguido pela aquisição das imagens através do *software Skyscan 1172*, por fim houve o tratamento das imagens com a utilização do *software CTAnalyser*. Utilizou-se filtro de alumínio na análise. A análise ocorreu no LAMIR da UFPR.

6 RESULTADOS

O capítulo Resultados está estruturado de modo a abordar a descrição das Fácies: Encaixante, Laminada, Cone e Caótica. Englobando análise em amostras macroscópicas, lâminas delgadas e observação em microescala através de MEV e Micro CT. Nas amostras estudadas só havia a parte inferior do folhelho encaixante, logo as informações contidas neste trabalho sobre a rocha encaixante compreendem apenas a porção inferior do folhelho.

6.1 DESCRIÇÃO DE FÁCIES

De modo geral as amostras possuem cor cinza escura e apresentam-se sãs, com porções levemente oxidadas, de cor castanha. As rochas são constituídas por calcita, níveis argilosos, grãos de quartzo, minerais opacos e folhelho encaixante.

Com a análise em MEV foi possível observar com mais detalhe a assembleia mineralógica constituinte do objeto de estudo, além da observação de estruturas que podem indicar influência microbiana.

Em caracterização tridimensional por meio do Micro CT foram diferenciados certos minerais opacos, películas de argila que contornam os cones e conseqüentemente alguns cones. As camadas de argila e o material que constitui os cones se apresentam em escala de cinza, enquanto os minerais opacos apresentam cor branca devido a maior atenuação de raios X. A diferenciação entre as argilas e os cones foi realizada observando as diferenças da escala de cinza de cada matéria, além da observação do formato dos materiais. O material argiloso se apresenta nas imagens como cinza escuro e os cones como cinza mais claro. Não foi possível realizar grandes inferências quanto a esta análise devido à baixa porosidade e diferenças discretas na escala de cinza.

O detalhamento das Fácies se dará a seguir.

6.1.1 FÁCIES ENCAIXANTE

6.1.1.1 Descrição Macroscópica

A Fácies Encaixante é composta por folhelho cinza escuro com baixo grau de alteração, podendo ou não reagir ao HCl. Possui laminação plano paralela e entre algumas laminações há finas camadas de carbonato de até 1 mm (Figura 9A). Em faces onde houve o deslocamento das lâminas da rocha é notável a presença de cristais anédricos submilimétricos de muscovita. O folhelho faz contato com a Fácies que será descrita a seguir. O contato entre o folhelho e a Fácies Laminada é bem definido variando de brusco a gradacional (Figura 9B e C).

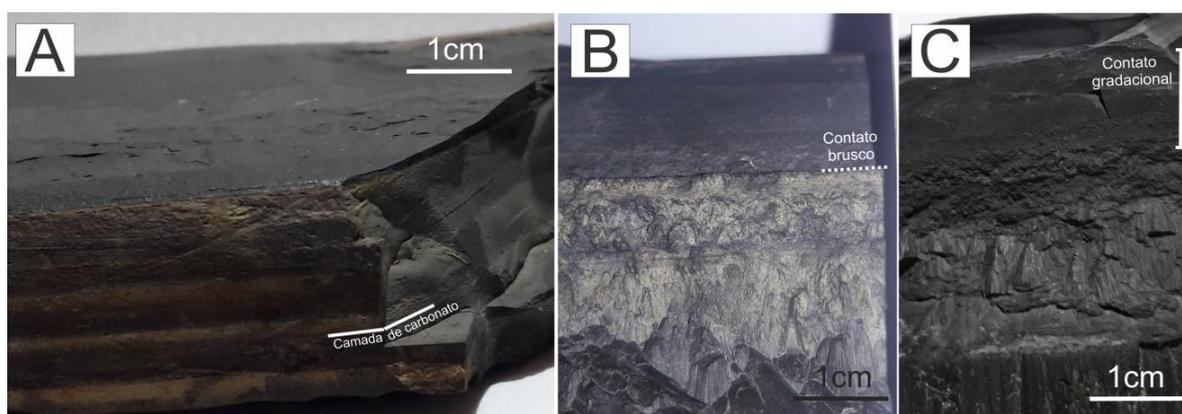


Figura 9: Feições da Fácies Encaixante. A) Amostra A1, com finas camadas de carbonatos em meio ao folhelho. B) Amostra A2, ressaltando contato brusco entre Fácies Encaixante e Fácies Laminada. C) Amostra A2, exibindo o contato gradacional entre Fácies Encaixante e Fácies Laminada.

6.1.2 FÁCIES LAMINADA

6.1.2.1 Descrição Macroscópica e Microscópica

A Fácies Laminada, variando de 8 mm a 13 mm, é composta pela intercalação de lâminas argilosas com camadas de microcones que reagem fortemente ao HCl (Figura 10A e B).

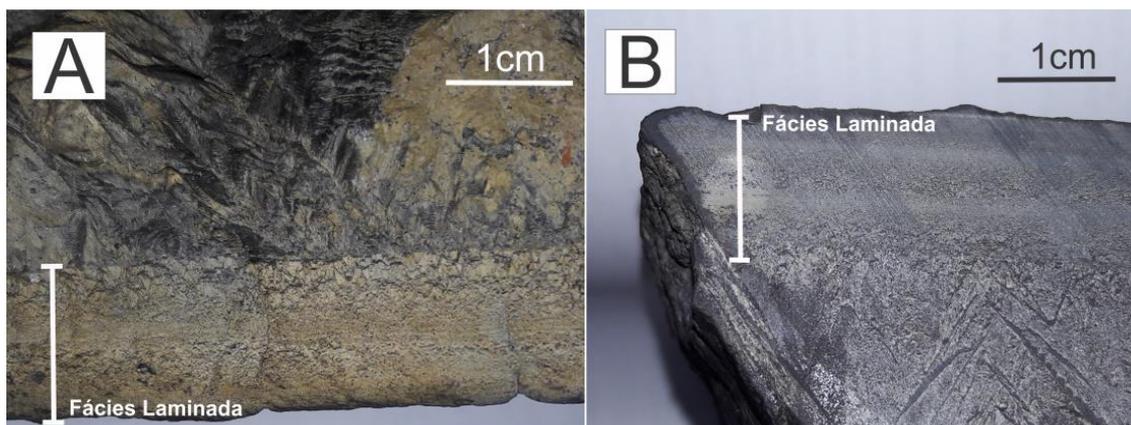


Figura 10: Fácies Laminada em amostras macroscópicas. A) e B) Amostra A1, detalhe da porção que ocorre intercalação de estruturas CIC com finas camadas de argila.

Em seção delgada foi constatado que os microcones possuem em média 0,25 mm de altura e são constituídos por calcita de hábito acicular (Figura 11A), de extinção radial. Em direção ao topo da Fácies as estruturas aumentam em altura (Figura 11B e C). Há películas de argila contornando os microcones.

Grãos detríticos de quartzo anédricos, de em média 0,1 mm, estão presentes em meio às lâminas argilosas, orientados em alguns pontos, segundo o eixo maior (Figura 11D). Em outras áreas ocorrem grãos de quartzo no topo de cones (Figura 11E) e ainda foi verificada a presença de um fragmento lítico (Figura 11F). Minerais opacos anédricos (Figura 11G), de em média 0,1 mm, também estão presentes na Fácies.

O contato entre a Fácies Laminada e a Fácies Cone é brusco e definido, entretanto há cones que transpassam o contato (Figura 11H). Em lâmina petrográfica é possível observar um agregado de cristais de calcita anédricos, com mistura de níveis argilosos, entre a zona de contato (Figura 11I).

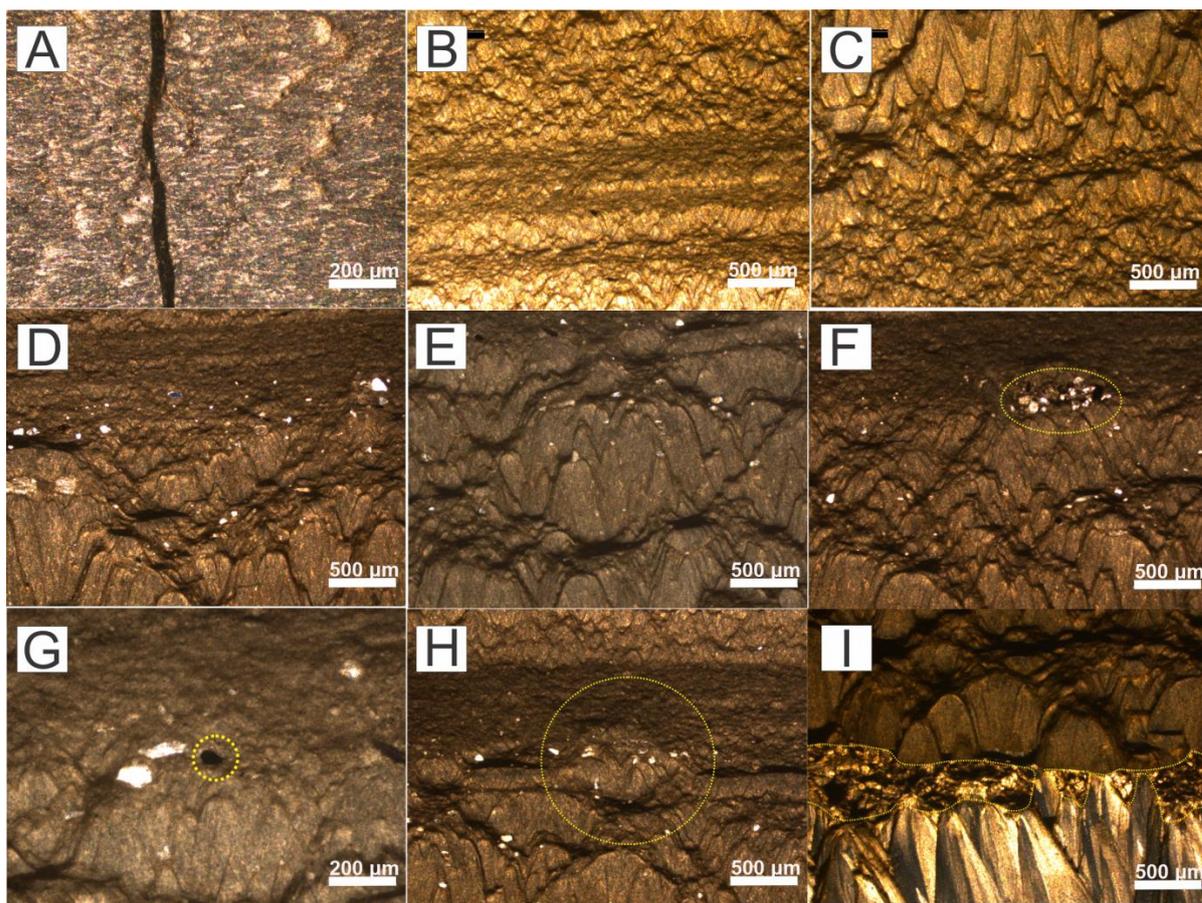


Figura 11: Fotomicrografias da Fácies Laminada em polarizadores paralelos. A) Lâmina A2, cristais de calcita acicular. Objetiva de 10x. B) e C) Lâmina A1-A, aumento da altura dos microcones em direção ao topo da Fácies. Objetiva de 5x. D) Lâmina A2, grãos de quartzo em meio a camadas de argila orientados segundo o eixo maior. Objetiva de 5x. E) Lâmina A2, grãos de quartzo no topo de cones. Objetiva de 5x. F) Lâmina A2, fragmento lítico. Objetiva de 5x. G) Lâmina A2, mineral opaco, Objetiva de 10x. H) Lâmina A2, contato com a Fácies Cone e apontando cones ultrapassam os limites do contato. Objetiva de 5x. I) Lâmina A1-A, agregado de cristais de calcita anédricos, com mistura de níveis argilosos, entre a zona de contato entre as Fácies. Objetiva de 5x.

