



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

*Diagênese e hidrotermalismo em rochas
carbonáticas proterozóicas:
Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São
Francisco*

Sandra Nélis Tonietto

Dissertação de Mestrado N° 267

Brasília – DF

2010



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

*Diagênese e hidrotermalismo em rochas
carbonáticas proterozóicas:
Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São
Francisco*

Dissertação de Mestrado

Sandra Nélis Tonietto

ORIENTADORA: **Dra. Edi Mendes Guimarães (UnB)**

EXAMINADORES: **Dr. Carlos José Souza de Alvarenga (UnB)**

Dra. Jane Nobre Lopes (CPRM)

SUPLENTE: **Dra. Lucieth Cruz Vieira (UnB)**

Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA)

Brasília – DF

Março/2010

RESUMO

As rochas carbonáticas das formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), presentes na região de Alvorada do Norte, Estado de Goiás, e da Formação Morro do Calcário (Grupo Vazante), presentes na região de Fagundes, Estado de Minas Gerais, mostram fácies deposicionais semelhantes, porém sua história diagenética difere em diversos aspectos.

O presente estudo teve como objetivo principal identificar feições petrográficas (composicionais e texturais) e alterações diagenéticas e hidrotermais. Além disso, pretendeu estabelecer relações entre as feições petrográficas com as etapas de exposição e soterramento, e a relação entre circulação de fluidos com a geração e obliteração de porosidade.

As fácies deposicionais são principalmente calcarenitos, dolarenitos e dolorruditos intraclásticos, em sua maioria sem lama carbonática, indicando ambiente deposicional de alta energia. Estas fácies, originalmente porosas, foram intensamente cimentadas, principalmente na eodiagênese. Processos de cimentação, com início ainda no ambiente deposicional e se estendendo até o soterramento raso, obliteraram grande parte do espaço poroso, impedindo a compactação mecânica dos grãos e mantendo o arranjo textural próximo ao deposicional.

Fácies originalmente porosas, como as aqui estudadas, tendem a manter alguma porosidade primária preservada até a mesodiagênese. As fácies de calcarenito, dolarenito e dolorrudito são mais propícias a migração de fluidos, os quais podem ser a própria água de formação, fluidos hidrotermais ou até mesmo hidrocarbonetos (e compostos associados como ácido carboxílico, CO₂, dentre outros).

Nas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí ocorrem níveis delgados onde pouca porosidade primária ainda é observada. Apesar da baixíssima porosidade primária existente, estas rochas mostraram-se porosas, sendo a porosidade do tipo secundária, gerada por processos de fraturamento e dissolução durante a mesodiagênese. Grande parte da porosidade é intercrystalina e vugular, ocorrendo também porosidade em planos de fraturas e em estilólitos. A porosidade secundária foi parcialmente cimentada por calcita blocosa, dolomita, dolomita-em-sela e quartzo.

Assim como nas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, porosidade secundária foi gerada nos carbonatos do Grupo Vazante durante a mesodiagênese, principalmente próximo a planos de estilólitos, os quais serviram de conduto para os fluidos corrosivos. Porém a porosidade secundária, do tipo vugular, foi intensamente cimentada por dolomita. Neste caso apenas localmente observa-se porosidade remanescente, estando esta preenchida por pirobetume.

Além dos processos de cimentação e dissolução, as rochas carbonáticas da Fm. Morro do Calcário (Grupo Vazante) foram submetidas a processo de alteração hidrotermal. Este processo resultou em modificações das rochas carbonáticas como silicificação, brechação (por fluidos hidrotermais) e cimentação por sílica, dolomita, pirita, esfalerita e galena.

A principal diferença entre as duas regiões estudadas está no contexto tectono-estrutural. Enquanto o Grupo Bambuí, na região de Alvorada do Norte, encontra-se horizontalizado, com dobramentos suaves e falhas mais tardias, o Grupo Vazante, na região de Fagundes, apresenta tectonismo ativo desde a deposição, tendo sofrido posteriormente forte dobramento, em contexto de falhas de empurrão, por vezes profundas. Por este motivo as rochas carbonáticas do Grupo Vazante sofreram diversas fases de fraturamento, havendo percolação de fluidos dolomitizantes e localmente hidrotermais.

Geração e migração de hidrocarbonetos ocorreram nas duas áreas estudadas. As rochas carbonáticas do Grupo Bambuí possuem fraturas abertas e porosidade secundária, tendo sido identificado resquícios de betume, sendo potenciais rochas reservatório para hidrocarbonetos. As rochas carbonáticas do Grupo Vazante apresentam-se muito fraturadas, porém as fraturas são fechadas ou cimentadas, com rara porosidade secundária preenchida por pirobetume. O processo de hidrotermalismo resultou em intensa cimentação da rocha, além do causar craqueamento do hidrocarboneto e a mineralização de sulfetos de Zn-Pb.

ABSTRACT

The Sete Lagoas and Lagoa do Jacaré formations (BambuÍ Group) in the Alvorada do Norte region, Goiás State, and Morro do Calcário Formation (Vazante Group) in the Fagundes region, Minas Gerais State, have similar depositional facies, but their diagenetic history differs in several aspects.

The main propose of this study is to characterize petrographic features (compositional and textural), diagenetic and hydrothermal alteration. Besides, were evaluated the relation of petrographic features with exposure and burial processes, including generation and obliteration of the porosity.

The depositional facies are mainly calcarenites, dolarenites and dolorrudites, mostly without carbonate mud, indicating high energy depositional environment. These facies, originally porous, were strongly cemented, mainly in the eodiagenesis. This cementation process, which started in the depositional environment and continued through shallow burial conditions, obliterated the pore space, avoided the mechanical compaction and maintained the grain textural arrangement.

Facies originally porous, such as calcarenite/dolarenite and calcirrudite/dolorrudite, tend to retain some primary porosity preserved until the mesodiagenesis. These facies are the preferential pathways to fluids, which can be the formation water, hydrothermal fluids or even hydrocarbons (and related compounds such as carboxylic acid, CO₂, and others).

In carbonates of the Bambuí Group was observed that a little amount of primary porosity is still present in some levels. Despite the very low primary porosity, these rocks went through fracturing and dissolution processes during mesodiagenesis, which caused generation of secondary porosity. The secondary porosity is mainly intercrystal, vuggy, open fractures and along stylolites. Part of the secondary porosity was cemented by blocky calcite, dolomite, saddle dolomite and quartz during mesodiagenesis.

Secondary porosity was also generated in carbonate rocks of Vazante Gr. during mesodiagenesis, but in this case related to stylolite surfaces, which acted as conduits to corrosive fluids. The secondary porosity, mainly vuggy, was intensely cemented by dolomite (eo/mesodiagenesis), and only locally remaining porosity is still present, but it is filled with solid bitumen.

Besides the cementation and dissolution processes, the carbonates of Morro do Calcário Formation (Vazante Group) were also subjected to hydrothermal alteration. This process caused

alterations in carbonate rocks such as silicification, brecciation (by hydrothermal fluids) and cementation by silica, dolomite, pyrite, sphalerite and galena.

The major difference between both regions is the tectonic and structural context. While the Bambuí Group in the Alvorada do Norte region, is mainly horizontal, with open folding, the Vazante Group, in the Fagundes region, presents strong folding in a context of thrust faults. For this reason, the carbonate rocks of the Vazante Gr. were intense fractured and percolation of dolomitizing and hydrothermal fluids occurred.

In these areas generation and migration of hydrocarbons had occurred. The carbonate rocks of Bambuí Group have open fractures and secondary porosity, and also present bitumen residues, being potential hydrocarbon reservoir rocks. The Vazante Group carbonates are strongly fractured, but these fractures are closed or cemented, with rare secondary porosity filled by solid bitumen. The hydrothermal process resulted on intense recrystallization and cementation of the rock, and also caused hydrocarbon cracking and Zn-Pb sulfide mineralization.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pai amoroso, que nos dá a oportunidade de crescimento neste planeta escola.

Agradeço aos meus filhos, Lucas e Luiza, por serem tão especiais.

Ao meu marido Fabiano, que sempre me apoiou e incentivou durante esta etapa de aprendizado.

À minha orientadora, professora Edí, pelos conhecimentos transmitidos e pela amizade.

Aos meus pais, Noemy e Antonio, e aos meus sogros, Carmem e Wilson, pelo apoio e dedicação aos netos.

Agradeço à minha irmã Cise, que não mediu esforços para me ajudar na confecção de mapas e figuras!

Aos amigos e colegas de trabalho, os quais contribuíram para que este trabalho fosse realizado: Marcelle Erthal, Larissa Juschaks, Flávio dos Anjos, Huri Barbosa, Cláudia Silva, Alberto Coelho, Celiane Fabrício, Alberto Paz, Rozendo de Carvalho, Geraldo Magela, Rose Mencarelli, Ailton de Souza, Leonardo Tedeschi, Guilherme dos Reis, Fábio Vasconcelos, Cristiane Barreiros, Carla Viviane Araújo, Gabriela Moura, Aline Marinheiro, Alan Xavier, Thaís Matos, André Abreu, Ana Lúcia de Araújo, Otávio Lima, Camila Wense, Mariela Martins, Fátima Brazil, Almério França, Anelize Bahniuk, Maria Eliane Oliveira, Samuel Viana, Lisie Falcão, Roberta Silva, Nilo Matsuda e Daisy Alves.

Aos geólogos Gustavo Oliveira, Fernando Baia e Samuel Lago, da Votorantim Metais, os quais nos guiaram em excursão de campo na região de Vazante-Paracatu, e com os quais tivemos boas discussões e troca de idéias.

Aos professores da Universidade de Brasília: Sylvia Maria de Araújo, Carlos José Souza de Alvarenga, Nilson Francisquini Botelho e Marcel August Dardenne.

À doutora Jane Nobre Lopes!

À Universidade de Brasília!

A Petrobrás, pelo incentivo ao desenvolvimento da pesquisa científica e pela oportunidade de crescimento profissional que me conferiu através deste mestrado.

A todos muito obrigada!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	MATERIAIS E MÉTODOS	3
2.1	TRABALHO DE CAMPO	3
2.2	PETROGRAFIA	3
2.3	CATODOLUMINESCÊNCIA	3
2.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	4
2.5	ANÁLISES ISOTÓPICAS DE CARBONO E OXIGÊNIO	5
3	ROCHAS CARBONÁTICAS	9
3.1	TEXTURA DAS ROCHAS CARBONÁTICAS	9
3.1.1	<i>Grãos carbonáticos</i>	9
3.1.2	<i>Matriz carbonática</i>	11
3.1.3	<i>Cimento carbonático</i>	12
3.1.4	<i>Porosidade</i>	12
3.1.5	<i>Bioconstruções</i>	13
3.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS CARBONÁTICAS	14
3.3	PLATAFORMAS CARBONÁTICAS	15
3.4	ALTERAÇÕES PÓS-DEPOSICIONAIS – DIAGÊNESE E HIDROTHERMALISMO	16
3.4.1	<i>Processos de alteração</i>	17
3.4.1.1	Micritização	17
3.4.1.2	Cimentação	17
3.4.1.3	Compactação	19
3.4.1.4	Neomorfismo	21
3.4.1.5	Dissolução	21
3.4.1.6	Silicificação	21
3.4.1.7	Dolomitização	22
3.4.1.8	Dolomita-em-sela e dolomita barroca	24
3.4.2	<i>Diagênese em ambiente marinho-raso</i>	25
3.4.3	<i>Diagênese em ambiente meteórico</i>	26
3.4.4	<i>Diagênese em ambiente de subsuperfície</i>	28
4	BACIA DO SÃO FRANCISCO	30
4.1	GRUPO BAMBUÍ	31

5	CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA DAS ROCHAS CARBONÁTICAS AMOSTRADAS NO POÇO 1-RC-1-GO DAS FORMAÇÕES SETE LAGOAS E LAGOA DO JACARÉ (GRUPO BAMBUÍ), REGIÃO DE ALVORADA DO NORTE, GOIÁS	33
5.1	EMPILHAMENTO ESTRATIGRÁFICO NO POÇO 1-RC-1-GO	36
5.2	FORMAÇÃO SETE LAGOAS	42
5.2.1	<i>Fácies de dolorrudito intraclástico</i>	42
5.2.2	<i>Fácies de dolarenito peloidal intraclástico</i>	45
5.2.3	<i>Empilhamento de fácies e condições deposicionais – Formação Sete Lagoas</i>	48
5.2.4	<i>Eventos diagenéticos na Formação Sete Lagoas</i>	50
5.3	FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ	68
5.3.1	<i>Fácies de calcirrudito intraclástico</i>	68
5.3.2	<i>Fácies de calcarenito intraclástico peloidal</i>	71
5.3.3	<i>Fácies de calcilutito</i>	74
5.3.4	<i>Empilhamento de fácies e condições deposicionais – Formação Lagoa do Jacaré</i>	77
5.3.5	<i>Eventos diagenéticos na Formação Lagoa do Jacaré</i>	81
5.4	DADOS ISOTÓPICOS DAS FORMAÇÕES LAGOA DO JACARÉ E SETE LAGOAS	95
6	CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA DAS ROCHAS CARBONÁTICAS AMOSTRADAS NO FURO PFF-57 DA FORMAÇÃO MORRO DO CALCÁRIO (GRUPO VAZANTE), NA REGIÃO DE FAGUNDES, MINAS GERAIS	99
6.1	GRUPO VAZANTE	99
6.1.1	<i>Mineralizações na região de Vazante-Paracatu</i>	103
6.2	FORMAÇÃO MORRO DO CALCÁRIO	104
6.2.1	<i>Fácies de dololutito</i>	106
6.2.2	<i>Fácies de dolarenito intraclástico</i>	109
6.2.3	<i>Fácies de dolorrudito intraclástico (brecha carbonática)</i>	112
6.2.4	<i>Fácies de brecha dolomítica de falha</i>	117
6.2.5	<i>Empilhamento de fácies e condições deposicionais – Formação Morro do Calcário</i>	120
6.2.6	<i>Eventos diagenéticos na Formação Morro do Calcário</i>	123
6.2.7	<i>Análises Isotópicas – Formação Morro do Calcário</i>	153
7	DIAGÊNESE E HIDROTERMALISMO EM ROCHAS CARBONÁTICAS – ESTUDO DE CASO: CARBONATOS DOS GRUPOS BAMBUÍ E VAZANTE	154
8	CONCLUSÕES	159
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161