6.1.2.2 Microanálise em MEV

Os cristais de calcita são euédricos de hábito acicular (Figura 12A) e em alguns pontos anédricos. Os contatos entre os cristais de calcita e as camadas de argila são bem definidos, e como descrito anteriormente há níveis de argila de maior espessura fomentando níveis de menor espessura (Figura 12B). Os minerais que constituem as camadas de argila possuem hábito placóide e apresentam óxidos de alumínio, de magnésio, de potássio, de ferro, de alumínio e sílica em suas composições. Em meio aos cristais de calcita há pirita, além da presença de sulfeto de zinco (provável esfarelita) (Figura 12C).

Estruturas amorfas semelhantes a biofilmes foram observadas, meio aos cristais de calcita, com minerais agregados a elas (Figura 12D e E). Não foi possível determinar a química de tais estruturas com exceção da estrutura presente na Figura 12F que apresentou 69% de carbono.

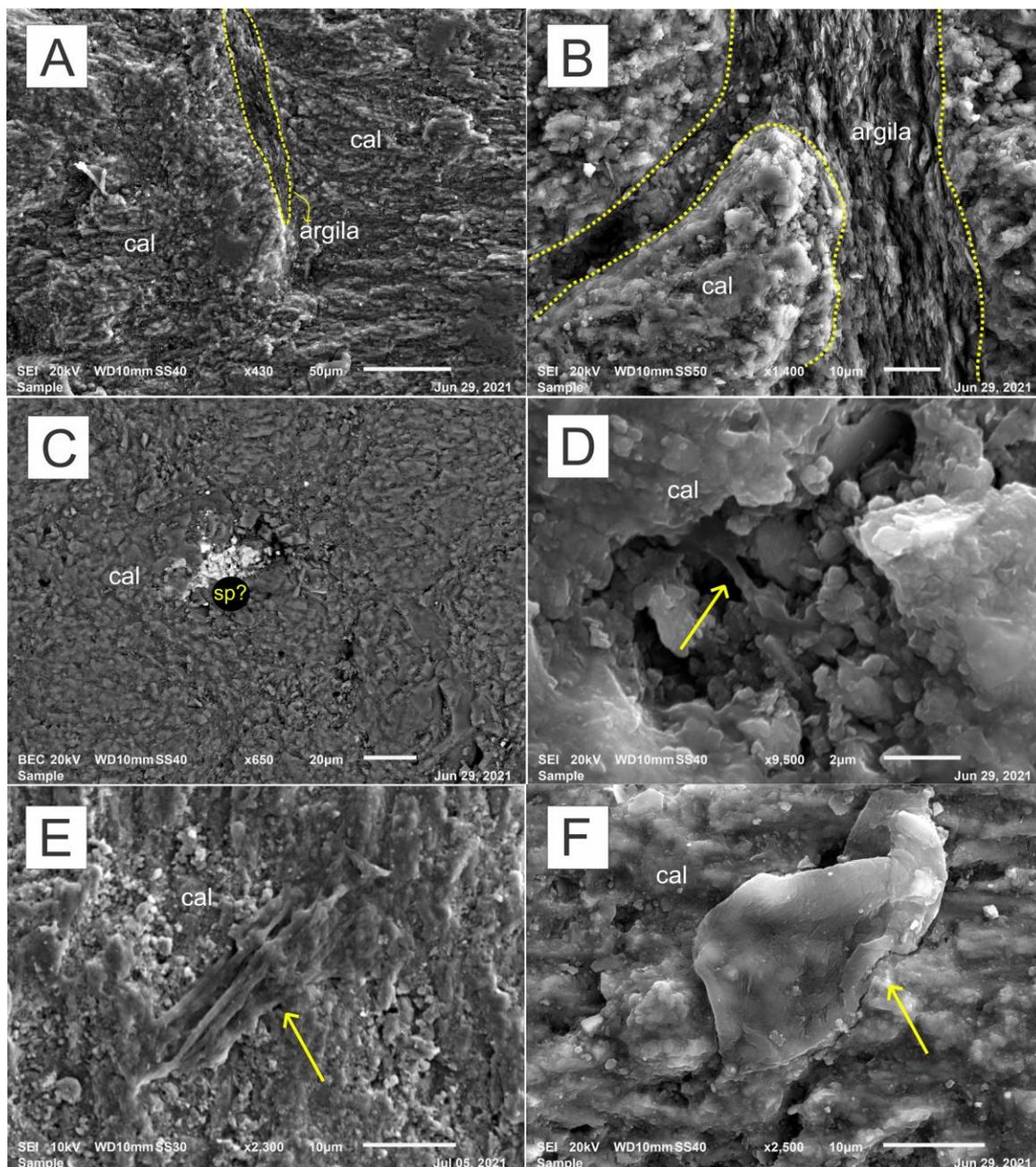


Figura 12: Fácies Laminada em MEV. A) Cristais de calcita (cal) de hábito acicular, a área em amarelo indica um pequeno nível de argila. B) Contatos definidos entre os cristais de calcita e as camadas. C) Provável esfarelita (sp) em meio a calcita. D), E) e F) Seta indicando estruturas amorfas semelhantes a biofilmes.

6.1.2.3 Microanálise em Micro CT

A amostra analisada apresenta uma porção da Fácies Laminada com uma pequena área da Fácies Cone.

Em plano transversal foi constatado anéis de argila contornando os cones. A presença de minerais subédricos submilimétricos (Figura 13), de baixa atenuação de Raios X, é mais abundante na região da Fácies Laminada. Em análise de porosidade constatou-se que o volume de poros representa 0,93% da amostra.

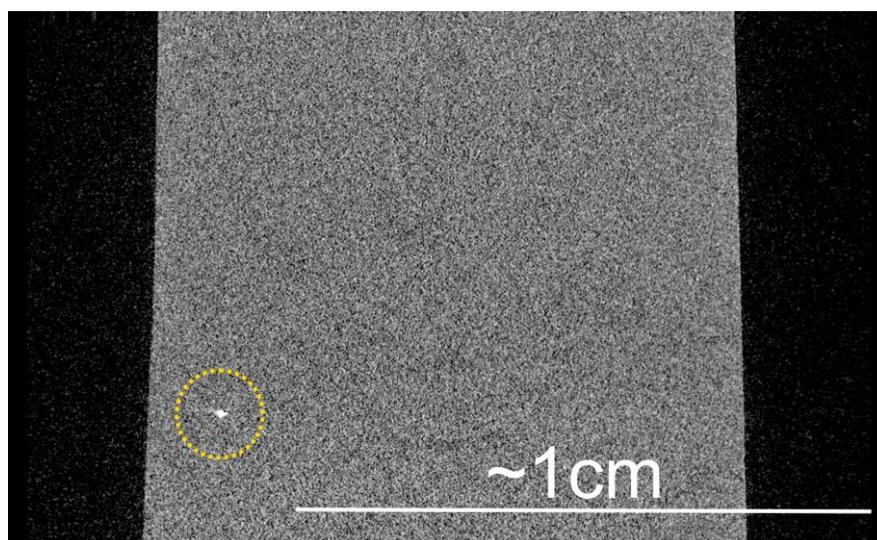


Figura 13: Fácies Laminada em Micro-CT. Detalhe ao mineral que se apresenta em branco na imagem.

6.1.3 FÁCIES CONE

6.1.3.1 Descrição Macroscópica e Microscópica

A Fácies Cone, variando de 26 mm a 42 mm, é composta por estruturas *cone in cone* bem desenvolvidas (Figura 14A) que são limitadas ao meio por um contato brusco, descrito como um hiato (Figura 14B). Além do hiato, foi observado que na amostra A6 há uma camada irregular de argila, que corta toda a rocha e contorna os cones (Figura 14C).

As alturas dos cones variam de 1 mm a 21 mm, de médias variáveis para cada amostra, mas comumente com 7 mm. Os cones apresentam ápices em cúspide e com pontas arredondadas (Figura 14D e E) e há *nested cones* (Figura 14F). Além disso, é possível observar as bases dos cones em uma das faces das

rochas, algumas se apresentam como uma depressão e outras em relevo (*telescoped cones* positivos e negativos) (Figura 14G). Por vezes, as bases exibem nucleação conjunta. Os diâmetros das bases variam de 1 mm a 20 mm, de formatos redondos a ovais. É possível observar a superfície interna dos cones onde há as depressões citadas anteriormente, nas quais são visíveis superfícies onduladas sobrepostas (Figura 14H). Nas amostras A7 e A2 na face oposta a base é possível notar pontos em alto relevo, de aproximadamente 1 mm que podem indicar ápice dos cones (Figura 14I), cujas as bordas são irregulares.

Capas de argila delimitam as estruturas CIC, as quais apresentam superfícies dentadas na porção externa, e internamente são lisas (Figura 14J). Em alguns pontos as camadas de argila demonstram feições de injeção. Por fim, na superfície de alguns cones há cristais anédricos de calcita (Figura 14K).

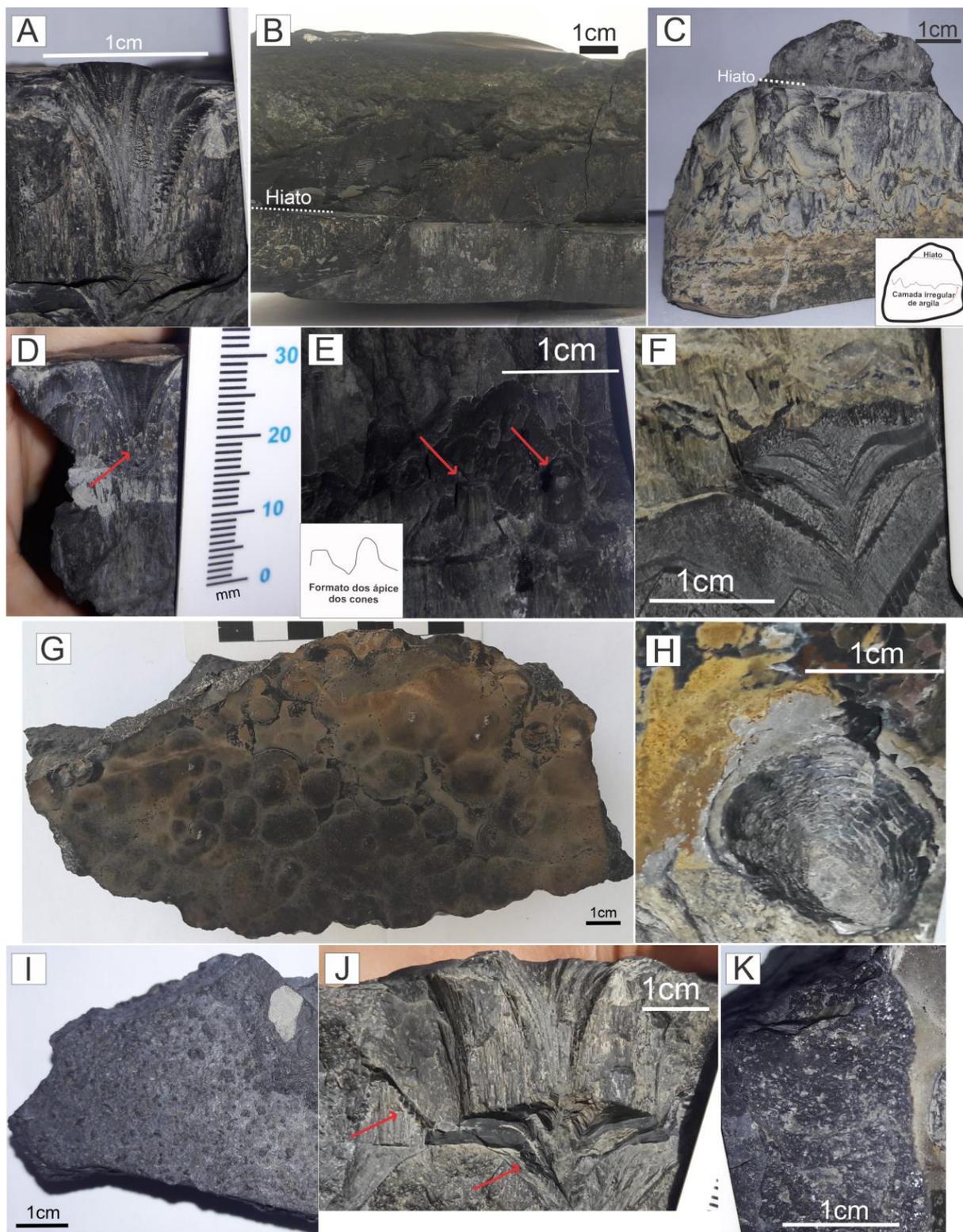


Figura 14: Fácies Cone em amostra macroscópica. A) Amostra A1, copo de cone. B) Amostra A1, detalhe do hiato que subdivide a Fácies Cone. C) Amostra A6, hiato e camada irregular de argila penetrante na amostra. Ilustração esquemática no canto direito da imagem. D) Amostra A5, detalhe de topo de cone em cúspide. E) Amostra A2, detalhe de topos de cone arredondado. F) Amostra A1, *nested cones*. G) Amostra A2, bases de cone em relevo. H) Amostra A1, base em depressão na qual é possível observar estruturação interna dos cones. I) Amostra A7, pontos em relevo, possíveis ápices de cone. J) Amostra A1, detalhe a superfície dentada indicada pela flecha esquerda e injeção

de argila indicada pela flecha esquerda. K) Amostra A5, cristais anédricos de calcita na superfície de cones.

Em seção delgada foi observado que os cristais de calcita são aciculares ou de formato *spindle-shaped* (Figura 15A), medindo de 0,1 mm a 1 mm de comprimento. Os cristais apontam para o ápice do cone e possuem extinção em padrão radial. Há orientações distintas dos cristais de calcita, a depender dos limites cones (Figura 15B, C e D). Há cones englobando cones (Figura 15E). Na porção superior do hiato os cristais de calcita possuem maior cristalinidade comparativamente com a porção inferior (Figura 15F).

Grãos de quartzo anédricos de em média 0,05 mm estão presentes nas camadas de argila e também aparecem em topos de cones (Figura 15G). Há diversos minerais opacos anédricos a subédricos, de em média 0,01 a 0,02 mm. Em algumas áreas estes minerais tem o eixo maior orientado (Figura 15H), além disso, foi observada a ocorrência de minerais opacos em topos de cones (Figura 15I).

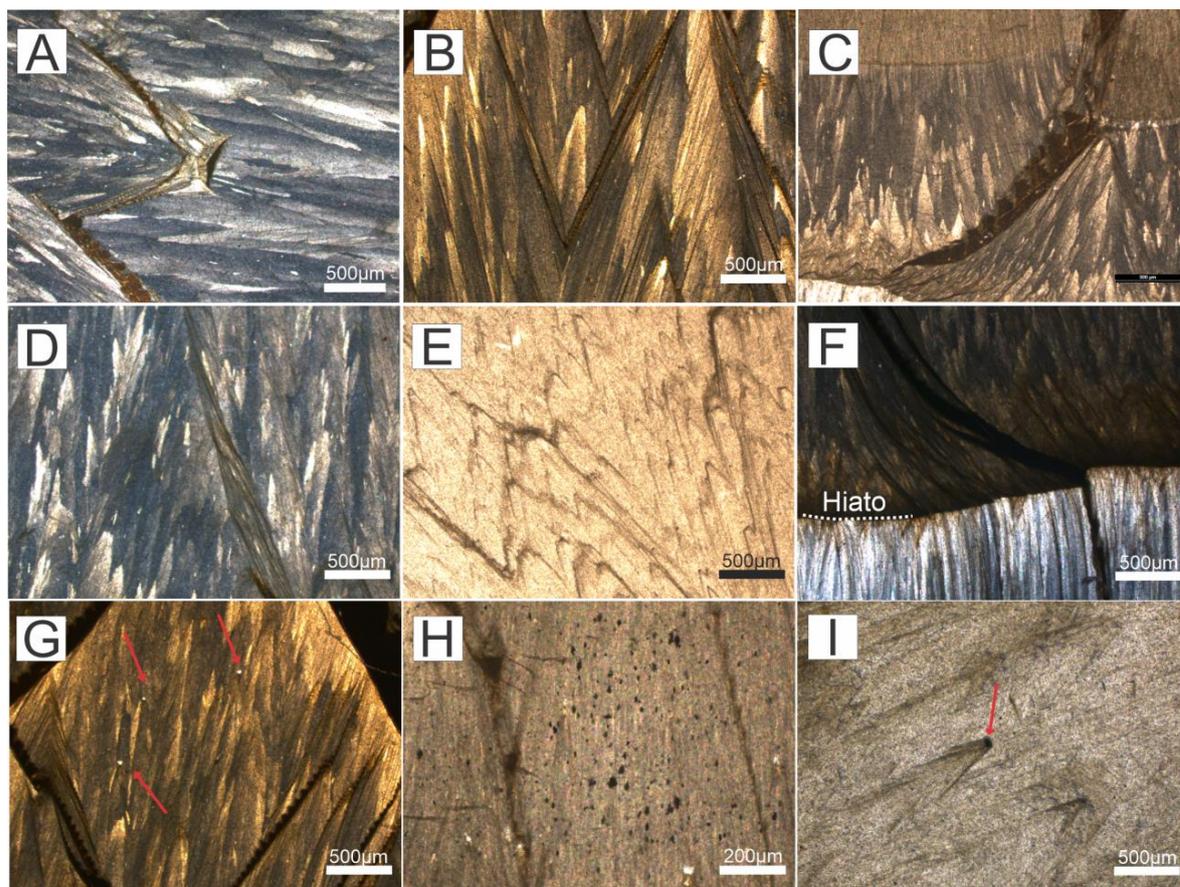


Figura 15: Fotomicrografias da Fácies Cone. A) Lâmina A1-A, calcita acicular. Polarizadores cruzados e objetiva de 5x. B) Lâmina A1-A, C) Lâmina A2 e D) Lâmina A1-B, direções distintas dos cristais de calcita a depender da disposição do cone. Polarizadores cruzados e objetiva de 5x. E) Lâmina A2, cones menores dentro de maiores cones. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x. F)

Lâmina A1-B, na porção superior do hiato os cristais de calcita possuem maior cristalinidade comparativamente com a porção inferior. Polarizadores cruzados e objetiva de 5x. G) Lâmina A1-A, cristais de quartzo no topo de cones. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x. H) Lâmina A2, minerais opacos com o eixo maior orientado tem o eixo maior orientado. Polarizadores paralelos e objetiva de 10x. I) Lâmina A1-B, mineral opaco no topo de cone. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x.

Em seção delgada as capas de argila que delimitam cones possuem as seguintes características: a) superfícies dentadas (Figura 16A); b) dobras (Figura 16B); c) camadas mais espessas de argila fomentando camadas menos espessas (Figura 16C e D); d) acumulação de argila nos topos de cone (Figura 16E e F); que também fomentam pequenas camadas de argila; e) feições em padrão difuso (Figura 16G); f) estrutura similar a estilólito e g) cones parciais (Figura 16I).