LISTA DE FIGURAS

- Figura nº1 Perfil litológico dos três testemunhos do poço 1-RC-1-GO, com a indicação dos locais onde foram coletadas amostras para análises de DRX, Isótopos e lâminas delgadas. _____ 7
- Figura nº2 Perfil litológico do testemunho do furo PFF-57 com a indicação dos locais onde foram coletadas amostras para análises de DRX, Isótopos e lâminas delgadas. OBS: Legenda da coluna litológica está na página 122. _____ 8
- Figura nº3 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de porosidade do tipo fábrica-seletiva (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). _____ 12
- Figura nº4 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de porosidade do tipo fábrica-seletiva ou não fábrica-seletiva (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). _____ 13
- Figura nº5 A – calcita do tipo drusa ou mosaico. B – detalhe do limite plano entre os cristais e taxas de crescimento similares no cimento calcítico do tipo drusa ou mosaico (Tucker & Wright 1990). _____ 18
- Figura nº6 Hábito de crescimento dos cristais de calcita em função da razão Mg/Ca (Folk 1974). _____ 18
- Figura nº7 Desenho esquemático mostrando a relação entre a razão Mg/Ca no fluido, a razão de suprimento de íons de carbonato, a morfologia dos cristais (equante e acicular) e a mineralogia dos precipitados inorgânicos (calcita baixo-Mg, calcita alto-Mg e aragonita). 1) cimento de calcita equante em águas profundas e frias, sedimentos de baixa latitude e sedimentos de águas rasas em condições climáticas temperadas. 2) cimento de calcita alto-Mg em recifes - raro. 3) cimento acicular de calcita alto-Mg em recifes e areias carbonáticas. 4) Cimento aragonítico acicular em recifes e areias carbonáticas. 5) cimento equante de calcita baixo-Mg em ambiente meteórico. 6) calcita baixo-Mg acicular em espeleotemas e travertinos. 7) Aragonita acicular em espeleotemas – raro. (Tucker 2001). _____ 19
- Figura nº8 Tipos e características de feições de dissolução por pressão formadas em subsuperfície (modificado de Koeprick 1984). _____ 20
- Figura nº9 Modelos de dolomitização ilustrando a variedade de mecanismos de movimentação de fluidos dolomitizantes através dos sedimentos (definidos por diferentes autores e compilados por Tucker & Wright 1990). 23
- Figura nº10 Desenho esquemático mostrando a classificação dos cristais de dolomita quanto a sua forma (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). _____ 24
- Figura nº11 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de cimentação marinha (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). _____ 26
- Figura nº12 Zonas de água subterrânea. O fluxo pode ocorrer através dos poros (fluxo difuso) ou fraturas (fluxo por condutos). Dissolução pode ocorrer na zona de mistura, na zona freática de capilaridade e especialmente na porção inferior da zona freática. Escalas são altamente variáveis (Tucker & Wright 1990). _____ 27
- Figura nº13 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de cimentação meteórica (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). _____ 28

Figura nº14 Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco, mostrando a localização geográfica e delimitação da bacia (modificado de Alkmim & Martins-Neto 2001).	30
Figura nº15 Mapa geológico das regiões de Alvorada do Norte (quadrante nordeste) e Bezerra-Cabeceiras (quadrante sudoeste). Em tons de azul estão as rochas do Grupo Bambuí. Carta geológica do Brasil ao milionésimo, CPRM.	33
Figura nº16 Coluna litoestratigráfica simplificada da região de Bezerra-Cabeceiras, GO (Guimarães, 1993).	34
Figura nº17 Mapa geológico regional com a localização da cidade de Alvorada do Norte, do poço 1-RC-1-GO, além da falha de São Domingos e do Lineamento de Alvorada do Norte (carta geológica do Brasil ao milionésimo, folha SD-23, aonde o lineamento de Alvorada do Norte foi acrescentado, tendo como base dados retirados de Della Piazza et. al. 1987.). O perfil A-B está ilustrado na figura 20.	35
Figura nº18 Imagem dos perfis de raios gama (GR) com o preenchimento da litologia (carbonatos em tons de azul e pelitos em tons de verde), fator fotoelétrico (PE), densidade e neutrão (Den-Nt), sônico e resistividade do poço 1-RC-1-GO, com a localização dos testemunhos (testos 1 a 4 no Grupo Bambuí e textos 5 e 7 no Grupo Paranoá). É ressaltado na figura os contatos entre as formações do Gr. Bambuí (tracejados em azul) e dois possíveis contatos entre o Grupo Paranoá e o Grupo Bambuí (tracejados em vermelho). Imagem extraída do SIGEO, PETROBRAS.	37
Figura nº19 Perfis de raio-gama (GR), densidade (RHOB) e dados isotópicos de carbono e oxigênio realizados em amostras de calha. Intervalo de 700 a 1200 metros, poço 1-RC-1-GO. A mudança gradual de valores isotópicos que se observa abaixo do contato entre os dois pacotes carbonáticos podem estar relacionados à contaminação (mistura) das amostras de calha, aonde amostras do intervalo superior pode ter se misturado no início do intervalo inferior. A grande variação nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ para o dolomito do topo da Fm. Sete Lagoas está possivelmente relacionado a evento de exposição.	39
Figura nº20 Perfil composto do intervalo de 650 a 1210 metros do poço 1-RC-1-GO, com os perfis de Dipmeter, Raio Gama, Caliper, Resistividade, Densidade e Neutrão. Notar que no intervalo II o perfil de caliper mostra arrombamento na parede do poço, o que indica presença de fraturas e cavidades, confirmado pelo perfil de densidade. O perfil de Dip Meter mostra feição de fratura (circulado em vermelho) no contato entre os intervalos I e II. Imagem extraída do SIGEO, PETROBRAS.	40
Figura nº21 Seção geológica esquemática com a localização do poço 1-RC-1-GO (modificado de Melo <i>et. al.</i> 1991) e o perfil de raio-gama (ver localização da seção em mapa na Figura 17). A linha tracejada preta marca contato inferido entre os Grupos Paranoá e Bambuí, sugerido no presente trabalho. No contato entre os intervalos I e II ocorre plano de falha, o qual não está representado na figura. A linha tracejada amarela marca a base de todo o pacote carbonático.	41
Figura nº22 DOLORRUDITO INTRACLÁSTICO	43
Figura nº23 Detalhe do dolorrudito intraclástico. Notar que o intenso processo de recristalização não permite reconhecimento dos grãos intraclásticos em lâmina delgada. Seta indicando porosidade secundária. Fotomicrografia, polarizadores paralelos (P//). Profundidade: 714,93m.	44

Figura nº24 Seta indicando porção da rocha aonde a dolomita apresenta cristalinidade mais grossa, possivelmente correspondendo a intraclasto dolomitizado. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m. _____	44
Figura nº25 Seta indicando porosidade secundária cimentada por dolomita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 716,68m. _____	44
Figura nº26 Detalhe do dolorrudito intensamente recristalizado. Seta indicando pirita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 716,68m. _____	44
Figura nº27 Detalhe do dolorrudito. Setas indicando porções da rocha aonde a os cristais de dolomita são mais grossos, correspondendo a cimentação. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 714,93m. _____	44
Figura nº28 Detalhe das fraturas com porosidade secundária associada (em azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m. _____	44
Figura nº29 DOLARENITO PELOIDAL INTRACLÁSTICO _____	46
Figura nº30 Detalhe do dolarenito muito grosso. Seta indicando intraclasto carbonático. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m. _____	47
Figura nº31 Dolarenito peloidal laminado. Seta indicando níveis com oolitos e intraclastos carbonáticos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,73m. _____	47
Figura nº32 Seta amarela indicando nível intraclástico com cimento dolomítico entre os grãos e seta vermelha indicando nível peloidal com matriz carbonática entre os grãos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. ____	47
Figura nº33 Seta indicando contato erosivo entre dolarenito intraclástico (com porosidade) e dolarenito peloidal. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. _____	47
Figura nº34 Seta vermelha indicando cristais de dolomita possivelmente formadas pela substituição de cimento anterior (calcítico ou aragonítico) e seta rosa indicando cimento dolomítico mais tardio. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. _____	47
Figura nº35 Detalhe do dolarenito intraclástico intensamente cimentado, com porosidade secundária gerada por processo de dissolução próximo à fratura (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. _____	47
Figura nº36 Calcirrudito com fragmentos de estromatólitos. Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau. ____	48
Figura nº37 Detalhe do calcirrudito com fragmentos de estromatólitos (setas). Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau. _____	48
Figura nº38 Detalhe de fragmento de estromatolito colunar (seta). Notar que este encontra-se na posição horizontal, paralelo ao acamamento. Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau. _____	48
Figura nº39 Detalhe de estromatolitos colunares orientados, possivelmente estando em sua posição deposicional original (seta). Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau. _____	48
Figura nº40 EMPILHAMENTO DE FÁCIES - TESTEMUNHO 4 _____	49

Figura nº41 Seta indicando franja de cimento dolomítico. Notar contatos pontuais e flutuantes entre os grãos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. _____	50
Figura nº42 Seta indicando franja isópaca de cimento dolomítico ao redor do grão. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. _____	50
Figura nº43 Detalhe de possível espeleotema (delimitado pela linha tacejada). Seta indicando dolarenito preenchendo cavidade ao redor. Profundidade: 710,60m. _____	51
Figura nº44 Detalhe de possível espeleotema (seta vermelha). Seta amarela indicando cavidade preenchida por sedimento fino, levemente laminado. _____	51
Figura nº45 Figura ilustrando processo de carstificação, com geração de cavidades e porosidade fenestral aumentando de intensidade da base para o topo do testemunho 4, culminando com uma superfície de exposição com processo de oxidação no topo do testemunho. _____	52
Figura nº46 Fotomicrografia mostrando que apesar da intensa dolomitização da rocha, esta não mascarou a textura original da rocha, sendo possível diferenciar grão (seta vermelha) de cimento (seta azul). Seta amarela indicando porosidade secundária cimentada por calcita (em vermelho) e dolomita (cristal romboédrico). Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade:711,61m. _____	53
Figura nº47 Detalhe da fácies de dolorrudito com matriz dolarenítica. Notar que a dolomitização não mascarou a textura original da rocha, sendo possível diferenciar grãos (setas vermelhas) de cimento (seta azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade:711,22m. _____	53
Figura nº48 A – Detalhe do dolarenito. Seta vermelha indicando grão carbonático e seta azul indicando cimento dolomítico. Rocha intensamente recristalizada. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência do dolarenito. Mesma visada da foto A. Pode-se observar que a franja de cimento ao redor dos grãos (seta amarela) apresenta baixa luminescência, e tanto os grãos quanto o cimento de dolomita que oblitera os poros apresentam luminescência semelhante, mais intensa do que a franja de cimento. Profundidade:710,87m. _____	54
Figura nº49 A – Seta amarela indicando cristais finos de dolomita, os quais correspondem ao sedimento fino que encontra-se preenchendo cavidades. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando cristais finos de dolomita, os quais apresentam formas romboédricas e encontram-se zonados. Seta azul indicando dolomita correspondente à matriz da rocha, apresentando luminescência muito baixa. Profundidade:713,30m. _____	54
Figura nº50 A – Seta amarela indicando cristais de dolomita crescendo na borda da cavidade preenchida por sedimento fino dolomitizado (seta azul). Fotomicrografia, P//. B -Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando cristal de dolomita zonado presente na borda da cavidade preenchida por sedimento fino (seta azul). Profundidade:712,33m. _____	55

Figura nº51 A – Detalhe do sedimento carbonático fino de preenchimento de cavidade dolomitizado. Fotomicrografia, P//. B -Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Detalhe dos cristais romboédricos de dolomita zonados (setas). Profundidade:712,33m. _____	55
Figura nº52 A – Seta amarela indicando cristais de dolomita crescendo na borda da cavidade preenchida por sedimento fino dolomitizado (seta azul). Fotomicrografia, P//. B -Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando cristal de dolomita zonado presente na borda da cavidade preenchida por sedimento fino (seta azul). Profundidade:713,12m. _____	55
Figura nº53 Foto de detalhe mostrando estilolitos subhorizontais. Profundidade: 713,08m. _____	56
Figura nº54 Foto de detalhe mostrando estilolitos subhorizontais no contato entre cavidades preenchidas por sedimento fino e a matriz da rocha. Profundidade: 713,48m. _____	56
Figura nº55 Foto de detalhe mostrando estilolitos vertical. Profundidade: 713,48m. _____	56
Figura nº56 Seta indicando estilolito no contato entre dolarenito muito grosso e dolarenito fino laminado. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m. _____	56
Figura nº57 Setas indicando estilolitos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,39m. _____	56
Figura nº58 Setas indicando porosidade secundária cimentada por calcita blocosa. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m. _____	57
Figura nº59 Seta vermelha indicando porosidade secundária próxima a estilolito, cimentada por calcita blocosa. Seta amarela indicando microfratura cimentada por calcita. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m. _____	57
Figura nº60 Foto de detalhe mostrando fratura aberta (seta vermelha) com porosidade vugular associada (seta amarela). Notar que a dissolução ocorreu de forma mais intensa ao longo do plano da fratura e nas suas proximidades. Profundidade: 714,33m. _____	58
Figura nº61 Foto de detalhe mostrando porosidade secundária dos tipos vugular (Fotos A e B), intercrystalina (Foto B) e porosidade em fraturas (setas). Profundidade: 715,33m. _____	58
Figura nº62 Seta amarela indicando estilolito. Seta vermelha indicando porosidade secundária em plano de estilolito e próximo a ele. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 714,93m. _____	59
Figura nº63 Detalhe das fraturas com porosidade secundária associada (em azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m. _____	59
Figura nº64 Contato entre dolarenito intraclástico com porosidade (seta vermelha) e dolarenito peloidal (seta amarela). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. _____	59