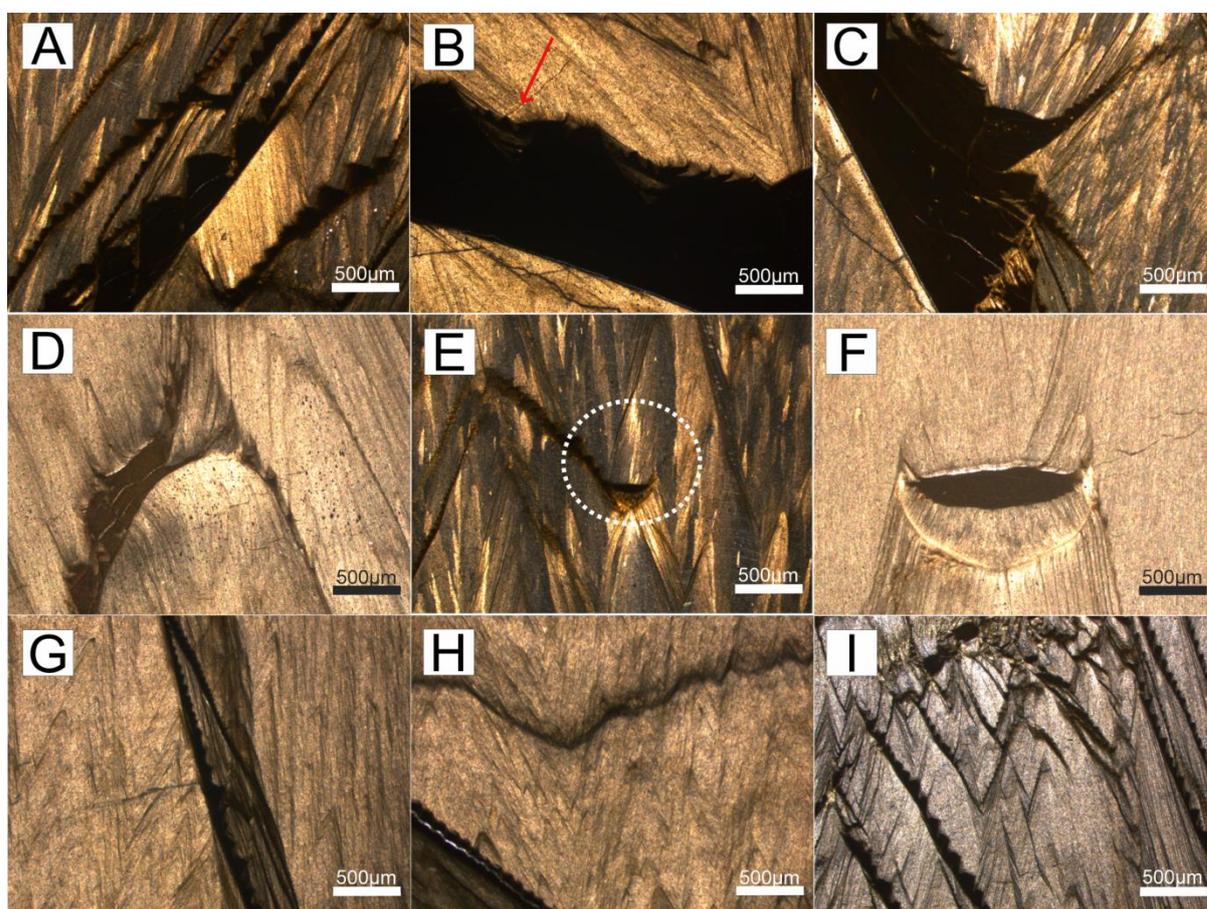


Figura 16: Fotomicrografias da Fácies Cone detalhando as camadas de argila, todas em polarizadores paralelos e objetiva de 5x. A) Lâmina A1- A, superfícies dentadas. B) Lâmina A1- A, dobras nas camadas de argila. C) Lâmina A1-A, D) Lâmina A2, camadas espessas de argila fomentando camadas menos espessas. E) Lâmina A1-A e F) Lâmina A2, acumulação de argila nos topos de cone. G) Lâmina A1-B, padrão difuso das camadas de argila. H) Lâmina A1-B, estrutura similar a estilólito. I) Lâmina A1-B, cones parciais.

6.1.3.2 Microanálise em MEV

Os cristais de calcita possuem hábito acicular, como descrito em lâmina petrográfica, e em algumas áreas é possível observar a clivagem de cristais romboédricos (Figura 17A e B). O hiato presente na Fácies Cone é marcado por um contato definido e brusco apresentando diferença entre os hábitos dos cristais de calcita (Figura 17C e D), variando de anédricas a euédricas aciculares. A porção contendo cristais euédricos está relacionada à parte superior da Fácies, enquanto a área de cristais anédricos refere-se à parte basal da Fácies Cone.

Quanto aos contatos dos cristais de calcita com as camadas de argila é possível notar feições como agregados tipo pena (Figura 17E), superfície dentada (Figura 17F), hábito placoide (Figura 17G) e em geral orientadas dentro das camadas (Figura 17H).

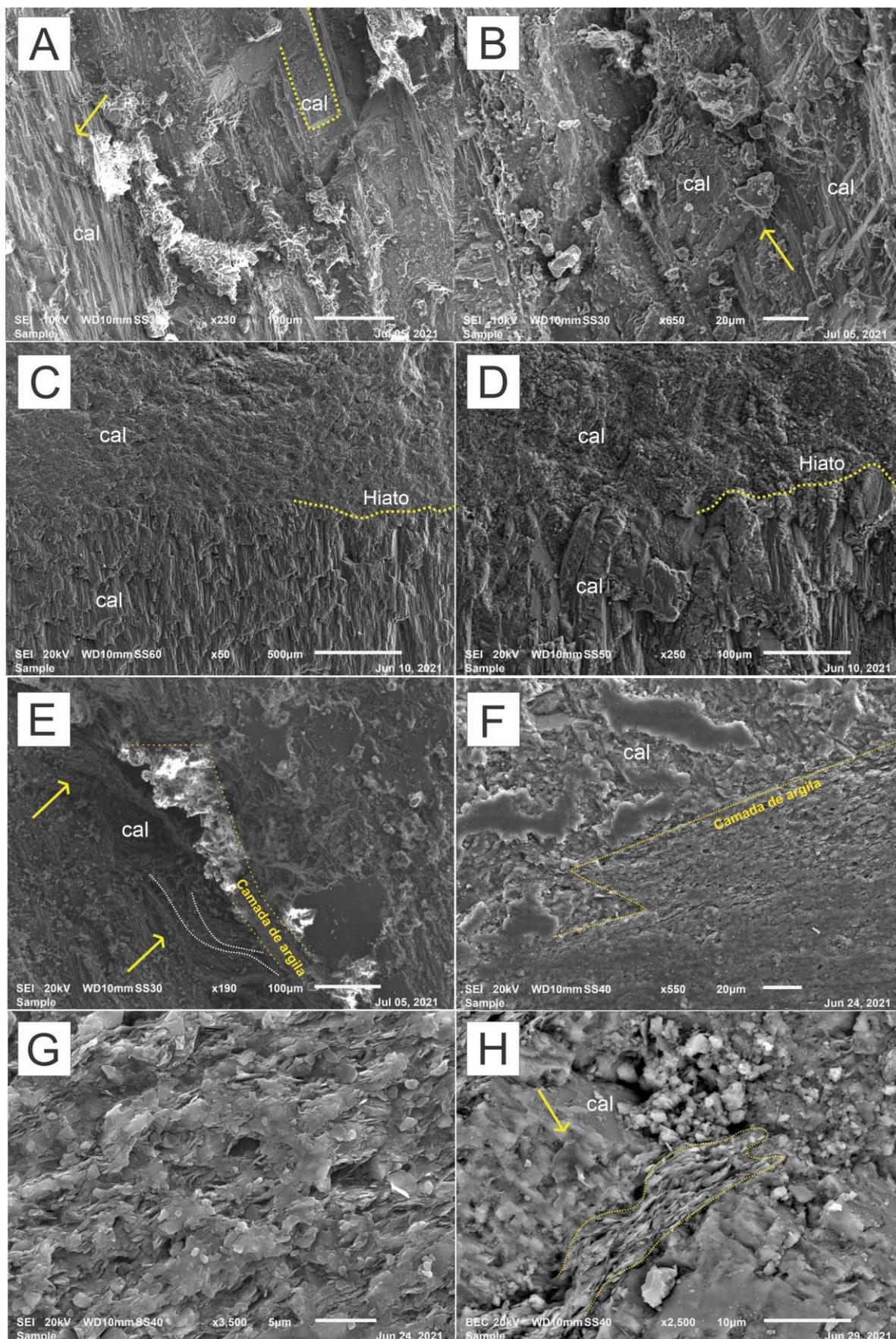


Figura 17: Fácies Cone em MEV. A) Cristais de calcita de hábito acicular, no lado esquerdo da figura e cristais de calcita com clivagem romboédrica, na direita da figura. B) Calcita com clivagem

romboédrica. C) e D) Hiato, na porção superior os cristais de calcita se apresenta anédrica enquanto que na porção superior os cristais de calcita possuem hábito acicular. E) Agregado do tipo pena desenhado em branco e marcado pelas setas amarelas. F) Superfície dentada. G) Níveis argilosos com minerais de hábito placoide. H) Níveis de argila orientados.

Há ocorrências de piratas framboidais associadas aos cristais de calcita (Figura 18A e B) e em meio às argilas (Figura 18C).

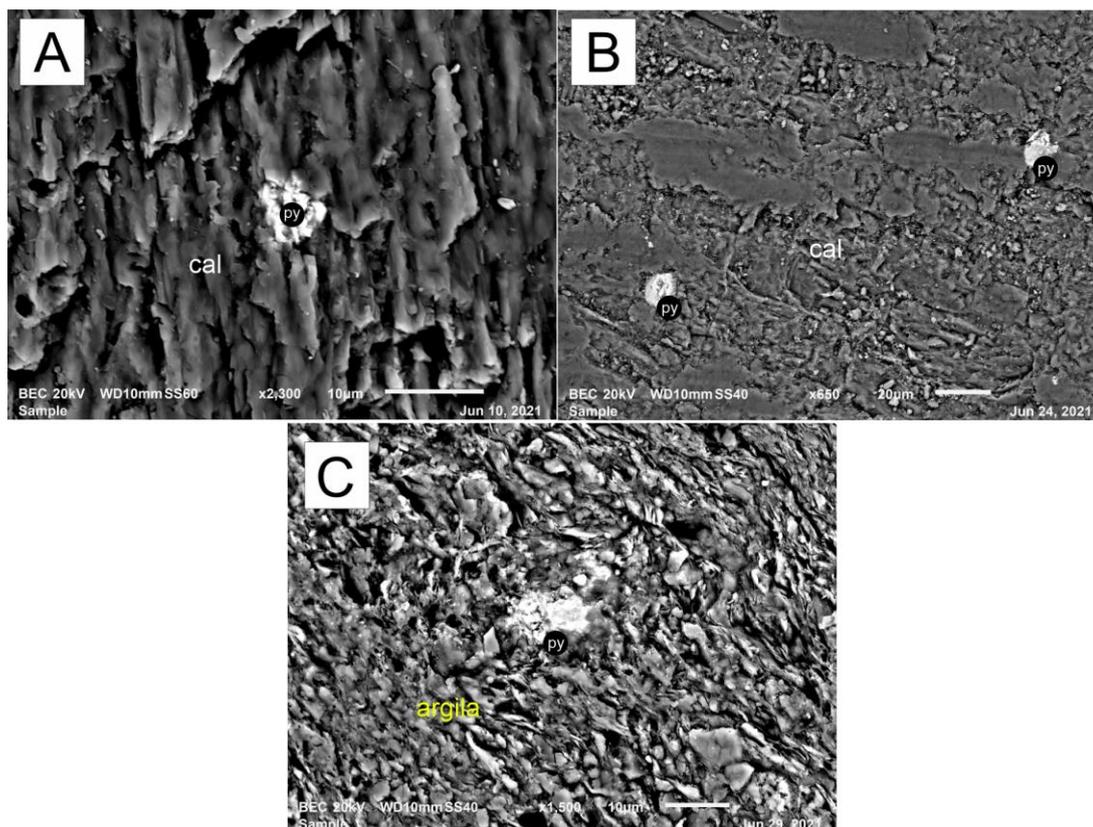


Figura 18: Piratas (py) em MEV. A) Pirita framboidal em meio à calcita. B) Piratas subédricas em meio à calcita. C) Pirita framboidal em meio às argilas.

Estruturas contendo alto teor de carbono foram descritas em meio a Fácies Cone. As estruturas ocorrem em meio aos níveis de argila ou cristais de calcita. Tais estruturas estão presentes em meio a poros e na superfície dos materiais (Figura 19A, B, C e D). Na interface entre uma camada de argila com os cristais de calcita há um material de alto teor de carbono (teores de até 100%) preenchendo algumas fraturas (Figura 19E e F). Em algumas áreas estas estruturas estão mais imersas no sedimento e em outras mais externas (Figura 19G e H).

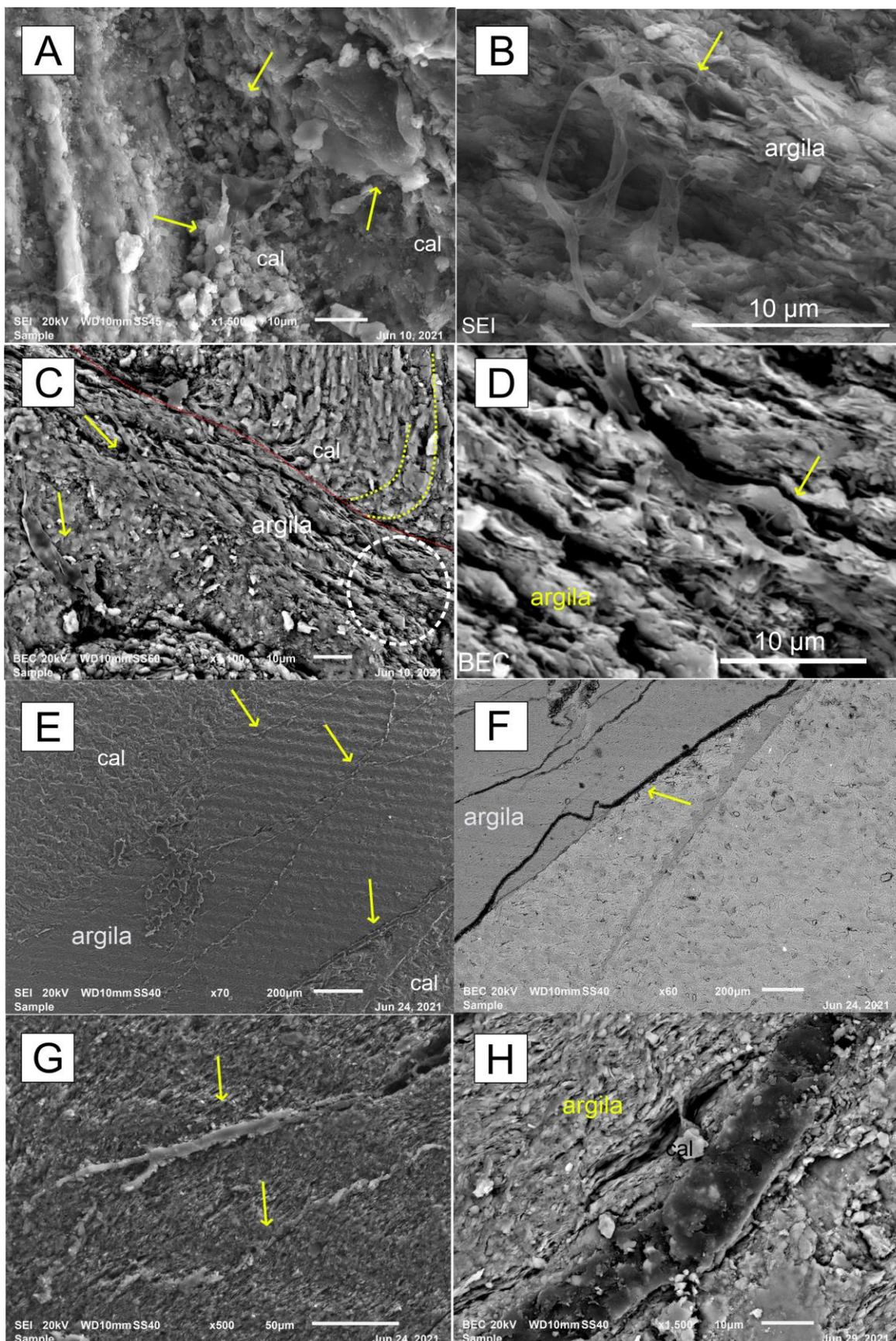


Figura 19: Feições com alto teor de carbono na Fácies Cone vistas em MEV. A) e B) Estruturas carbonosas indicadas pela seta. C) Estruturas carbonosas de caráter mais superficial indicadas pela seta. O limite vermelho indica o contato da lâmina argilosa com a calcita. As linhas amarelas indicam

o agregado tipo pena. e o círculo branco indica o zoom que está indicado na próxima figura. D) Zoom da figura C, cuja seta mostra estrutura carbonosa em poros do sedimento. E) e F) As setas indicam feições carbonosas preenchendo fraturas no nível argiloso. G) Material com alto teor de carbono com áreas imersas no sedimento. H) Estrutura carbonosa em meio à argila e carbonato.

6.1.3.3 Microanálise em Micro CT

As amostras A1-A-M, A1-B-M e A5-M representam respectivamente: a) o contato da superfície dentada com o cone; b) o hiato; c) um cone, quase individualizado, com ápice em cúspide.

Foi observado penetrabilidade de camadas de argila que contornam os cones sendo que algumas películas de argila se ramificavam, como descrito em seção delgada. Além disso, foram constatadas fraturas entre a superfície dentada e os cones (Figura 20A), e em alguns pontos as fraturas estavam preenchidas por um material que possui maior atenuação de raios X (Figura 20B). Em planos transversais visualizaram-se anéis de argila contornando os cones (Figura 20C).

Minerais subédricos submilimétricos estão dispersos na amostra e próximo ao ápice do cone (Figura 20D), atribuídos como os minerais opacos descritos em lâmina petrográfica. Quanto ao hiato notou-se que uma área possui tom de cinza mais escuro, enquanto a outra possui mais argilas contornando cones. Em análise de porosidade constatou-se que o volume de poros representa 0,08%, 0,92% e 0,69%, respectivamente das amostras A1-A-M, A1-B-M e A5-M.

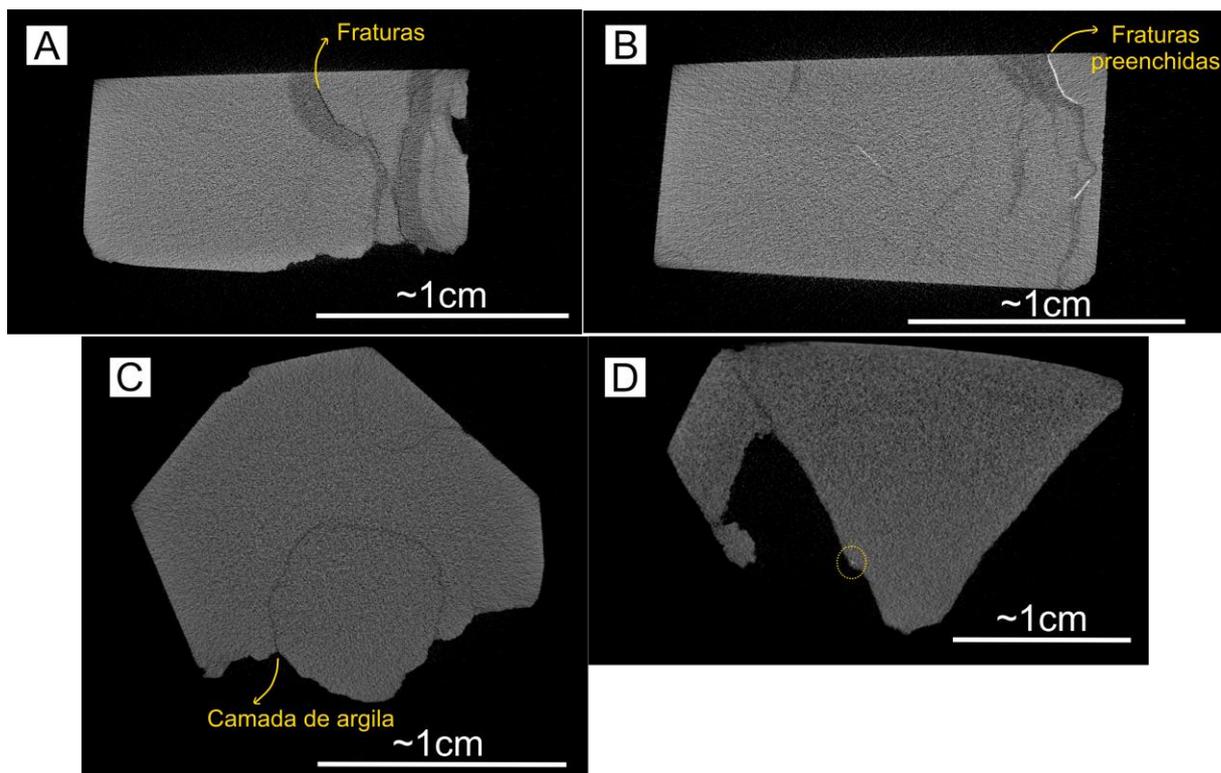


Figura 20: Imagem obtida por Micro CT da Fácies Cone. A) Amostra A1-A-M, fraturas entre a superfície dentada e os cones. Imagem obtida em plano transversal. B) Amostra A1-A-M, fraturas preenchidas por material que possui maior atenuação de raios X. Imagem obtida em plano transversal. C) A5-M, anel de argila contornando cone. Imagem obtida em plano transversal. D) Amostra A5-M. Mineral subédrico de alta atenuação de raios X, próximo ao ápice do cone. Imagem obtida em plano coronal.

6.1.4 FÁCIES CAÓTICA

6.1.4.1 Descrição Macroscópica e Microscópica

A Fácies Caótica, de camadas que variam de 60 mm a 75 mm, é composta por intercalações de argila com as estruturas CICs (Figura 21A) em um padrão de menor organização em comparação com as amostras do Grupo 1. As camadas de argila possuem em média 3 mm, sendo mais espessas que nas Fácies descritas anteriormente. As faixas de argila só reagem ao HCl em pontos onde há fraturas preenchidas por carbonato, enquanto as estruturas CIC presentes na Fácies reagem fortemente ao ácido clorídrico. As alturas dos cones variam de 0,5 mm a 16 mm, de médias de aproximadamente 5 mm. Os topos dos cones estão em cúspide ou arredondados, como na amostra A8, que apresenta uma região com inúmeros topos de cone evidentes (Figura 21B).