Figura nº65 Detalhe das fraturas abertas em nível de dolarenito intraclástico intensamente dissolvido. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m. _____	59
Figura nº66 Detalhe da porosidade secundária, gerada por processo de dissolução (em azul). Seta indicando fratura aberta. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,22m. _____	59
Figura nº67 Detalhe dos cristais de dolomita com as bordas dissolvidas. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,22m. _____	59
Figura nº68 Setas indicando fraturas e porosidade secundária do tipo vugular cimentados por calcita. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,73m. _____	60
Figura nº69 Setas indicando porosidade secundária cimentada por calcita em plano de estilolito. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m. _____	60
Figura nº70 Detalhe da porosidade secundária cimentada por calcita (em vermelho). Setas indicando porosidade móldica cimentada. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,73m. _____	61
Figura nº71 Detalhe da porosidade secundária dos tipos intercrystalina e microvugular cimentadas por calcita (cor vermelha) próximo a estilolito (seta). Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,39m. _____	61
Figura nº72 CIMENTAÇÃO POR CALCITA _____	62
Figura nº73 Seta indicando cimento de dolomita em porosidade vugular. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,10m. _____	63
Figura nº74 Seta indicando cimento de dolomita-em-sela. Fotomicrografia, polarizadores cruzados (PX). Profundidade: 712,33m. _____	63
Figura nº75 Setas indicando fraturas cimentadas por calcita na porção de dololuto. Notar que estas terminam no contato com a porção cimentada por dolomita (seta amarela). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,61m. ____	63
Figura nº76 Detalhe do cimento dolomítico de cristalinidade muito grossa. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 716,68m. _____	63
Figura nº77 CIMENTAÇÃO POR DOLOMITA E DOLOMITA-EM-SELA _____	64
Figura nº78 Seta indicando cimento de quartzo. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,30m. _____	65
Figura nº79 Seta indicando cristal de quartzo cimentando parcialmente a porosidade. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m. _____	65
Figura nº80 Seta indicando cimento de quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 715,17m _____	65

Figura nº81 Seta vermelha indicando silicificação próxima a plano de estilolito. Seta amarela indicando porção calcítica. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,22m _____	65
Figura nº82 CALCIRRUDITO INTRACLÁSTICO _____	69
Figura nº83 Setas amarelas indicando intraclastos carbonáticos e seta vermelha indicando cimento de calcita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,41m. _____	70
Figura nº84 Detalhe dos intraclastos carbonáticos (setas vermelhas) cimentados por calcita (seta verde). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m. _____	70
Figura nº85 Seta vermelha indicando oolito (notar a presença de pelóides ao lado), seta amarela indicando cimento calcítico nas bordas e seta verde indicando cimento calcítico blocoso no centro do poro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m. _____	70
Figura nº86 Observar contatos flutuantes e pontuais entre os grãos, indicando que a cimentação por calcita ocorreu na eodiagênese, visto que não há compactação dos grãos. Seta indicando estilolito, mostrando que a compactação química ocorreu após a cimentação. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,41m. _____	70
Figura nº87 Detalhe da porosidade secundária (em azul). Seta vermelha indicando porosidade do tipo canal e seta amarela indicando porosidade móldica parcialmente cimentada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m. ____	70
Figura nº88 Seta amarela indicando porosidade secundária do tipo canal e seta vermelha indicando porosidade vugular parcialmente cimentada por dolomita-em-sela e calcita blocosa. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m. _____	70
Figura nº89 CALCARENITO INTRACLÁSTICO PELOIDAL _____	72
Figura nº90 Calcarenito intraclástico peloidal. Seta indicando intraclasto carbonático. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m. _____	73
Figura nº91 Detalhe do calcarenito peloidal. Seta amarela indicando porção com pelóides tamanho silte. Seta vermelha indicando estilolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 108,33m. _____	73
Figura nº92 Seta indicando intraclasto carbonático (fragmento de calcarenito). Fotomicrografia, P//. Profundidade 110,78m. _____	73
Figura nº93 Detalhe dos grãos oolíticos concentrados em pequena porção da rocha. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m. _____	73
Figura nº94 Detalhe da porosidade secundária gerada por processo de dissolução. Setas indicando porosidade do tipo canal cortando plano de estilolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 238,48. _____	73
Figura nº95 Detalhe da dolomita-em-sela cimentando porosidade secundária. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 239,53. _____	73

Figura nº96 CALCILUTITO _____	75
Figura nº97 Detalhe da fácies de calcilutito. Seta amarela indicando estrutura lenticular. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,68m. _____	76
Figura nº98 Detalhe da laminação levemente ondulada. Níveis mais escuros contém maior quantidade de matéria orgânica. Os níveis mais claros são peloidais. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,68m. _____	76
Figura nº99 Seta indicando nível rico em matéria orgânica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,93m. _____	76
Figura nº100 Detalhe do nível peloidal. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,68m. _____	76
Figura nº101 Detalhe do calcilutito peloidal. Seta indicando pequenas porções com cimentação. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 103,62m. _____	76
Figura nº102 Detalhe da porosidade secundária do tipo canal ao longo do plano do estilolito. Porosidade em azul. Fotomicrografia, P//, profundidade: 103,62m. _____	76
Figura nº103 Marcas onduladas em calcarenito da Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108. _____	77
Figura nº104 Estratificação cruzada em calcarenito Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108. _____	77
Figura nº105 Lapiseira indicando nível mais grosso de calcarenito. Seta indicando dique de areia. Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108. _____	77
Figura nº106 Lapiseira indicando dique de areia. Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108.	77
Figura nº107 Detalhe do dique de areia. Foto de detalhe obtida com lupa petrográfica. Testemunho 1. Profundidade: 107, 36m _____	78
Figura nº108 Detalhe de estrutura do tipo flaser. Foto de detalhe obtida com lupa petrográfica. Testemunho 1. Profundidade: 106, 55m _____	78
Figura nº109 Detalhe do calcirrudito intraclástico da Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108. _____	78
Figura nº110 Foto de detalhe da fácies de calcirrudito intraclástico. Testemunho 1. Profundidade: 111,44m. _____	78
Figura nº111 EMPILHAMENTO DE FÁCIES - TESTEMUNHO 1 _____	79
Figura nº112 EMPILHAMENTO DE FÁCIES - TESTEMUNHO 2 _____	80
Figura nº113 Detalhe de oolito com núcleo de intraclasto carbonático (seta amarela). Seta vermelha indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso. Fotomicrografia, P//. Profundidade 111,41m. _____	81
Figura nº114 Seta vermelha indicando possível franja de cimento calcítico ao redor dos grãos. Seta azul indicando cimento calcítico na borda do poro, com cristais crescendo a partir da parede do grão em direção ao centro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m. _____	81

Figura nº115 A - Seta amarela indicando grão carbonático, seta vermelha indicando cimento de calcita prismática na borda do poro e seta azul indicando cimento de calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando grão carbonático, seta vermelha indicando cimento calcítico na borda do poro com baixa luminescência e seta azul indicando cimento de calcita blocosa com luminescência maior. Profundidade:111,05m. _____	82
Figura nº116 A – Detalhe do calcarenito intensamente recristalizado. Seta indicando grão carbonático. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando grão carbonático, seta azul indicando franja de cimento calcítico com baixa luminescência ao redor do grão. Profundidade:237,76m. _____	82
Figura nº117 Detalhe dos estilolitos horizontais, paralelos ao acamamento. Foto de detalhe. Profundidade: 103,30m. _____	83
Figura nº118 Detalhe dos estilolitos horizontais e subhorizontais, paralelos ao acamamento. Foto de detalhe. Profundidade: 237,27m. _____	83
Figura nº119 Detalhe do estilolito no contato entre as litologias. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 236,67m. ____	83
Figura nº120 Seta indicando estilolito acompanhando contato entre calcarenito (parte superior de foto) e calciluto (abaixo do estilolito). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 110,78m. _____	83
Figura nº121 Seta indicando filmes de dissolução. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m. _____	83
Figura nº122 Detalhe do estilolito subvertical. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m. _____	83
Figura nº123 Seta indicando fraturas horizontais e subverticais cimentadas por calcita. Seta amarela indica porosidade secundária também cimentada por calcita. Foto de detalhe. Profundidade: 105,95m. _____	84
Figura nº124 Seta vermelha indicando fratura subvertical cimentada por calcita. Seta amarela indicando porosidade secundária do tipo vugular cimentada por calcita. Foto de detalhe. Profundidade: 111,70m. _____	84
Figura nº125 Seta indicando porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Fácies: calcarenito fino a muito fino peloidal. Vista geral da lâmina. Polarizadores paralelos (P//). Profundidade: 108,33m. _____	84
Figura nº126 Detalhe da porosidade vugular associada com fraturas e cimentada por calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,08m. _____	84
Figura nº127 Seta indicando cristais de calcita cimentando porosidade secundária. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95. _____	85
Figura nº128 Detalhe dos cristais zonados de calcita blocosa cimentando porosidade vugular. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m. _____	85
Figura nº129 A - Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Profundidade:109,08m. _____	85

- Figura nº130 A - Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Notar crescimento dos cristais da borda para o centro do poro. Profundidade:239,53m. _____ 85
- Figura nº131 Detalhe do calcarenito recristalizado. Fotomicrografia, P//. Profundidade 108,33m. _____ 86
- Figura nº132 Seta indicando cristal de calcita neoformado englobando fratura e matriz da rocha. Fotomicrografia, P//. Profundidade 108,33m. _____ 86
- Figura nº133 A - Detalhe do calcarenito recristalizado. Seta vermelha indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando grão carbonático. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta vermelha indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando grão carbonático. Notar baixa luminescência no cimento calcítico do tipo mosaico grosso. Profundidade:111,15m. ____ 86
- Figura nº134 A - Detalhe do calcarenito recristalizado. Seta amarela indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando cimento de calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta branca indicando franja de cimento ao redor do grão, seta amarela indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando cimento de calcita blocosa. Pode-se observar zonação nos cristais de calcita do cimento do tipo mosaico. Profundidade:240,21m. _____ 87
- Figura nº135 A - Detalhe do calcarenito recristalizado. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Setas indicando grãos recristalizados, com cristais de calcita crescendo da borda em direção ao centro do grão. Profundidade:239,53m. _____ 87
- Figura nº136 A - Detalhe do calcarenito intensamente recristalizado. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Notar segundo processo de recristalização ocorrendo de forma pervasiva, gerando cristais mais luminescentes (seta). Profundidade:236,67m. _____ 87
- Figura nº137 Detalhe da fratura cimentada por calcita apresentando porosidade original da fratura remanescente (Foto A) e porosidade secundária gerada por processo de dissolução (Foto B), a qual dissolveu parte do cimento de preenchimento da fratura e a matriz da rocha. Formação Lagoa do Jacaré. Profundidade: 108,70 m. _____ 88
- Figura nº138 Detalhe da porosidade secundária dos tipos móldica (seta vermelha), vugular (seta amarela) e intercrystalina. Foto de detalhe obtida em lupa petrográfica. Profundidade: 111,10m. _____ 89
- Figura nº139 Detalhe da porosidade secundária dos tipos móldica, vugular e intercrystalina. Foto de detalhe obtida em lupa petrográfica. Profundidade: 111,10m. _____ 89
- Figura nº140 Detalhe da porosidade secundária (em azul). Seta amarela indicando porosidade do tipo channel e setas vermelhas indicando porosidade móldica parcialmente cimentada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m. _ 89
- Figura nº141 Seta indicando porosidade secundária ao longo de plano de estilólito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m. _____ 89
- Figura nº142 Detalhe da fratura aberta cortando estilólitos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 237,76m. _____ 89

Figura nº143 Setas indicando micro-fraturas abertas ao longo do nível com estilolitos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 236,67m. _____	89
Figura nº144 Detalhe da dolomita-em-sela cimentando porosidade secundária. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 239,53m. _____	90
Figura nº145 Seta vermelha indicando dolomita-em-sela, e seta amarela indicando calcita blocosa cimentando porosidade secundária do tipo móldica. Seta verde indica material opaco entre cristais de calcita. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m. _____	90
Figura nº146 Setas indicando a presença de material opaco entre os cristais de dolomita-em-sela e também como inclusões nestes. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m. _____	91
Figura nº147 Setas indicando cristais de quartzo associado com cimento calcítico blocoso. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 240,21m. _____	91
Figura nº148 DOLOMITA-EM-SELA _____	92
Figura nº149 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. A - Cimento; B - Matriz. Testemunho 1. Profundidade: 105,77 m _____	95
Figura nº150 Foto de detalhe do ponto onde foi coletada amostra para análise isotópica. Testemunho 1. A – Cimento. Profundidade: 105,96 m. _____	95
Figura nº151 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. A - Cimento; B - Matriz. Testemunho 1. Profundidade: 106,30 m _____	96
Figura nº152 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. A - Cimento; B - Matriz. Testemunho 1. Profundidade: 111,63 m _____	96
Figura nº153 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. C - Preenchimento 1(Sedimento); E - Matriz. Testemunho 4. Profundidade: 711,76 m. _____	96
Figura nº154 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. C - Preenchimento 1(Sedimento) ; D - Preenchimento 2(Cimento); E – Matriz. Testemunho 4. Profundidade: 712,06 m. _____	96
Figura nº155 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. C - Preenchimento 1(Sedimento); E – Matriz. Testemunho 4. Profundidade: 713,12 m _____	97
Figura nº156 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. F- Cristais de Fratura. Testemunho 4. Profundidade: 714,33 m. _____	97

Figura nº157 Gráfico de dispersão mostrando a distribuição dos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras pontuais coletadas nos testemunhos 1 e 4 do poço 1-RC-1-GO. O testemunho 1 corresponde a Fm. Lagoa do Jacaré e o testemunho 4 corresponde a Fm. Sete Lagoas.	98
Figura nº158 (A) Mapa de localização do Cinturão de Dobramentos Brasília (CDB) e o Cráton do São Francisco (Dardenne, 2000); (B) Mapa geológico do segmento sul do CDB (Dardenne, 2000): (1) bacias fanerozóicas; (2) Fm. Três Marias (Gr. Bambuí); (3) Subgrupo Paraopeba (Gr. Bambuí); (4) Fm. Ibiá; (5) Gr. Araxá; (6) Granulitos e ortognaisses; (7) Gr. Vazante; (8) Grupo Paranoá; (9) Gr. Canastra; (C) Mapa geológico do Grupo Vazante e a localização dos depósitos de Vazante, Ambrósia e Fagundes e a localização do furo PFF-57 (Votorantim Metais), (1) Fm. Paracatu (Gr. Canastra), (2) Fm. Serra do Landim (Gr. Canastra), (3) Mb. Serra da Lapa, Fm. Serra da Lapa (Gr. Vazante), (4) Mb. Serra do Velosinho, Fm. Lapa (Gr. Vazante), (5) Formações Morro do Calcário e Serra do Poço Verde (Gr. Vazante), (6) Fm. Serra do Garrote (Gr. Vazante), (7) Anomalias de Pb; (D) Seção estratigráfica (cross-section) do Grupo Vazante (Oliveira, 1998).	100
Figura nº159 Coluna litoestratigráfica esquemática (Dardenne <i>et. al.</i> , 1998, Dardenne, 2000) e descrição sucinta das sete formações que constituem o Grupo Vazante, estudadas por diversos autores, tais como Dardenne (1978), Madalosso & Vale (1978), Campos Neto (1984), Dardenne et al. (1997), Rigobello et al. (1988) e compiladas em Bettencourt et al. (2001).	101
Figura nº160 Mapa geológico da região de Fagundes, MG, com a localização do furo PFF-57 (cedido pela Votorantim Metais). As Brechas dolomíticas pertencem a Formação Morro do Calcário. O contato entre a Fm. Morro do Calcário e a Fm. Serra da Lapa (Margas) se dá através de falha de empurrão.	105
Figura nº161 DOLOLUTITO	107
Figura nº162 Seta indicando porosidade cimentada na fácies de dololutito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 11,05m.	108
Figura nº163 Dololutito laminado com deformação sin-sedimentar (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 26,25m.	108
Figura nº164 Detalhe de níveis de silicificação. Seta amarela indicando microquartzo, seta verde indicando calcedônia e seta vermelha indicando quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 75,71m.	108
Figura nº165 Seta indicando fratura cimentada por dolomita na fácies de dololutito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 90,70m.	108
Figura nº166 Finos cristais de pirita ocorrendo de forma dispersa ou concentrada em porções da rocha (seta) . Fotomicrografia, P//. Profundidade: 90,70m	108
Figura nº167 Setas indicando grãos de quartzo tamanho silte a areia muito fina dispersos na rocha. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 107,24m	108
Figura nº168 DOLARENITO	110

Figura nº169 Detalhe do dolarenito. Seta vermelha indicando microfalha e seta amarela indicando possível oolito/oncolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 36,16m.	111
Figura nº170 Detalhe do dolarenito. Setas vermelhas indicando os grãos (dolomita com cristalinidade fina) e seta azul indicando cimento dolomítico. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 56,75m.	111
Figura nº171 Seta indicando cimento dolomítico com forma botrioidal e cor mais escura. Cristais límpidos de dolomita crescem posteriormente como sobrecrecimento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 36,16m.	111
Figura nº172 Seta indicando cimento dolomítico com forma botrioidal e cor mais escura. Cristais límpidos de dolomita crescem posteriormente como sobrecrecimento, e seta amarela indicando cimentação por calcedônia. Mesma visada da figura 170. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,16m.	111
Figura nº173 Dolarenito com fratura cimentada por dolomita (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 56,75m.	111
Figura nº174 Detalhe dos grãos carbonáticos parcialmente silicificados, podendo-se ainda observar formas concêntricas, correspondendo à estrutura interna de oolito/oncolito. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,16m.	111
Figura nº175 DOLORRUDITO	113
Figura nº176 DOLORRUDITO	114
Figura nº177 Detalhe do fragmento lítico com estrutura interna arqueada (possivelmente estrutura estromatolítica). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 14,60m.	115
Figura nº178 Seta amarela indicando fragmento de calcarenito e seta vermelha indicando fratura. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 36,67m.	115
Figura nº179 Setas indicando grãos de quartzo tamanho silte dispersos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 25,18m.	115
Figura nº180 Seta vermelha indicando dolomita fibro-radial crescendo em direção ao centro da porosidade e seta azul indicando cristais regulares de dolomita obliterando totalmente o espaço poroso. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 39,75m.	115
Figura nº181 Seta amarela indicando cimento com aspecto micrítico e forma botrioidal nas bordas do poro e seta azul indicando cristal de dolomita de cristalinidade muito grossa obliterando o poro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 37,80m.	115
Figura nº182 Seta indicando cimentação por sílica (calcedônia nas bordas e quartzo no centro) e dolomita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 25,18m.	115
Figura nº183 Dolomito com porosidade fenestral cimentada por cristais de dolomita mais grossos (setas) – fragmento dentro da brecha carbonática (dolorrudito). Profundidade 13,60m, cx 04.	116
Figura nº184 Dolomito com estrutura fenestral e textura geopetal (setas) – fragmento dentro da brecha carbonática (dolorrudito). Profundidade 106,73m, cx 26.	116
Figura nº185 BRECHA DOLOMÍTICA DE FALHA	118

Figura nº186 Seta indicando fragmento carbonático em meio à porção silicificada, cortado por fraturas. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 8,75m. _____	119
Figura nº187 Detalhe da cimentação por sílica (calcedônia) entre os fragmentos carbonáticos. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 8,75m. _____	119
Figura nº188 Detalhe do espaço intergranular cimentado por dolomita (seta vermelha) e sílica (seta azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 8,75m. _____	119
Figura nº189 Detalhe do cimento de sílica apresentando várias fases de crescimento. Seta vermelha indicando microquartzo (primeira fase), seta amarela indicando calcedônia (segunda fase), seta verde indicando microquartzo (terceira fase) e seta azul indicando quartzo (última fase de cimentação). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 9,25m. _____	119
Figura nº190 EMPILHAMENTO DE FÁCIES – TESTEMUNHO DO FURO PFF-57 _____	121
Figura nº191 Bioherma de estromatolitos colunares. Formação Morro do Calcário. Pedreira Poções, Fagundes. ____	122
Figura nº192 Dolorrudito muito mal selecionado, com blocos e matacões (setas). Pôde-se observar que alguns matacões são fragmentos de biohermas de estromatolitos colunares. Formação Morro do Calcário. Pedreira poções, Fagundes. _____	122
Figura nº193 Detalhe de estromatolito colunar. Notar que sua direção de crescimento muda completamente, indicando movimentação do substrato. Formação Morro do Calcário. Pedreira Poções, Fagundes. _____	122
Figura nº194 Setas indicando o crescimento de estromatolitos ao redor de bloco de dolarenito, indicando que durante a deposição havia movimentação de blocos rolados. Formação Morro do Calcário. Pedreira Poções, Fagundes. ____	122
Figura nº195 Detalhe da dolomita fibro-radial, tratando-se provavelmente de cimentação calcítica marinha dolomitizada. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 39,75m. _____	123
Figura nº196 Seta vermelha indicando dolomita fibro-radial crescendo em direção ao centro da porosidade e seta azul indicando cristais equantes de dolomita obliterando o espaço poroso. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 39,75m.	123
Figura nº197 A - Círculo mostrando dolomita fibro-radial. Fotomicrografia, PX. B - Imagem de catodoluminescência correspondendo à foto A. Pode-se notar que a luminescência da dolomita fibro-radial é baixa, semelhante à da matriz da rocha. Profundidade: 85,02m _____	123
Figura nº198 Seta vermelha indicando cimento dolomítico com forma botrioidal, seta azul indicando cimento dolomítico blocoso e seta amarela indicando cimentação por calcedônia. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,16m _____	124
Figura nº199 Seta amarela indicando cimento botrioidal com textura micrítica crescendo nas bordas do poro e seta azul indicando cristal de dolomita de cristalinidade muito grossa obliterando o poro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 37,80m. _____	124

Figura nº200 A – Detalhe do cimento botrioidal com núcleo micrítico e sobrecrecimento de cimento de dolomita com cristais límpidos e de cristalinidade grossa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência correspondendo à foto A. Nota-se que o núcleo do cimento botrioidal (seta amarela) apresenta luminescência maior que as bordas (seta azul), indicando tratar-se de fases diferentes de cimentação. Fotomicrografia de catodoluminescência, profundidade: 38,92m. _____	124
Figura nº201 Difrátograma mostrando a composição da amostra como 100% dolomítica. Profundidade: 22,53m. _	125
Figura nº202 Análise feita em material de preenchimento de fratura. Difrátograma mostrando a presença de magnesita (azul claro), dolomita (azul escuro) e pequena quantidade de quartzo (vermelho). Profundidade: 68,35m. _____	126
Figura nº203 Setas indicando fraturas cimentadas por dolomita xenotópica, indicando houve dolomitização ou recristalização após a cimentação. Fotomicrografias, P//. A) Profundidade: 56,75m. B) Profundidade: 85,02m. ____	127
Figura nº204 Detalhe de dolarenito mostrando a diferença de cristalinidade da dolomita. Setas vermelhas indicando dolomita com cristalinidade fina, a qual está substituindo os grãos, e seta azul indicando dolomita mais grossa, a qual está substituindo o cimento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 56,75m. _____	128
Figura nº205 Detalhe de brecha carbonática mostrando a diferença de cristalinidade da dolomita. Seta vermelha indicando dolomita com cristalinidade fina, a qual está substituindo os grãos, e seta azul indicando dolomita mais grossa, a qual está substituindo o cimento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 71,90m _____	128
Figura nº206 Detalhe da brecha carbonática mostrando a diferença de cristalinidade da dolomita. Seta vermelha indicando dolomita com cristalinidade fina, a qual está substituindo os grãos, e seta azul indicando dolomita mais fina, a qual está substituindo a matriz. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,47m _____	128
Figura nº207 Detalhe dos cristais de dolomita com bordas irregulares. Seta indicando porção com cristais mais finos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 38,92m. _____	128
Figura nº208 Detalhe de dolomita fina a muito fina em dololutito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 91,20m. ____	128
Figura nº209 Seta indicando delgado nível de granulação mais grossa, onde a dolomita também apresenta cristalinidade um pouco mais grossa. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 96,38m. _____	128
Figura nº210 DOLOMITA DE SUBSTITUIÇÃO _____	129
Figura nº211 Seta indicando porção da rocha aonde os cristais de dolomita apresentam cristalinidade grossa a muito grossa, tratando-se de cimentação mesodiagenética. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 11,05m. _____	130
Figura nº212 Seta vermelha indicando sílica e seta amarela indicando cristais de dolomita muito grossos a extremamente grossos, tratando-se de cimentação durante hidrotermalismo. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 12,93m. _____	130
Figura nº213 Detalhe da cimentação por dolomita (cristais mais grossos). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 25,18m. _____	130

Figura nº214 Setas indicando cristais de dolomita romboédricos ocorrendo como cimento. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 73,12m. _____	130
Figura nº215 DOLOMITA DE CIMENTAÇÃO _____	131
Figura nº216 DOLOMITA DE CIMENTAÇÃO DE FRATURA _____	132
Figura nº217 Setas vermelhas indicando silicificação parcial da rocha. Seta azul indicando cimento de sílica (quartzo). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 44,02m. _____	133
Figura nº218 Detalhe dos cristais de quartzo que ocorrem substituindo parcialmente a rocha. Notar a forma irregular dos cristais. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 44,02m. _____	133
Figura nº219 Detalhe da silicificação parcial da rocha na forma de “mancha”, com bordas arredondadas. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 60,38m. _____	133
Figura nº220 Silicificação parcial da rocha – microquartzo e quartzo com bordas irregulares. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 109,22m. _____	133
Figura nº221 Detalhe da silicificação parcial da rocha na forma de “manchas” arredondadas (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 17,08m. _____	134
Figura nº222 Detalhe da silicificação parcial da rocha na forma de “manchas” (seta). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 15,28m. _____	134
Figura nº223 Detalhe da silicificação intensa da rocha. Notar diferença na cristalinidade do quartzo que substitui a matriz da rocha (microquartzo – seta vermelha) ou o cimento (quartzo com bordas irregulares – seta amarela). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 87,73m. _____	134
Figura nº224 Detalhe da silicificação intensa da rocha. Notar diferença na cristalinidade do quartzo que substitui a matriz da rocha (microquartzo – seta vermelha) ou o cimento (quartzo com bordas irregulares – seta amarela). Notar quartzo substituindo preenchimento da fratura (seta verde). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 98,48m _____	134
Figura nº225 Detalhe dos cristais de quartzo que ocorrem como cimento (seta). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 12,93m. _____	135
Figura nº226 Seta indicando quartzo cimentando fratura. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,67m _____	135
Figura nº227 Detalhe de várias fases de cimentação de sílica. Seta amarela indicando níveis de calcedônia e seta vermelha indicando quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 44,02m. _____	135
Figura nº228 Detalhe de diferentes fases de cimentação por sílica. Seta amarela indicando níveis de calcedônia e seta vermelha indicando quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 51,25m. _____	135
Figura nº229 Detalhe dos cristais de calcedônia (seta vermelha) e quartzo (seta amarela) que ocorrem como cimento. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 80,30m. _____	135
Figura nº230 Seta amarela indicando cristal de quartzo que ocorre como cimento, mostrando-se rico em inclusões fluidas (seta vermelha). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 109,22m. _____	135

Figura nº231 SILICIFICAÇÃO _____	136
Figura nº232 Seta indicando estilolito no contato entre porção silicificada da rocha e matriz dolomítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 40,00m. _____	137
Figura nº233 Seta indicando estilolito. Notar que ele é posterior ao processo de fraturamento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 39,75m. _____	137
Figura nº234 Seta vermelha indicando estilolito cortando fratura cimentada por dolomita. Notar a presença de pirita (mineral opaco – seta amarela) associada com o estilolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 114,90m. _____	137
Figura nº235 Setas indicando planos de estilolitos com concentração de cristais de pirita. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 39,75m. _____	137
Figura nº236 ESTILOLITO _____	138
Figura nº237 Seta indicando planos de clivagem da dolomita deslocados. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 40,00m _____	139
Figura nº238 Seta indicando planos de clivagem da dolomita deformados. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 40,00m _____	139
Figura nº239 Cristais de dolomita apresentando o início da formação de subcristais. Seta indicando resquício da antiga clivagem do cristal. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 30,70m. _____	139
Figura nº240 Seta vermelha indicando cimento dolomítico com cristais de pirita nas bordas e seta amarela indicando zona de cisalhamento com cristais de dolomita alongados. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 41,92m. _____	139
Figura nº241 Detalhe de plano de cisalhamento cortando cristais de dolomita com formas irregulares e extinção ondulante. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 42,90m _____	140
Figura nº242 Plano de cisalhamento (seta) cortando fratura cimentada por dolomita. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 85,02m. _____	140
Figura nº243 Seta vermelha indicando zona de cisalhamento e seta amarela indicando silicificação associada. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 121,82m. _____	140
Figura nº244 Setas amarelas indicando porções cimentadas por dolomita próximas a plano de estilolito (seta vermelha). Foto de detalhe. Profundidade: 103,85m. _____	142
Figura nº245 Seta indicando porções cimentadas por dolomita próximas a plano de estilolito. Foto de detalhe. Profundidade: 109,29m. _____	142
Figura nº246 Seta indicando porção da rocha aonde os cristais de dolomita apresentam cristalinidade muito grossa, tratando-se possivelmente de porosidade cimentada. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 11,05m. _____	142
Figura nº247 Seta vermelha indicando sílica e seta amarela indicando cristais de dolomita muito grossos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 12,93m. _____	142