Há áreas em que as CICs ampliam em altura do topo para a base da camada (Figura 21C). Além disso, foi observada uma área semelhante à Fácies Laminada nas amostras A9 e A8. Esta área é composta pela intercalação de lâminas de argila com camadas de microcones (Figura 21D), no qual alguns microcones interrompem a camada de argila. Também há estrias (Figura 21E) e cones dentro de cones (Figura 21F).

As bases dos cones são visíveis em uma das faces de duas amostras do Grupo 2: A3 e A9. As feições estão em relevo e algumas nuclearam juntas, possuindo diâmetros variando de 1 mm a 3 mm, de formatos ovais e redondos (Figura 21G). Em algumas regiões na superfície das amostras há cristais de calcita acicular (Figura 21H).

As camadas de argila são dispostas contornando cones e em algumas áreas cortando as estruturas (Figura 21I). O padrão em superfície dentada também é notável nesta Fácies (Figura 21J).

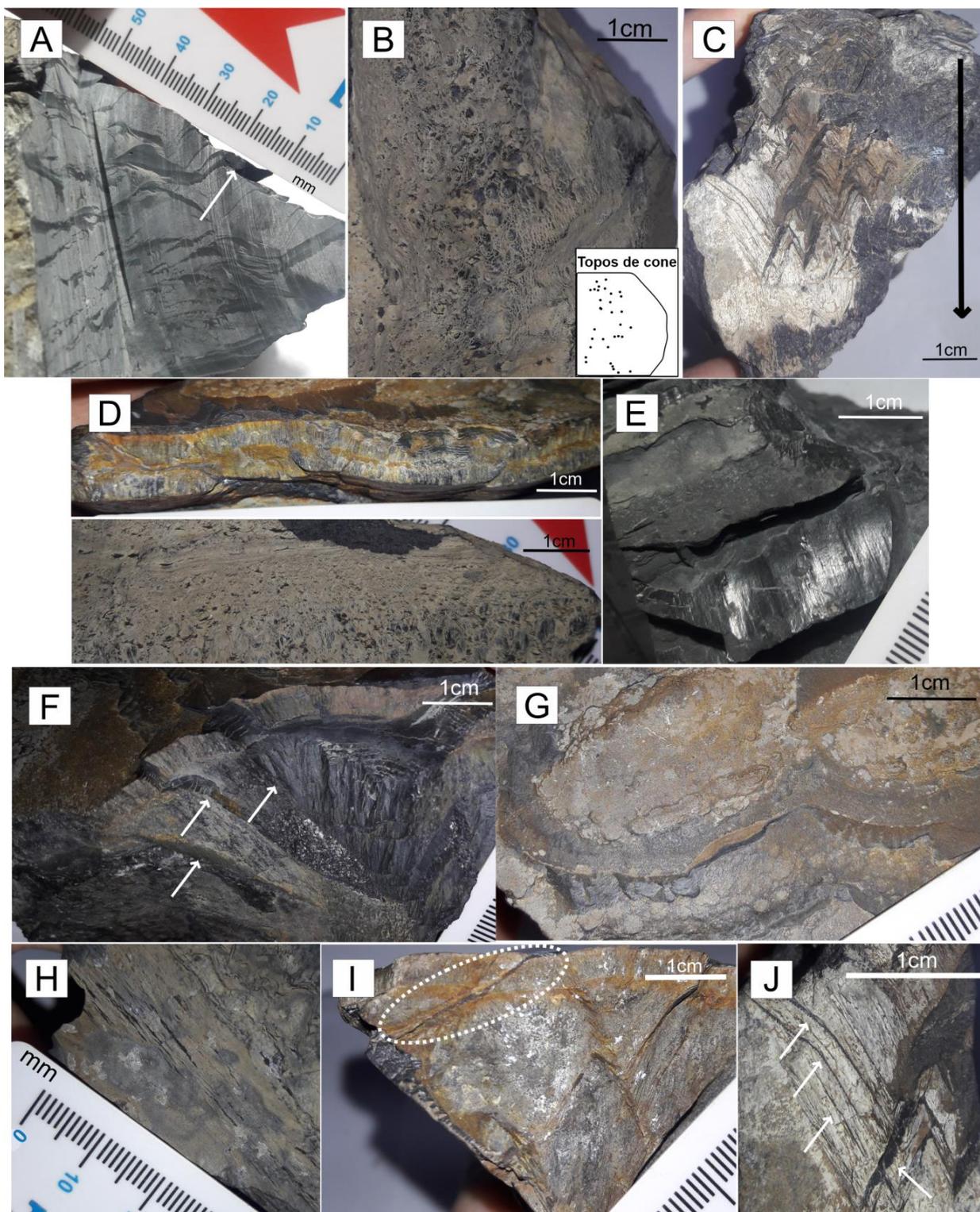


Figura 21: Fácies Caótica em amostra macroscópica. A) Amostra A4, Fácies Caótica e detalhe das camadas de argila mais espessas que nas Fácies descrita anteriormente. B) Amostra A8, topos de cone, a ilustração no canto inferior direito expõe esquematicamente onde estão os topos de cone. C) Amostra A3, estruturas CIC que aumentam em altura do topo para a base da amostra D) Amostra A9, intercalação de nível de microcones e camadas argila. E) Amostra A4, estrias na camada de argila. F) Amostra A8, área de intercalação de argila e microcones com alguns cones que perturbam as camadas de argila. G) Amostra A9, cones dentro de cones. H) Amostra A9, base dos cones em relevo. I) Amostra A8, cristais de calcita acicular nas superfícies dos cones. J) Amostra A9, camada de argila cortando as estruturas. K) Amostra A3, superfícies dentadas indicadas.

Em análise petrográfica foi verificado que os cristais de calcita possuem hábito acicular ou *spindle-shaped*. Os grãos possuem em média 1 mm de comprimento e apontam para o ápice do cone, possuindo padrão de extinção radial. Diferentes orientações cristalográficas dos cristais de calcita variam de acordo com o cone que se encontram (Figura 22A).

Grãos detríticos de quartzo anédricos, de em média 0,1 mm são comuns em meio à argila, em algumas porções os eixos maiores dos grãos estão orientados (Figura 22B) e em outras áreas os grãos estão dispostos em topos de cone (Figura 22C). Além disso, há minerais opacos anédricos a subédricos, de em média 0,02 mm, dispersos pela lâmina (Figura 22D).

Em certos locais o contato entre as camadas de argila e estruturas CIC são separados por uma pequena lâmina de carbonato de menor cristalinidade, com algumas infiltrações de argila, apresentando um aspecto turvo (Figura 22E). Os níveis de argila contornam cones ou se dispõem em camadas individualizadas (Figura 22F, G e H). A superfície dentada das argilas apresenta-se em diferentes magnitudes e por vezes conectadas entre si (Figura 22I e J).

Há estruturas que remetem a processos deformacionais, como: injeção de argila, dobras e falhas (Figura 22K, L e M). Foi verificado que algumas camadas de argila interrompem a formação de cones completos (Figura 22M).

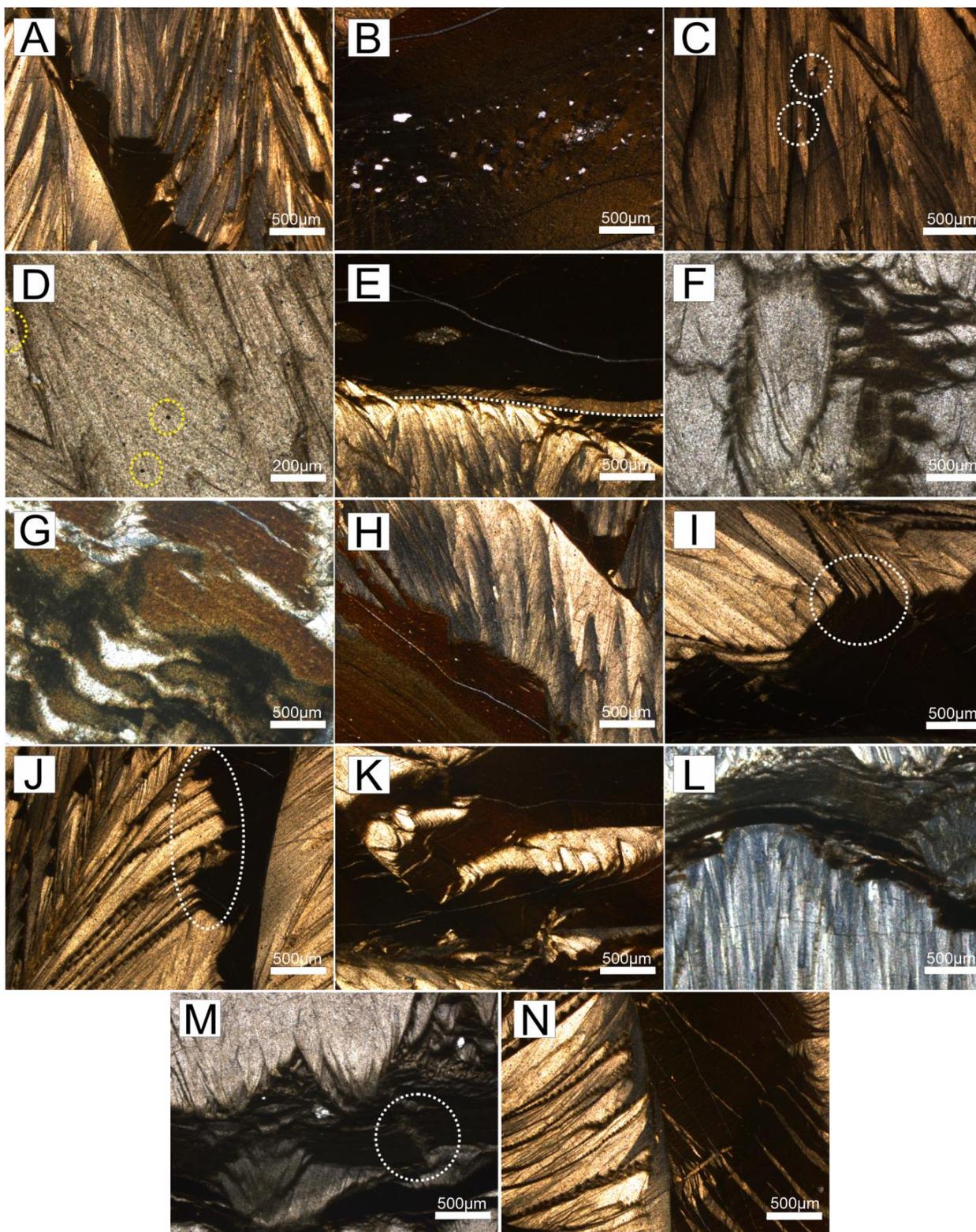


Figura 22: Fotomicrografias da Fácies Caótica. A) Lâmina A4, diferentes direções cristalográficas dos cristais de calcita a depender do cone que estão imersas. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x. B) Lâmina A4, grãos de quartzo com eixos maiores orientados. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x. C) Lâmina A4, grãos de quartzo no topo de cones. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x. D) Lâmina A4, minerais opacos em meio aos cones. Polarizadores paralelos e objetiva de 10x. E) Lâmina A4, contato entre cones e nível de argila, separados por lâmina carbonática turva. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x. F) e G) Lâmina A3, H) Lâmina A4, níveis de argila que contornam cones ou se dispõem em camadas individualizadas. Notar no canto inferior da figura H a

variação de cores dentro do nível argiloso. Figura F e H em polarizadores paralelos e Figura G em polarizadores cruzados, objetivas de 5x. I) e J) Lâmina A4, camadas de argila mais espessas fomentando camadas menos espessas. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x. K) Lâmina A4, L) e M) Lâmina A3, material argiloso dobrado e falhado. A Figura K e M estão em polarizadores paralelos e a Figura L em polarizadores cruzados, objetivas de 5x. N) Lâmina A4, camadas de argila que interrompem a formação de cones completos. Polarizadores paralelos e objetiva de 5x.