Figura nº248 Seta indicando cimentação por sílica. Os cristais crescem da borda em direção ao centro do poro. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 42,86m. _____	142
Figura nº249 Detalhe do cimento de quartzo (seta). Notar que no centro do poro os cristais são maiores. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 80,30m. _____	142
Figura nº250 DISSOLUÇÃO TARDIA E MIGRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS _____	143
Figura nº251 Detalhe da rocha intensamente fraturada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 48,75m. _____	144
Figura nº252 Detalhe da rocha intensamente fraturada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 49,14m. _____	144
Figura nº253 Detalhe da fratura preenchida por quartzo (Qtz - seta verde) e dolomita (Dol). Profundidade 103,25m. _____	145
Figura nº254 Detalhe da fratura preenchida por quartzo (Qtz - seta verde) e dolomita (Dol). Profundidade 65,60m. _____	145
Figura nº255 Detalhe das mineralizações de esfalerita (Esf), galena (Gal - seta laranja) e dolomita (Dol - seta azul) em fratura. Profundidade 90,15m. _____	145
Figura nº256 Detalhe da cimentação na fratura. Da borda para o centro ocorre sílica (calcedônia - Cld e posteriormente quartzo - Qtz), esfalerita - Sph e por último dolomita - Dol. A - Fotomicrografia, P//. B – Fotomicrografia, PX (mesma visada da foto A), Profundidade: 51,25m. _____	145
Figura nº257 Zonação na borda da fratura. Na esquerda da foto está a parede da fratura, aonde a matriz da rocha apresenta composição dolomítica. Da esquerda para a direita pode-se observar a passagem de nível com esfalerita e pirita, nível de pirita e depois esfalerita com galena. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 89,95m. _____	146
Figura nº258 Detalhe da zonação da mineralização na fratura, aonde na porção inferior da foto ocorre nível com associação de pirita e esfalerita, posteriormente ocorre nível de pirita e acima deste ocorre associação de esfalerita e galena. Notar que a mineralização está microfraturada, com dolomita cimentando. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 89,95m. _____	146
Figura nº259 Detalhe da borda da fratura com mineralização de pirita e posteriormente esfalerita e pirita. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 101,61m. _____	146
Figura nº260 Detalhe da esfalerita microfraturada com dolomita e galena cimentado as microfraturas. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 100,71m. _____	146
Figura nº261 Seta vermelha indicando nível com cristais de pirita com formas arredondadas. Setas azuis indicando microfraturas na esfalerita e em cristais de pirita associados a esta, com dolomita cimentando. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 100,71m. _____	147
Figura nº262 Seta indicando microfraturas na esfalerita. Notar galena cimentando pequena parte da fratura e dolomita cimentando o restante. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 89,95m. _____	147
Figura nº263 FRATURAS E MINERALIZAÇÕES PRESENTES NO FURO PFF-57 _____	148
Figura nº264 FALHAS _____	149

Figura nº265 Detalhe da brecha hidrotermal a qual ocorre na forma de bolsões em dolarenito da Formação Morro do Calcário. Bento Carmelo, MG. _____ 151

Figura nº266 Gráfico de dispersão mostrando a distribuição dos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de rocha total e amostras pontuais de dolomitas em fraturas no testemunho do furo PFF-57. _____ 153

LISTA DE TABELAS

Tabela nº1 Classificação de cristalinidade segundo Folk (1980). _____	24
Tabela nº2 Litoestratigrafia na região de Belo Horizonte por Dardenne 1981 (contribuições de Branco e Costa 1961, Oliveira 1967, Scholl 1972, 1973, Alvarenga e Dardenne 1978). _____	32
Tabela nº3 Resumo dos principais eventos diagenéticos observados através do estudo petrográfico realizado nos carbonatos da Formação Sete Lagoas presentes no testemunho 4 do poço 1-RC-1-GO. _____	67
Tabela nº4 Resumo dos principais eventos diagenéticos observados através do estudo petrográfico realizado nos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré presentes nos testemunhos 1 e 2 do poço 1-RC-1-GO. _____	94
Tabela nº5 Resumo dos principais eventos diagenéticos observados através do estudo petrográfico realizado nos carbonatos da Formação Morro do Calcário presentes no testemunho do furo PFF-57 _____	152

1 INTRODUÇÃO

Os carbonatos são minerais altamente instáveis e reativos quimicamente. Isto significa que processos como cimentação, neomorfismo e dissolução são extremamente comuns em rochas carbonáticas. Os processos diagenéticos ocorrem ainda no ambiente deposicional e continuam até o soterramento profundo, associados ou não a condições hidrotermais, que imprimem às rochas feições características. Poderíamos dizer, então, que as rochas carbonáticas estão em contínua transformação.

O presente trabalho teve como objeto de estudo as rochas carbonáticas proterozóicas dos grupos Vazante (região de Paracatu, MG) e Bambuí (região de Alvorada do Norte, GO). Do primeiro, foram amostrada a Formação Morro do Calcário, no furo PFF-57, enquanto as unidades carbonáticas do Grupo Bambuí (formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré) foram amostradas em testemunhos do poço 1-RC-1-GO. Carbonatos das três formações foram também descritas e amostradas em campo.

Na região de Alvorada do Norte, nos carbonatos da Fm. Lagoa do Jacaré, foi detectada a presença de gás durante a perfuração do poço 1-RC-1-GO, porém o poço não se mostrou produtor.

Estas rochas carbonáticas, de idade neoproterozóica, já sofreram intensos processos de recristalização, cimentação e por vezes dolomitização, razão pela qual dificilmente mantêm suas características originais. A diagênese neste caso é o grande agente transformador do sistema permo-poroso da rocha, e seu estudo é essencial tanto na fase exploracionista quanto na fase de caracterização do reservatório.

As rochas carbonáticas do Grupo Vazante na região de Vazante-Paracatu, de idade mesoproterozóica, além dos processos de intensa cimentação e dolomitização, sofreram também processos de hidrotermalismo, o que resultou nas mineralizações de Pb-Zn, gerando depósitos economicamente importantes na região. Estes carbonatos também são alvo na exploração de hidrocarbonetos, tendo sido observada a presença de betume em afloramento e furos de sondagem.

Visando a melhor compreensão dos processos pós-deposicionais em rochas carbonáticas, esse trabalho de mestrado teve como objetivo:

- 1- Identificar as feições petrográficas (composicionais e texturais) características da diagênese;
- 2- Identificar as feições petrográficas (composicionais e texturais) características do hidrotermalismo;

- 3- Estabelecer as relações entre as feições petrográficas com as etapas de soterramento e exposição;
- 4- Estabelecer as relações entre a circulação de fluidos durante os processos diagenéticos e hidrotermais com a geração e obliteração de porosidade.

Assim, a presente dissertação apresenta os métodos utilizados para a caracterização das amostras, em trabalhos de campo e de laboratório (capítulo 2). O estado da arte com relação à rochas carbonáticas, diagênese e hidrotermalismo constam dos capítulos 3 e 4, enquanto os resultados da caracterização faciológica, petrográfica e isotópica das rochas carbonáticas das formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré (ambas do Grupo Bambuí) e Morro do Calcário (Grupo Vazante), estão contidos nos capítulos 5 a 6. No capítulo 7 estão as discussões dos resultados e no capítulo 8 as conclusões.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização das rochas carbonáticas foram descritas as feições macroscópicas em afloramentos e testemunhos de perfurações. Amostras coletadas foram submetidas a análises petrográficas por microscopia ótica e catodoluminescência, por difratometria de raios-X e isotópicas.

2.1 Trabalho de campo

Foram realizados dois trabalhos de campo, sendo um na região de Vazante-Paracatú, Minas Gerais, onde está localizado o furo PFF-57, e o outro na região de Alvorada do Norte, Goiás, onde está localizado o poço 1-RC-1-GO.

O objetivo destes trabalhos foi reconhecer em campo as litologias observadas nos testemunhos de rocha, para melhor compreensão das fácies deposicionais e empilhamento estratigráfico. Além das fácies foi possível também observar feições estruturais e diagenéticas.

2.2 Petrografia

No laboratório de testemunho do centro de pesquisas da Petrobrás foram descritos macroscopicamente, com auxílio de lupa binocular, 126 metros de testemunho do furo PFF-57 e 26 metros de testemunho do poço 1-RC-1-GO. Neste momento selecionou-se pontos para confecção de lâminas petrográficas, análises de difração de raios-x e isótopos.

Para análises de microscopia ótica foram descritas 62 lâminas petrográficas correspondentes a amostras do furo PFF-57 e outras 35 de amostras do poço 1-RC-1-GO, totalizando 97 lâminas petrográficas. Para análises petrográficas através de luz transmitida utilizou-se microscópio Imager.A1, da Carl Zeiss. Foram analisadas também em luz refletida 4 seções polidas de amostras do testemunho do furo PFF-57, para caracterização dos minerais opacos.

2.3 Catodoluminescência

Análises por catodoluminescência foram realizadas sobre 87 lâminas petrográficas. Em uma primeira etapa foram analisadas 58 lâminas petrográficas de amostras do furo PFF-57 em aparelho

de catodoluminescência da marca Reliotron, no laboratório de catodoluminescência do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. As condições para as análises foram: vácuo entre 40 e 25 mTorr, amperagem entre 250 e 500 mA e voltagem entre 6 e 12 Kv. Em uma segunda etapa foram analisadas 29 lâminas petrográficas de amostras do poço 1-RC-1-GO em aparelho de catodoluminescência da marca CITL, modelo MK5-2, no laboratório de catodoluminescência do centro de pesquisas da Petrobrás. Neste caso as condições para as análises foram: vácuo entre 60 e 100 mBar, amperagem entre 500 e 600 mA e voltagem entre 12 e 13 Kv.

2.4 Difração de Raios-X

Foram realizadas 55 análises por difratometria de raios-x, sendo 28 de amostras do furo PFF-57 e 27 de amostras do poço 1-RC-1-GO. Amostras de fração argila foram realizadas somente em 9 amostras do poço 1-RC-1-GO. As amostras foram analisadas em difratômetro de raios-x da marca RIGAKU, modelo D/Max - 2200 PC, no laboratório de difratometria de raios-x do centro de pesquisas da Petrobrás.

Para análises de rocha total é feita a moagem da amostra em graal de ágata, e então uma lâmina de pó prensado é preparada. A análise foi realizada com varredura de 2 a 72 graus de 2θ , à velocidade de aproximadamente 2,3 graus por minuto.

Para análises da fração argila cada amostra de rocha foi submetida ao seguinte procedimento:

- A amostra de rocha foi britada e depois misturada com água destilada. Esta mistura passou por aparelho de ultra-som de ponta por 3 minutos para facilitar a liberação das partículas de argila e em seguida passa pela centrífuga, para que fosse separada a fração da amostra inferior a 2 micrômetros. Primeiramente a mistura foi submetida a uma rotação de 700 rpm por 6 minutos, em centrífuga da marca IEC Centra-8, e então o sobrenadante foi separado e submetido a uma rotação de 10000 rpm por 10 minutos, em centrífuga da marca Beckman Coulter, modelo Avante J-E.

- Com o material precipitado foi então preparada uma lâmina orientada, seca ao ar. Esta lâmina foi analisada no difratômetro de raios-x com varredura de 2 a 32 graus de 2θ , à velocidade de 6 graus por minuto.

- Após esta primeira análise a lâmina é solvatada com etileno-glicol. Para isto ela é colocada num dessecador contendo etilenoglicol; então faz-se vácuo e a lâmina permanece nesta atmosfera durante um período de no mínimo 12 horas. A lâmina é então analisada imediatamente após ser retirada do dessecador.

- Por último, a lâmina é submetida a um aquecimento de 490°C durante 5 horas em forno elétrico da marca Sanchis, com temperatura controlada (marca sanchis). A lâmina foi então analisada imediatamente após ter esfriado.

2.5 Análises isotópicas de carbono e oxigênio

Foram analisadas amostras dos furos PFF-57 e 1-RC-1-GO, de rocha total e de carbonatos de preenchimento de fratura, com o objetivo diferenciar a temperatura de cristalização da rocha da temperatura das mineralizações nas fraturas. Análises de amostras de calha tiveram o objetivo de indicar o possível posicionamento estratigráfico.

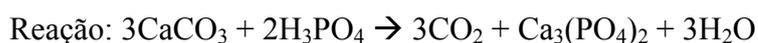
Foram analisadas amostras dos furos PFF-57 e 1-RC-1-GO de rocha total e de carbonatos de preenchimento de fratura, com o objetivo de diferenciar a temperatura de cristalização da rocha da temperatura das mineralizações nas fraturas. Análises de amostras de calha tiveram o objetivo de indicar o possível posicionamento estratigráfico.

Do furo PFF-57 foram coletadas 14 amostras de rocha total e 20 de dolomitas de preenchimento de fraturas. Do poço 1-RC-1-GO foram coletadas 6 amostras da Formação Lagoa do Jacaré, sendo 3 amostras de rocha total e 3 amostras de calcita que ocorre como cimentação em fraturas, e 16 amostras da Formação Sete Lagoas, sendo 8 amostras de rocha total e 8 amostras pontuais de calcita e dolomita que ocorrem como cimentação de fraturas.

Foram analisadas 117 amostras de calha do poço 1-RC-1-GO, no intervalo de 69 a 1200 metros, correspondentes às formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, do Grupo Bambuí, e o topo do Gr. Paranoá.

As análises de isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ foram realizadas no laboratório de isótopos estáveis do centro de pesquisas da Petrobrás.

A análise de isótopos estáveis em carbonatos consiste da obtenção de dados isotópicos de oxigênio e carbono retirados do CO_2 gerado a partir da acidificação do carbonato com ácido fosfórico concentrado.



O equipamento utilizado é um Espectrômetro de Massas, projetado para receber amostras sob a forma de gás. Por isso, é necessário transformar em gás o material a ser analisado utilizando uma linha de obtenção de gases, a qual pode estar separada (*off-line*) ou diretamente acoplada (*on-line*) ao espectrômetro.

Amostras contendo somente calcita podem ser realizadas pelos métodos *on-line* ou *off-line*

(manual). Quando há presença de dolomita, a análise deve ser feita pelo método *off-line*. Isto porque, em temperatura ambiente ($\pm 25^\circ\text{C}$) o tempo de reação da calcita com o ácido fosfórico é quase imediata enquanto que a dolomita necessita de várias horas para reagir totalmente, precisando assim de uma separação manual do gás gerado.

As medidas das relações isotópicas realizadas nas amostras são efetuadas em relação a um padrão secundário que é ajustado a um padrão internacional.

Padrão Internacional:

-Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)

$$^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 0,0112372$$

$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0,0020671$$

Dados isotópicos são representados na literatura pela notação “ δ ” (delta), que é definida como $\delta = (R_a - R_p) / R_p \times 1000$, onde R_a e R_p são as relações $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ou $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ da amostra e do padrão respectivamente.

Os valores isotópicos encontrados representam o desvio em parte por mil (‰) de uma amostra em relação ao padrão secundário, mas que está calibrado em relação ao padrão internacional.

O padrão secundário utilizado é NBS19 (*limestone*) que possui os seguintes valores isotópicos:

$$\delta^{13}\text{C} = 1,95 \text{ VPDB}\text{‰}$$

$$\delta^{18}\text{O} = -2,20 \text{ VPDB}\text{‰}$$

As análises isotópicas foram realizadas pelo método *off-line*, utilizando uma linha de obtenção de gás (linha de vidro), onde a amostra em pó reage com ácido fosfórico concentrado e o gás formado é coletado para posterior análise no espectrômetro de massas (*Finnigan - Delta V Plus*) calibrado para ler razão isotópica em CO_2 .

Para cada amostra, foi coletado e analisado o gás CO_2 referente ao tempo de reação do mineral Calcita e o gás CO_2 referente ao tempo de reação do mineral Dolomita.

No espectrômetro de massas, cada amostra de gás inserida foi analisada cinco vezes, gerando os resultados finais com suas respectivas médias.

Poço 1-RC-1-GO

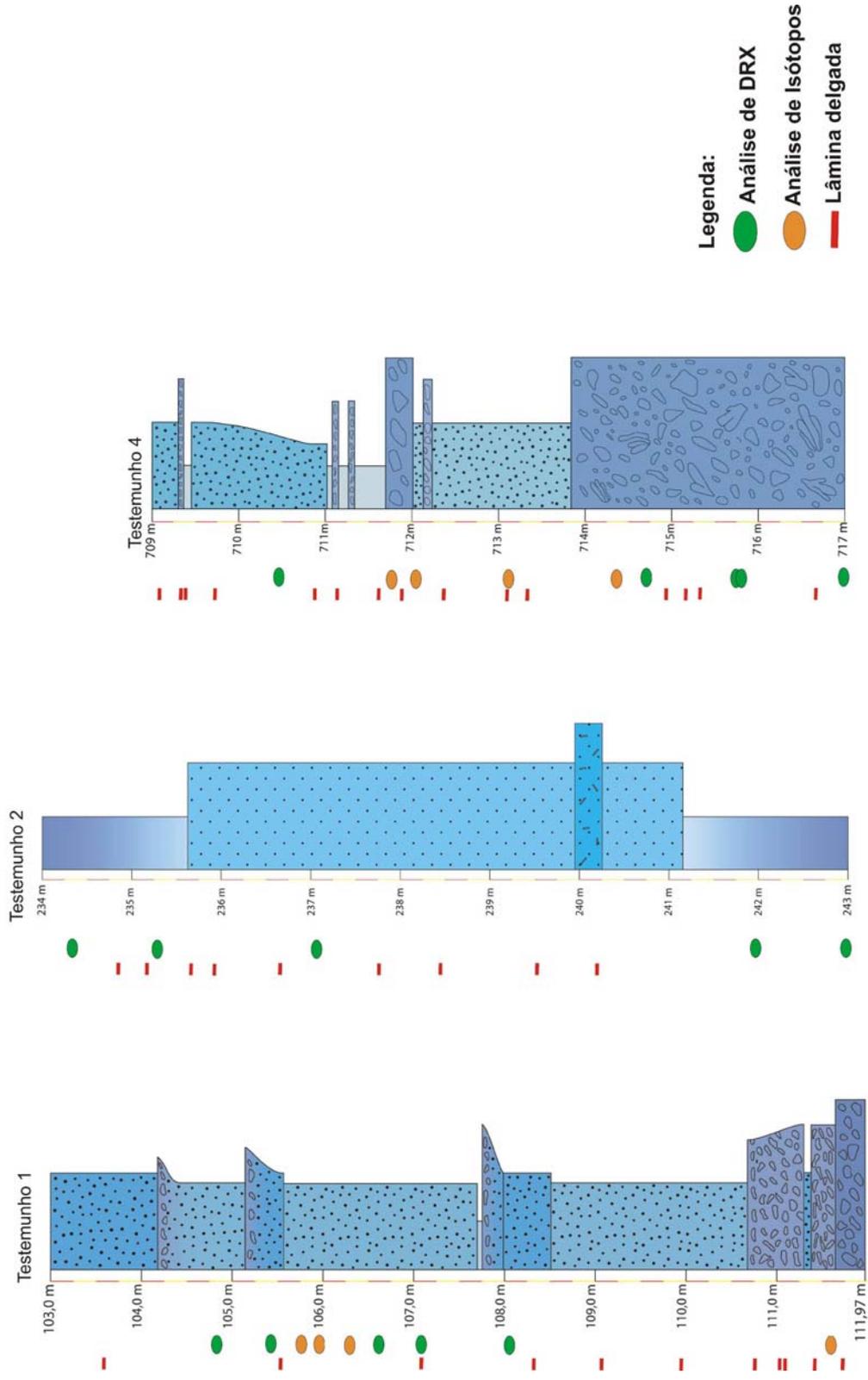


Figura nº1 Perfil litológico dos três testemunhos do poço 1-RC-1-GO, com a indicação dos locais onde foram coletadas amostras para análises de DRX, Isótopos e lâminas delgadas. OBS: Legendas das colunas litológicas estão nas páginas 50, 80 e 81.

Furo PFF-57

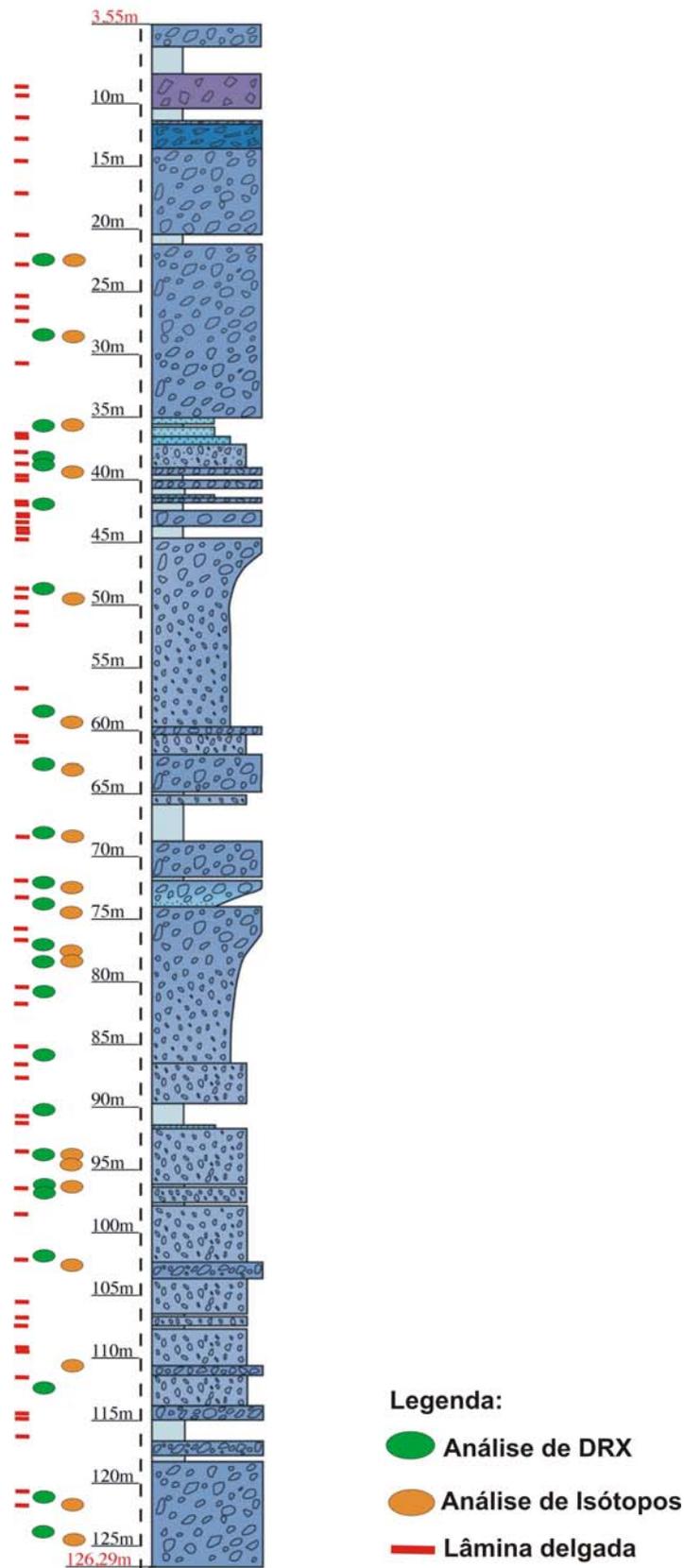


Figura nº2 Perfil litológico do testemunho do furo PFF-57 com a indicação dos locais onde foram coletadas amostras para análises de DRX, Isótopos e lâminas delgadas. OBS: Legenda da coluna litológica está na página 122.

3 ROCHAS CARBONÁTICAS

As rochas carbonáticas são classificadas em função da composição dos minerais (calcita ou dolomita), do tipo de grão (esqueletal e não-esqueletal), da proporção de matriz ou cimento e do tamanho do grão. Formam-se nos diversos tipos de plataformas carbonáticas e são modificadas por processos diagenéticos muito precoces.

O Grupo Vazante é constituído essencialmente de dolomita, enquanto no Grupo Bambuí predomina a calcita, sendo a dolomita subordinada. Em razão de sua idade proterozóica, ambos os grupos são constituídos por grãos não-esqueletais cujo tamanho varia de argila a matacão. O conteúdo em matriz e cimento varia desde ausente a existente em diferentes proporções.

3.1 Textura das rochas carbonáticas

Sedimentos carbonáticos modernos são compostos principalmente por duas espécies minerais: aragonita e calcita. Dois tipos de calcita são reconhecidas, calcita baixo-magnésiana (< 4 mol% $MgCO_3$) e calcita alto-magnésiana (>4 mol% $MgCO_3$). A aragonita e a calcita alto-magnésiana são menos estáveis que calcita baixo-magnésiana sob condições diagenéticas normais. Todas as três formas minerais podem ser substituídas por dolomita, então a maioria dos carbonatos no registro geológico são constituídos por calcita baixo-magnésiana e/ou dolomita (Tucker & Wright, 1990).

As rochas carbonáticas, apesar de serem mineralogicamente simples, são altamente variadas em função do tipo de grão. Entretanto, dois componentes principais podem ser reconhecidos: 1) aloquímicos representados pelos grãos carbonáticos; e 2) ortoquímicos que podem ser matriz ou cimento.

3.1.1 Grãos carbonáticos

Os grãos carbonáticos podem ser subdivididos em não-esqueletais, esqueletais e clastos.

Os **grãos não-esqueletais** são formados por acreção físico-química, por ação microbiana, ou são derivados de material esqueletal de micro-organismos, invertebrados e talo de plantas calcárias. Os principais grãos não-esqueletais identificados são: oóides, pisóides, oncóides, micro-oncóides, pelóides e agregados.

Oóide é um grão com um envoltório carbonático e um núcleo que é variável em composição. Apresenta forma esférica a elipsoidal e seu envoltório se forma pela acresção físico-química, o que resulta na formação de envelopes concêntricos. O sedimento composto por oóides é denominado oolito. Os oóides possuem tamanho areia (até 2 mm). Quando o tamanho do grão ultrapassa 2 mm este passa então a ser denominado **pisóide**.

Oncóide é um grão que apresenta envoltório carbonático laminado irregular. Este envoltório é de origem organo-sedimentar, sendo formado por ação microbial. Nestes envelopes é comum a ocorrência de sedimentos trapeados. Os oncóides não necessitam de ambiente com energia muito elevada para serem formados, por isto não são tão bem arredondados e selecionados quanto os oolitos. Seu tamanho pode variar de areia a matacão. Quando o tamanho do grão é menor que 2 mm, este passa a ser denominado **micro-oncóide**.

O **pelóide** é um grão carbonático composto por calcita microcristalina (micrita), com tamanho variando de silte a areia. São arredondados a subarredondados, com forma esférica, elipsoidal e irregular. Os pelóides não apresentam estrutura interna.

Pelóides são poligenéticos, e geralmente não é possível identificar a sua origem exata. Muitos pelóides representam grãos micritizados, como fragmentos de conchas ou oóides. Fragmentos de algas calcárias e clastos de lama carbonática são possíveis geradores de pelóides. O termo *pellet* é também utilizado, porém com conotação para origem fecal.