7 DISCUSSÕES

As informações obtidas a partir da análise estrutural e morfológica por meio das descrições macroscópicas, microscópicas e de microescala em MEV e Micro CT permitem uma primeira abordagem quanto a mecanismos de formação das estruturas *cone in cone*. Na sequência será discutido a influência microbiana na geração dos arranjos com base nos resultados em MEV e da química semi-quantitativa.

No Grupo 1 (composto por rochas apresentando 3 Fácies: Encaixante, Laminada e Cone) há um padrão de decréscimo de argila e aumento de carbonato em direção ao topo das camadas. Em algumas amostras o contato entre a Fácies Laminada e a Fácies Encaixante é gradacional. Além disso, após o hiato, os cristais de calcita possuem maior cristalinidade e apresentam-se, em geral, euédricos. As características citadas podem indicar aumento da fonte de carbonato e diminuição de proveniência de argila em direção ao topo da camada. O Grupo 2 (composto por rochas apresentando a Fácies Caótica) possui uma tendência contrária ao Grupo 1, as camadas de argila aumentam ao passo que as alturas dos cones diminuem em direção ao topo.

As camadas de argila contêm grãos detríticos de quartzo que se aloca em topos de cone ou em meio às películas de argila, orientados pelo eixo maior. Tal disposição também ocorre com os minerais opacos. Há conexão entre as lâminas de argila que se fracionam em lâminas menores, presença de níveis de carbonatos mais turvos ou a mistura de níveis de argila com fragmentos de calcita, lâminas de argila dobrada e acúmulo de material argiloso no topo de cones. Para tais feições ocorrerem é necessário que o corpo argiloso esteja plástico no momento da cristalização ou faturamento das estruturas *cone in cone*. Woodland (1964), Franks (1969), Selles-Martinez (1994) e Tribovillard *et al.* (2018), sustentam que no momento da cristalização da calcita o sedimento estava plástico.

As superfícies dentadas e estrias relacionadas às argilas podem ser explicadas pelos sistemas de fraturas defendidos por Gilman & Metzger (1967). Neste, as fraturas maiores controlam o contato definido entre os níveis de argila e os cones e as fraturas menores formam a superfície dentada. As estrias observadas são relativas à movimentação da argila em tais fraturas (Figura 23).

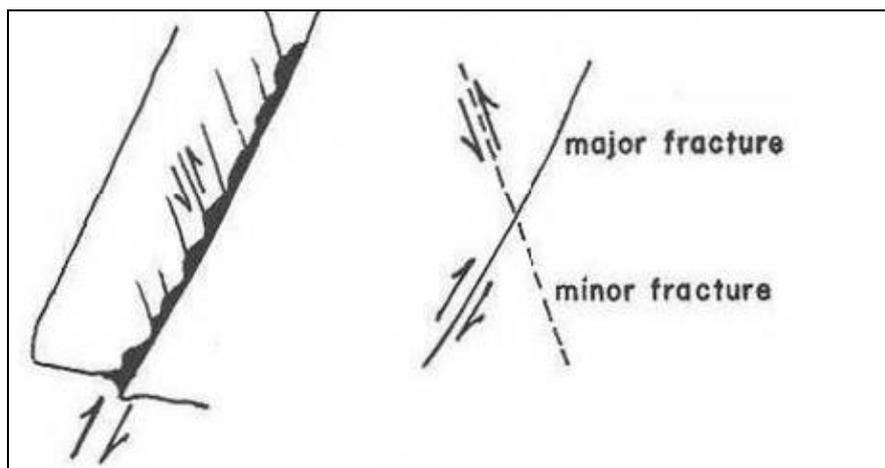


Figura 23: Sistemas de fraturas menores (*minor*) e maiores (*major*).Fonte: Gilman e Metzger (1967).

A variação do formato dos ápices do cone, de cúspide a arredondados, pode estar ligada a plasticidade do sedimento que os cercava enquanto cresciam. Em meio a materiais menos plásticos os ápices seriam menos desenvolvidos, como atesta Franks (1969). A presença de estruturas descritas como dobras e falhas nos níveis argilosos se encaixa nesta hipótese, pois a presença de estruturas mais ou menos competentes está diretamente ligada à plasticidade do material. No entanto, para Woodland (1964), as diferenças de variação das formas cônicas estão relacionadas à sobrecarga da compactação.

A presença de *telescoped cones* positivos (em relevo) ou negativos (em depressão) é devido à circulação de fluidos ao redor das superfícies cônicas que produzem um gradiente de pressão forte o bastante para formar estas feições positivas ou negativas, como defendido por Selles-Martinez (1994).

Tribovillard *et al.* (2018) descreveram pirritas framboidais de 25 μm -125 μm de diâmetro. Por meio da análise de isótopos de enxofre (S) se obteve uma faixa de fracionamento isotópico que corresponde a valores atribuídos a sulfato redução mediada por bactérias pelo consumo de matéria orgânica, que ocorre próximo ou na interface água-sedimento em ambiente anóxico.

Os diâmetros das pirritas framboidais descritas para este intervalo estudado possuem diâmetros de 5 μm – 10 μm , que segundo a classificação de Bond & Wignall (2010) encontram-se em ambientes variando de anóxicos à águas fracamente oxigenadas coincidindo com as proximidades da interface água-sedimento. Estes diâmetros são semelhantes aos reportados por Meinhold *et al.* (2019), que atribuíram a presença de tais minerais a diagênese inicial.

Feições orgânicas de EPS, “*mucus-like*”, estudadas por Perri & Spadafora (2011) em estromatólitos possuem semelhanças com as estruturas de alto teor de carbono vistas em MEV neste trabalho. Na Figura 24 há um paralelo com as feições descritas pelos autores com aquelas observadas neste trabalho.

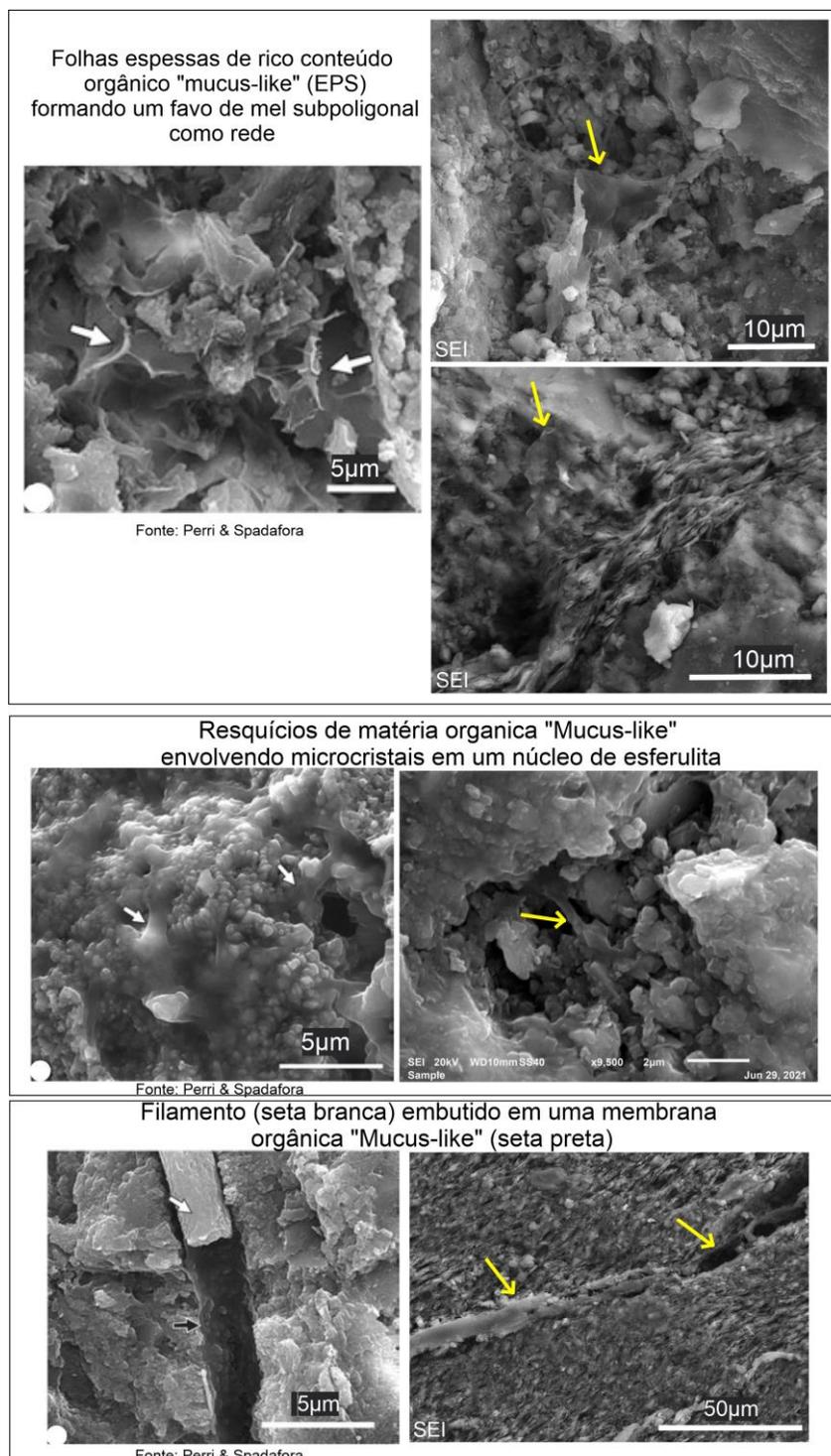


Figura 24: Comparação entre as feições descritas por Perri & Spadafora (2011) com aquelas observadas neste trabalho. As figuras da esquerda pertencem aos autores citados enquanto as figuras da direita são deste trabalho. As setas amarelas indicam as feições semelhantes.

Há muitas semelhanças entre os EPS “*mucus-like*” retratados por Perri & Spadafora (2011) e as estruturas carbonosas descritas neste trabalho. Entretanto o formato dos cristais de calcita são distintos entre si. Enquanto Perri & Spadafora (2011) descrevem cristais (esferoides, por exemplo) que podem ser diretamente ligados à ação microbiana, este estudo não apresenta evidências diretas desse caráter.

No entanto a influência microbiana, relacionada aos prováveis EPS, na geração dos CIC não pode ser descartada. Como atesta Dupraz *et al.* (2009), a degradação do EPS por meio do metabolismo de bactérias sulfato-redutoras pode aumentar a alcalinidade do sistema em um cenário biologicamente induzido (precipitação ativa). Em um cenário biologicamente influenciado, as bactérias sulfato-redutoras oxidam o carbono orgânico do meio produzindo HCO_3^- que aumenta a alcalinidade. Ressurgências, difusão ou renovação sazonal da coluna de água pode resultar em supersaturação que promove a formação de carbonato de cálcio (Dupraz *et al.*, 2009)

Meinhold *et al.* (2019) comentam brevemente que comunidades microbianas podem estar relacionadas a precipitação de calcita, sustentado pela ocorrência de EPS e do padrão fibro-radial (esferulitas) dos carbonatos.

O Folhelho Lontras possui alta quantidade de matéria orgânica (Mouro *et al.*, 2017) e é considerado uma rocha potencialmente geradora (Vesely *et al.*, 2021). Entretanto, não foram encontradas inclusões líquidas ou sólidas de hidrocarbonetos em meio ou entre os cristais de calcita como descrito no trabalho de Cobbold *et al.* (2013) e Zanella *et al.* (2015a,b).

Neste trabalho é sugerida ação de bactérias sulfato-redutoras, Tribovillard *et al.* (2018) defendem que o carbono orgânico degradado pelas bactérias sulfato-redutoras é proveniente de fluidos liberados por movimentos sinsedimentares. Entretanto a degradação do EPS por meio das bactérias, exemplificado por Dupraz *et al.* (2009), também é possível.

As evidências encontradas neste trabalho corroboram com a hipótese de Tribovillard *et al.* (2018). Para os autores o carbonato começa a cristalizar pela ação de bactérias sulfato-redutoras, alimentadas por fluidos contendo carbono orgânico dissolvido, que refletiram em aumento de alcalinidade no meio. A circulação de tais fluidos causou o aumento da pressão de fluido que culminou na formação das estruturas CIC.

Após a formação das estruturas CIC, a compactação reduziu intensamente a porosidade dos sedimentos e possivelmente gerou dissolução parcial em alguns pontos, como visto em provável micro-estilólito. Posteriormente, houve o preenchimento de fraturas com o material de alta atenuação de raios X, observado em imagens do Micro CT, encontradas entre o contato camada de argila-cones.

8 CONCLUSÃO

A formação das estruturas *cone in cone* se deu na interface água-sedimento na diagênese precoce, como consequência da atividade de bactérias sulfato-redutoras, evidenciada pela presença de pirita framboidal em meio a carbonatos e níveis argilosos. A circulação de líquidos aumentou a pressão de fluido que culminou na formação dessas estruturas.

As camadas de argila, presente em meio às estruturas, estavam plásticas e saturadas em água no momento da composição dos arranjos. A variação dos formatos dos cones e a presença de dobras e falhas nas películas argilosas são controladas pela competência do material no momento da cristalização da calcita. A morfologia (superfície dentada) dos níveis argilosos que contornam as estruturas cônicas se deu por meio de fraturas.

Há aumento na concentração de carbonato e diminuição da argila em direção ao topo do Grupo 1 (composto por rochas apresentando 3 Fácies: Encaixante, Laminada e Cone). A tendência contrária ocorre no Grupo 2 (composto por rochas apresentando a Fácies Caótica). Questões como a origem e disponibilidade do carbonato formador não são respondidas a partir dos dados obtidos neste trabalho. Sendo assim são aconselhadas análises isotópicas de carbono e oxigênio em estudos futuros.

A presença de EPS é sugerida, mas não provada. Para a comprovação da presença e função de tal substância no processo de cristalização do carbonato formador das estruturas CIC recomenda-se a verificação de marcadores orgânicos ou inorgânicos.

Sugerem-se, ainda, análises isotópicas de enxofre para confirmar a presença de bactérias sulfato-redutoras que influenciaram a alcalinidade do meio e precipitaram piritas framboidais.

REFERÊNCIAS

- Bond, D.P.G., Wignall, P.B. Pyrite framboid study of marine Permian–Triassic boundary sections: a complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction. *Geological Society of America Bulletin*, v. 122, n. 7-8, p. 1265-1279, 2010.
- Carstens, H. Early diagenetic cone-in-cone structures in pyrite concretions. *Journal of Sedimentary Research*, v. 55, n. 1, p. 105-108, 1985.
- Castro, J. C. Estratigrafia de Sequências das Formações Campo Mourão (parte superior) e Taciba, Grupo Itararé, leste da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 29, n. 2, p. 255-260, 1999.
- Cobbold, P. R., Zanella, A., Rodrigues, N., & Løseth, H. Bedding-parallel fibrous veins (beef and cone-in-cone): Worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization. *Marine and Petroleum Geology*, 43, 1-20. 2013.
- Dedavid, B. A., Gomes, C. I., Machado, G. *Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparação de Amostras - Materiais Poliméricos, Metálicos e Semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2007.
- Dupraz, C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho, A. W., Norman, R. S., & Visscher, P. T. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 96(3), 141-162. 2009.
- França, A. B. & Potter, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2-4, pp. 147-191. 1988.
- Franks, P. C. Nature, origin, and significance of cone-in-cone structures in the Kiowa Formation (Early Cretaceous), north-central Kansas. *Journal of sedimentary research*, v. 39, n. 4, p. 1438-1454, 1969.
- Gilman, R.A., Metzger, W.J. Cone-in-cone concretions from western New York. *Journal of Sedimentary Research*, v. 37, n. 1, p. 87-95, 1967.
- Israelson, C., Halliday, A.N., Buchardt, B. U–Pb dating of calcite concretions from Cambrian black shales and the Phanerozoic time scale. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 141, n. 1-4, p. 153-159, 1996.
- Kolokol'tsev, V. G. The cone-in-cone structure and its origin. *Lithology and Mineral Resources*, v. 37, n. 6, p. 523-535, 2002.
- Machado, F.B., Nardy, A.J.R. *Mineralogia óptica*. Oficina de Textos, 2017.

Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M., & Jacobs, P. Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. *Geological Society, London, Special Publications*, 215(1), 1-6. 2003.

Meinhold, G., Jensen, S., Høyberget, M., Arslan, A., Ebbestad, J. O. R., Högström, A. E & Taylor, W. L. First record of carbonates with spherulites and cone-in-cone structures from the Precambrian of Arctic Norway, and their palaeoenvironmental significance. *Precambrian Research*, 328, 99-110.2019.

Milani, E. J. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. Porto Alegre (Tese de Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2 v., 255p. 1997.

Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., França, A.B. Bacia do Paraná. In: Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G. V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M.; Pessoa Neto, O. C. (Eds.). *Bacias sedimentares brasileiras - cartas estratigráficas. Boletim de Geociências da PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2. pp. 265-287. 2007.

Milani, E. J. & Ramos, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4), 473-484. 1998.

Mouro, L. D., Rakociński, M., Marynowski, L., Pisarzowska, A., Musabelliu, S., Zatoń, M. & Waichel, B. L. Benthic anoxia, intermittent photic zone euxinia and elevated productivity during deposition of the Lower Permian, post-glacial fossiliferous black shales of the Paraná Basin, Brazil. *Global and planetary change*, 158, 155-172. 2017.

Mouro, L. D., Pacheco, M. L. A. F., Ricetti, J. H., Scomazzon, A. K., Horodyski, R. S., Fernandes, A. C. & Scherer, C. M. Lontras Shale (Paraná Basin, Brazil): Insightful analysis and commentaries on paleoenvironment and fossil preservation into a deglaciation pulse of the Late Paleozoic Ice Age. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 555, 109850. 2020.

Perri, E., Spadafora, A. *Evidence of microbial biomineralization in modern and ancient stromatolites*. *Stromatolites: interaction of microbes with sediments*. Springer, Dordrecht, p. 631-649. 2011.

Schneider, R. L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R. A., Daemon, R. F., Nogueira, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 28, Porto Alegre, 1974. Anais, Porto Alegre: SBG. v. 1, pp. 41-65. 1974.

Selles-martinez, J. New insights in the origin of cone-in-cone structures. *Carbonates and evaporites*, v. 9, n. 2, p. 172-186, 1994.

Tarr, W.A. Cone-in-cone: *American Journal of Science*, v. 4, 199-213, 1922.

Tribovillard, N., Petit, A., Quijada, M., Riboulleau, A., Sansjofre, P., Thomazo, C., & Averbuch, O. A genetic link between syndimentary tectonics-expelled fluids, microbial sulfate reduction and cone-in-cone structures. *Marine and Petroleum Geology*, 93, 437-450. 2018.

Tucker, M. E. *Sedimentary rocks in the field (The geological field guide series)*. 3rd ed. Copyright, 250p, 2003.

Vesely, F. F., & Assine, M. L. Seqüências e tratos de sistemas deposicionais do Grupo Itararé, norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(2), 219-230. 2004.

Vesely, F. F., Kraft, R. P., Mattos, T. R., Schemiko, D. C., Berton, F., Monteiro, L. B., & Yamassaki, H. S. Os primeiros turbiditos do Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*. 2021.

Woodland, B.G. The nature and origin of cone-in-cone structure. *Fieldiana: Geology*, v. 13, p. 1-305, 1964.

Zalán, P. V., Wolff, S., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Cerqueira, J. R., Appi, V. T., Santos Neto, E. V., Marques, A.; Conceição, J. C. J. The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton, M. W., Kolata, D.R., Oltz, D. F., Eidel, J. J. Interior cratonic basins. *AAPG Memoir* 51, cap. 33. pp. 681-709. 1990.

Zanella, A., Cobbold, P.R., Boassen, T. Natural hydraulic fractures in the Wessex Basin, SW England: widespread distribution, composition and history. *Mar. Petrol. Geol.* 68, 438–448. 2015b.

Zanella, A., Cobbold, P.R., Ruffet, G., Leanza, H. Geological evidence for fluid overpressure, hydraulic fracturing and strong heating during maturation and migration of hydrocarbons in Mesozoic rocks of the northern Neuquén Basin, Mendoza Province, Argentina. *J. S. Am. Earth Sci.* 62, 229–242. 2015a.