Agregados de grãos são formados quando várias partículas carbonáticas são aglutinadas e cimentadas juntas. Seu tamanho varia de areia a grânulo e apresenta formas irregulares. Seus grãos constituintes geralmente possuem tamanho areia e são fortemente micritizados.

Alguns tipos de agregados de grãos:

Grapestones – são agregados de grãos esféricos (comumente oóides micritizados).

Lumps – são agregados de grãos com um contorno suave, os quais comumente possuem o interior oco.

Botryoidal lumps – são *grapestones* ou *lumps* com um delgado envelope oolítico.

Grãos esqueléticos carapaças ou esqueletos carbonáticos, sendo identificados pela composição e microestrutura características dos diversos organismos. Trata-se de uma importante ferramenta para a interpretação paleoambiental, nas rochas carbonáticas fanerozóicas, mas de pouca importância para rochas do Proterozóico.

Os **clastos** representam fragmentos de sedimentos carbonáticos pelo menos parcialmente litificados. Duas categorias são reconhecidas: intraclastos e litoclastos (extraclastos).

Intraclastos são fragmentos de sedimento fracamente litificado retrabalhado e depositado dentro da própria bacia onde foi formado. Exemplos comuns são brechas formadas por fragmentos de lama litificada produzidos por dissecação e cimentação (ou dolomitização) em zona de supramaré. Tais brechas são conhecidas como *flat-pebble conglomerate*.

Os **litoclastos** ou **extraclastos** são fragmentos de rochas não existentes nas imediações da área deposicional. Por exemplo, um fragmento de rocha carbonática de idade cretácica em carbonato de idade terciária é claramente um litoclasto.

3.1.2 Matriz carbonática

A matriz da maioria das rochas carbonáticas consiste em um material constituído por cristais muito finos de calcita denominados micrita (do inglês *micrite* – *microcrystalline calcite*). O tamanho dos cristais é geralmente menos de 4µm. O termo matriz é geralmente usado para descrever o componente da rocha com menos de 62µm de tamanho, o que geralmente se denomina lama carbonática nas descrições sedimentológicas.

A micrita é susceptível a alteração diagenética e pode ser substituída por mosaicos mais grossos de microesparita (5-15 µm) através de neomorfismo (Tucker 2001). Em rochas carbonáticas, a maioria das lamas carbonáticas eram originalmente compostas por aragonita e calcita alto-magnésiana, mas foram substituídas por calcita baixo-magnésiana durante a diagênese (Tucker & Wright, 1990).

Nos ambientes modernos a lama carbonática se acumula desde as planícies de maré e lagunas rasas até ambientes marinhos profundos. Existem muitas possíveis fontes de lama carbonática, sendo as principais:

- precipitado químico associado a altas temperaturas e salinidades, ou mudanças na pressão parcial de CO₂ (por exemplo, a formação de *whittings*).
- desintegração de algas verdes calcárias, especialmente codiáceas como *Halimeda* e *Penicillus*.
- bioerosão, aonde organismos como esponjas perfurantes e micróbios atacam grãos carbonáticos e o substrato.
- quebra mecânica de grãos carbonáticos pela ação de ondas e correntes.
- precipitação bioquímica através de fotossíntese microbial e decomposição.

3.1.3 Cimento carbonático

Cimento carbonático corresponde a precipitados de carbonato formados no espaço poroso do sedimento ou rocha. A cimentação carbonática pode ocorrer desde o ambiente deposicional até o soterramento profundo. Este assunto é tratado com mais detalhe no item 3.4.1.2.

3.1.4 Porosidade

A porosidade da rocha pode ser primária ou secundária. Porosidade primária é o espaço vazio gerado durante a deposição do sedimento. Porosidade secundária corresponde ao espaço vazio gerado por processos diagenéticos após a deposição dos sedimentos. Dentre as classificações de porosidade que foram propostas, a de Choquette & Pray (1970) é a mais aceita. A classificação combina termos que abrangem quatro categorias de observações: o tipo básico de porosidade, modificadores (relacionados a processos e estágio de evolução), o tempo de formação e tamanho do poro.

Tipo básico de porosidade:

Fábrica-seletiva – interpartícula, intrapartícula, intercristalina, móldica, fenestral, *shelter* e *growth framework*.

Fábrica-seletiva ou não – brecha, perfuração, escavação, *shrinkage*.

Não é Fábrica-seletiva – fratura, canal, vug e caverna.

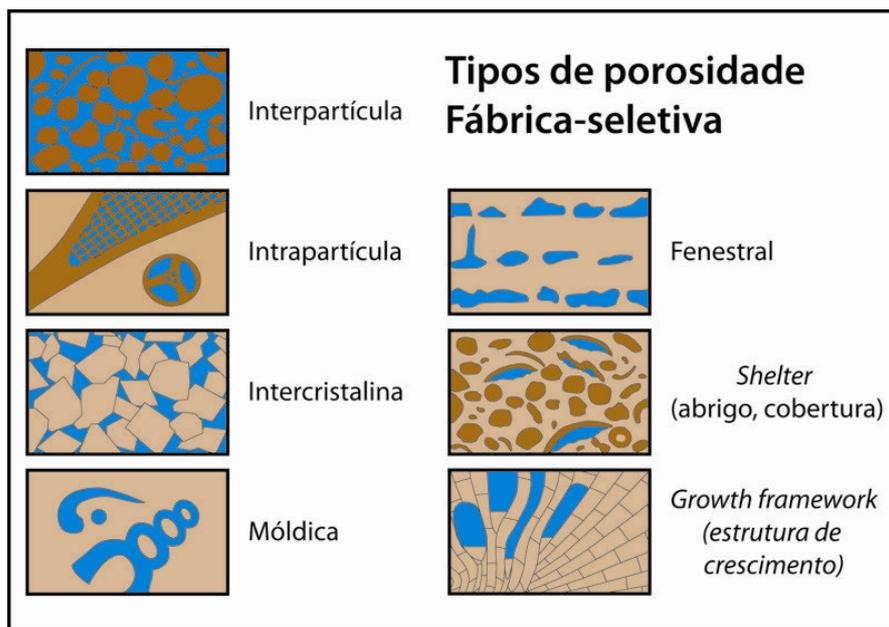


Figura nº3 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de porosidade do tipo fábrica-seletiva (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003).

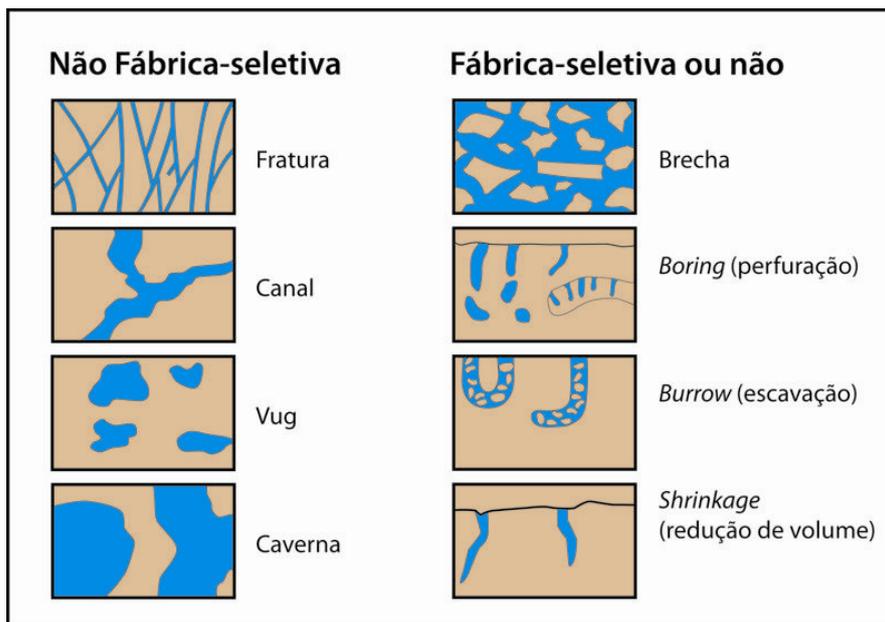


Figura nº4 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de porosidade do tipo fábrica-seletiva ou não fábrica-seletiva (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003).

Termos modificadores:

Processos: dissolução, cimentação, sedimentos internos.

Estágio: alargado, reduzido, preenchido.

Tempo de formação:

Primária: pré-deposicional e deposicional.

Secundária: eogenética, mesogenética, telogenética.

Tamanho:

Megaporo: grande (32 a 256 mm), pequeno (4 a 32 mm)

Mesoporo: grande (0,5 a 4 mm), pequeno (0,0625 a 0,5 mm)

Microporo: menor que 0,0625 mm.

3.1.5 Bioconstruções

Esteiras orgânicas formam-se na superfície dos sedimentos em muitos ambientes marinhos e não-marinhos, em baixas a médias latitudes, de ambientes de inframaré com profundidades moderadas a ambientes de supramaré, além de lagos de água doce a hipersalinos e pântanos. As cianobactérias, junto com outros organismos como diatomáceas, fungos e nematóides, têm um importante papel na formação de estromatólitos e esteiras microbiais (Tucker, 2001).

A cianobactéria é mucilaginosa e isto, juntamente com sua natureza filamentososa, resulta no trapeamento de partículas sedimentares e produzem sedimentos laminados. Além deste sistema de trapeamento (*trapping and binding*), existe também a precipitação de carbonatos diretamente dentro da esteira microbial, o que resulta na formação de sedimentos laminados. Estas estruturas carbonáticas são então denominadas genericamente de microbiolitos. Quando apresentam estrutura laminada e forma dômica ou colunar são denominados estromatolitos. Se apresentam apenas laminação e estrutura plano-paralela são denominadas esteiras ou laminitos microbiais.

Assim como os corais, os microbiolitos podem crescer de forma coalescente, formando também recifes ou biohermas. Estes podem se estender por dezenas e até centenas de quilômetros.

Estromatolitos ocorrem através do registro geológico, mas são particularmente importantes no Pré-cambriano, onde são abundantes e têm sido utilizados para correlações estratigráficas (Bertrand-Sarfati 1972, Hoffman 1976, Walter 1976 e outros)

3.2 Classificação das rochas carbonáticas

Três sistemas de classificação de rochas carbonáticas são atualmente utilizados, cada um com ênfase diferente.

1) Folk (1959, 1962) divide os carbonatos com base no **tamanho dos seus grãos** em calcirrudito (maioria dos grãos > 2mm), calcarenito (maioria dos grãos entre 2 mm e 62µm) e calcilutito (a maioria dos grãos < 62µm). No caso da ausência de grãos e a presença apenas de constituintes autigênicos, utiliza-se o nome calciesparito. Para os correspondentes termos dolomíticos substitui-se o prefixo calci por dolo: dolorrudito, dolarenito, dololutito e doloesparito.

2) Outro esquema de classificação de Folk (1959, 1962) é baseado principalmente na **composição dos grãos**, distinguindo três componentes: grãos, matriz (principalmente micrita) e cimento (geralmente esparita em drusa). Uma abreviação para os grãos é utilizada como prefixo para os termos esparito e micrito: *bio* – grãos esqueletais, *oo* – oóides, *pel* – pelóides, *intra* – intraclastos.

3) A classificação de Dunham (1962) divide os carbonatos com base na **textura** em: *grainstone* (rocha grão-suportada, sem matriz), *packstone* (rocha grão-suportada, com matriz), *wackestone* (grãos flutuando na matriz) e *mudstone* (micrita com poucos grãos).

No presente trabalho foi utilizada a classificação das rochas carbonática com base no tamanho dos grãos, sendo utilizado então os termos calcirrudito, calcarenito e calcilutito, bem como os seus correlatos de composição dolomítica, sendo eles dolorrudito, dolarenito e dololutito. Esta classificação foi adotada pois a intensa recristalização das rochas estudadas por vezes não permite definir quais são os grãos constituintes, ou se havia presença de matriz micrítica ou não.

3.3 Plataformas carbonáticas

O termo plataforma carbonática é utilizado para designar o ambiente de deposição litorâneo até o talude, favorável à formação e acumulação de sedimentos carbonáticos. O principal fator condicionante da instalação da plataforma carbonática é a ausência de deposição terrígena. Plataformas carbonáticas se desenvolvem em uma grande variedade de ambientes geotectônicos, mas particularmente ao longo de margens continentais passivas, em bacias intracratônicas, *rifts* abortados, bacias de *back-arc* e de *foreland*. Em 1973, Ahr W.M. distinguiu, com base na morfologia do substrato e distribuição de fácies, dois tipos principais de ambiente carbonático: o tipo plataforma (ou plataforma com barreira) e o tipo rampa. Outros autores (Wilson 1975, Reading 1986; Tucker & Wright 1990) também caracterizaram os diferentes tipos de plataformas, destacando também outras categorias: plataforma epirogênica, plataforma isolada e plataforma afogada. Cada tipo de plataforma apresenta um padrão particular de fácies e sucessão de fácies (Ginsburg 1957, Wilson 1975, Barthurst 1975, Moore, 1989).

A **plataforma com barreira** (*rimmed shelf*), cujo modelo de distribuição de fácies foi proposto por Wilson (1974, 1975) se estende desde o sub-ambiente de supra-maré, passando pela plataforma até as águas profundas. Recifes, biohermas e bancos de areia carbonática constituem barreiras que limitam a alta energia em direção ao mar aberto, enquanto protegem e restringem a circulação na laguna. Ao longo da linha de costa, dependendo do nível de energia e da maré, planícies de maré ou complexos de ilhas-barreira podem estar presentes. Detritos oriundos da margem da plataforma são jogados no talude adjacente e na bacia.

A **rampa carbonática** é uma superfície com inclinação suave, geralmente com alta energia na porção interna costeira passando para águas calmas e profundas de plataforma externa, afetada periodicamente por tempestades. Ao longo da linha de costa podem ocorrer complexos de praia-barreira-maré-delta, com lagunas e planícies de maré. As bioconstruções constituem *patch reefs* na

plataforma interna, enquanto as do tipo pináculo e *mud-mounds* estão em águas profundas, na plataforma externa.

A **plataforma epirogênica (*epeiric platform*)** é uma área cratônica muito extensa, relativamente plana, coberta por mar raso. Ao longo da margem pode ocorrer talude suave (tipo rampa) ou íngreme (tipo plataforma) em direção à bacia, mas a margem não é a feição mais importante. Dentro da própria plataforma podem ocorrer bacias de águas profundas cercadas por rampas e plataformas com bordas. Plataformas epirogênicas são dominadas por sedimentos de baixa energia, de inframaré rasa e intermaré. Tempestades e correntes de maré podem ser importantes.

Plataformas isoladas são cercadas por águas profundas e então são fortemente afetadas por ventos dominantes e direções de tempestades. Elas variam em tamanho de pouco quilômetros a poucas centenas de quilômetros. Estas plataformas são compostas por sedimento carbonático puro pois o único material terrígeno a atingi-las é a poeira trazida pelo vento. As margens destas plataformas podem ser do tipo rampa ou plataforma.

Plataformas afogadas são aquelas que sofreram elevação do nível do mar de forma relativamente rápida, então fácies de águas profundas são depositadas sobre fácies de águas rasas.

3.4 Alterações pós-deposicionais – diagênese e hidrotermalismo

As alterações das rochas carbonáticas, importantes na geração e obstrução de espaço poroso, compreendem processos diagenéticos e hidrotermais.

Diagênese consiste em qualquer mudança física ou química nos sedimentos ou rochas sedimentares após a deposição, excluindo processos envolvendo temperaturas e pressões muito altas, neste caso correspondendo a metamorfismo. A diagênese envolve diferentes processos e ocorre em ambientes marinhos e meteóricos próximos à superfície, até ambientes de soterramento profundo.

Hidrotermalismo é definido como alterações na rocha as quais ocorrem sob condições de soterramento, geradas pela passagem de fluidos com temperatura maior que a da rocha de formação. Neste caso então, os fluidos vem de fora do sistema, migrando principalmente através de falhas e fraturas, resultando em dolomitização e por vezes gerando depósitos de Zn-Pb, do tipo Mississippi-Valley (Sverjensky 1981).

3.4.1 Processos de alteração

Seis processos maiores podem ser identificados: micritização, cimentação, neomorfismo, dissolução, compactação, dolomitização e silicificação (Folk 1965, Scholle 1978, Barthurst 1975, Tucker 2001).

3.4.1.1 Micritização

É a conversão parcial ou completa de partículas sedimentares tamanho silte ou areia para carbonato de cálcio tamanho micrita, possivelmente devido a perfurações microscópicas por algas, bactérias e/ou fungos. Os grãos esqueletais sofrem perfurações, sendo que os furos são preenchidos por sedimento fino ou cimento. Este processo ocorre nas bordas dos grãos, mas se o processo é muito intenso pode gerar grãos totalmente micritizados (Scholle 1978, 2003, Tucker & Wright 1990).

3.4.1.2 Cimentação

A **cimentação** é um processo diagenético muito importante na transformação de sedimento carbonático em rocha, ocorrendo principalmente onde existe uma significativa passagem de fluidos saturados em fase cimentante (geralmente carbonato de cálcio). A mineralogia dos cimentos depende da química da água, particularmente da pressão de CO₂, da razão Mg/Ca e do *input* de carbonato.

Os cimentos precipitados em subsuperfície são em sua maioria cristais de calcita límpidos, de cristalinidade grossa. São observados cinco tipos de cimento:

- 1) **Calcita do tipo drusa (*drusy calcite* ou *mosaico*)** – é um cimento no qual há um aumento no tamanho dos cristais em direção ao centro do poro (Figura 5). Os cristais mostram uma orientação preferencial do eixo óptico perpendicularmente ao substrato. Outra feição do cimento de calcita do tipo drusa é a presença de zonas de crescimento. Estas podem ser observadas através de técnicas de tingimento ou através de catodoluminescência. Geralmente os cristais de calcita mostram luminescência baixa, mas frequentemente ocorrem zonas mais luminescentes, possivelmente devido à evolução do fluido dos poros durante o soterramento (Tucker & Wright 1990).

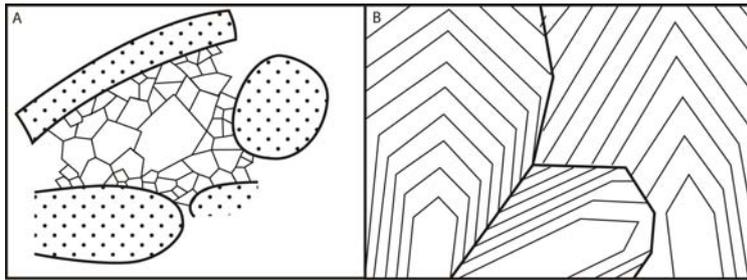


Figura nº5 A – calcita do tipo drusa ou mosaico. B – detalhe do limite plano entre os cristais e taxas de crescimento similares no cimento calcítico do tipo drusa ou mosaico (Tucker & Wright 1990).

2) **Calcita poiquilotópica** – consiste em cristais largos que englobam vários grãos constituintes da rocha. Resultam provavelmente de uma razão de nucleação muito baixa e crescimento do cristal de forma muito lenta.

3) **Calcita equante (mosaico equicristalino)** – não é um cimento comum. Esta textura ocorrer em função da direção do corte da lâmina. Alternativamente, pode ser a textura produzida pelo neomorfismo de cimento pré-existente.

4) **Calcita sintaxial** – Os cristais de calcita crescem com a mesma orientação do eixo óptico do núcleo, o qual pode ser fragmento bioclástico (equinodermos, por exemplo). Os cristais podem ser bastante grandes, por vezes englobando outros grãos.

5) **Calcita prismática** – consiste em cristais grossos, alongados, os quais delineiam cavidades ou ocorrem sobre cimento marinho fibroso e bioclastos. Este cimento ocorre provavelmente em fase inicial de soterramento (Choquette & James 1987).

6) **Calcita blocosa** – são cristais grossos, não alongados, os quais aparecem como cimento em cavidades. Geralmente ocorrem como cimento tardio, na mesodiagênese.

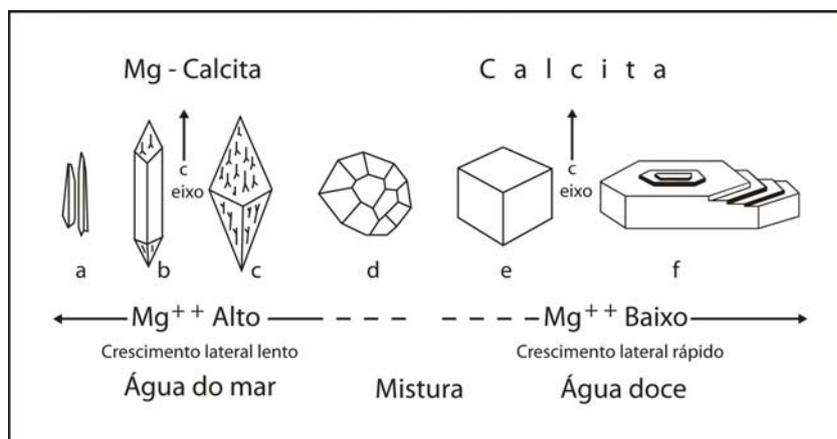


Figura nº6 Hábito de crescimento dos cristais de calcita em função da razão Mg/Ca (Folk 1974).

Cimentação por **aragonita** é bastante comum no ambiente marinho atual. São cristais aciculares, os quais geralmente crescem na forma de franja isópaca ao redor dos grãos, ou na forma botrioidal ou arranjo de cristais aciculares em rede .

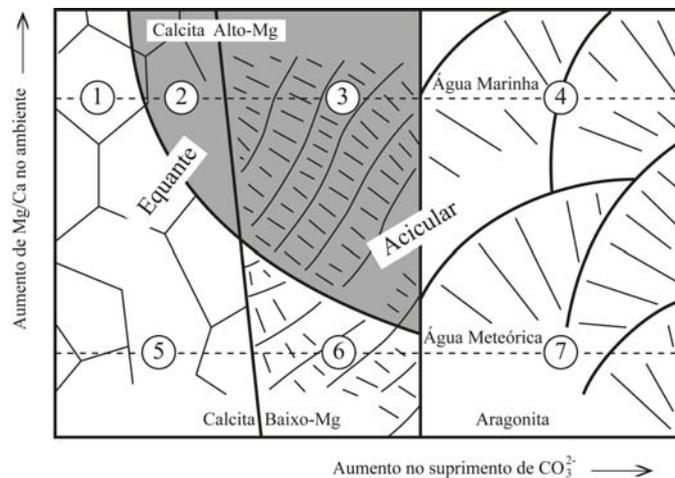


Figura nº7 Desenho esquemático mostrando a relação entre a razão Mg/Ca no fluido, a razão de suprimento de íons de carbonato, a morfologia dos cristais (equante e acicular) e a mineralogia dos precipitados inorgânicos (calcita baixo-Mg, calcita alto-Mg e aragonita). 1) cimento de calcita equante em águas profundas e frias, sedimentos de baixa latitude e sedimentos de águas rasas em condições climáticas temperadas. 2) cimento de calcita alto-Mg em recifes - raro. 3) cimento acicular de calcita alto-Mg em recifes e areias carbonáticas. 4) Cimento aragonítico acicular em recifes e areias carbonáticas. 5) cimento equante de calcita baixo-Mg em ambiente meteórico. 6) calcita baixo-Mg acicular em espeleotemas e travertinos. 7) Aragonita acicular em espeleotemas – raro. (Tucker 2001).

3.4.1.3 Compactação

Compactação ocorre durante o soterramento, resultando em um fechamento do empacotamento dos grãos, no seu fraturamento (compactação mecânica), e eventual dissolução nas superfícies de contato (compactação química). A compactação química também resulta na formação de estilolitos e filmes de dissolução (Bathurst 1984, Scholle and Halley 1985, Choquette and James 1987). O plano do estilolito se forma perpendicularmente à direção de maior tensão compressiva. É comumente formado pela ação da carga de soterramento, desenvolvendo-se paralela ou subparalelamente ao acamamento, ou por esforços tectônicos, e neste caso a direção do seu plano depende das tensões aplicadas.

O aumento da pressão de soterramento resulta na compactação dos sedimentos e sendo que dois processos principais são observados: compactação mecânica (ou física) e compactação química.

A **compactação mecânica** em sedimentos mais grossos resulta num empacotamento de grãos mais apertado e na rotação de bioclastos alongados na direção do plano de acamamento. Com o

aumento da pressão pode ocorrer fraturamento de grãos, cimentos eodiagenéticos e *coatings* de oolitos podem se destacar dos grãos e grãos micríticos sofrem deformação. Lamas carbonáticas sofrem mais compactação durante o soterramento raso, quando o sedimento perde água. Dependendo do conteúdo de argila o efeito da compactação pode variar. Deformação de perfurações e fraturamento de conchas podem ocorrer. A compactação mecânica pode transformar um *wackestone* bioclástico em *packstone* bioclástico, como resultado do maior empacotamento dos grãos.

A **compactação química** é resultado da crescente solubilidade no contato entre grãos e ao longo de interfaces no sedimento sob um *stress* aplicado (Tucker 2001, Moore 1989). A maioria da compactação química ocorre devido ao soterramento, mas stress tectônico também dá origem a feições de dissolução-sob-pressão. Duas texturas mais comuns resultam da compactação química: estilolitos e filmes de dissolução.

Os **filmes de dissolução** são filmes ondulados de resíduos insolúveis, para os quais faltam as distintas suturas dos estilolitos. Geralmente eles ocorrem entre os grãos, e não cortando eles, apresentando forma anastomosada. Eles são mais comuns em carbonatos argilosos. Em alguns casos cristais de dolomita se formam ao longo de filmes de dissolução.

Estilolitos são feições proeminentes em muitos carbonatos e correspondem a uma interface serrilhada entre duas massas de rocha, com uma aparência suturada em seção transversal. Em geral a amplitude da sutura é maior do que o diâmetro dos grãos. Eles cortam grãos, matriz e cimento indiscriminadamente.

Ambiente diagenético de soterramento

Feições típicas de dissolução por pressão

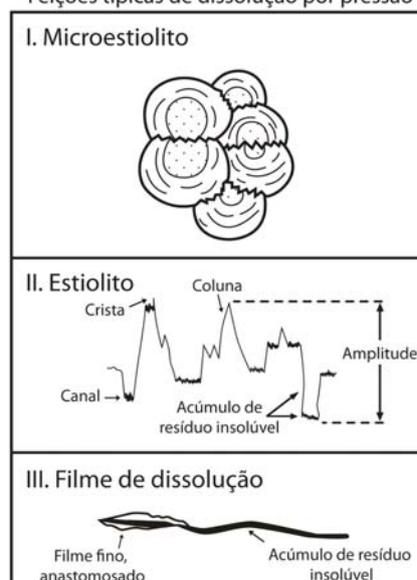


Figura nº8 Tipos e características de feições de dissolução por pressão formadas em subsuperfície (modificado de Koeprick 1984).

3.4.1.4 Neomorfismo

O neomorfismo é utilizado para descrever processos que envolvem mudança na mineralogia e/ou textura do sedimento. Ele inclui todas as mudanças na textura de um mineral na sua transformação para um polimorfo. Por exemplo, a substituição de conchas aragoníticas por cimentos de calcita. Cristais gerados por neomorfismo podem ser reconhecidos por: 1) o contato entre os cristais é irregular ou curvo, comumente com embainhamentos; 2) distribuição do tamanho de cristais de forma bem irregular, com a formação de manchas com o desenvolvimento de mosaico grosso; 3) presença de grãos esqueléticos flutuando em esparita (Tucker 2001).

3.4.1.5 Dissolução

Em geral as rochas carbonáticas diminuem sua porosidade com o soterramento, resultado da compactação e cimentação. Porém porosidade pode ser criada em profundidade através de processos de dissolução, além de fraturamento.

Dissolução ocorre como resultado da passagem de fluidos subsaturados na fase carbonática. Este é um processo importante que ocorre próximo à superfície, em ambientes diagenéticos meteóricos, e podem resultar na formação de um sistema cárstico.

A dissolução de CaCO_3 em profundidade é geralmente atribuído ao desenvolvimento de fluidos de poros com altos valores de pressão de CO_2 formados durante a descarboxilação térmica da matéria orgânica. Águas de formação fortemente ácidas podem também ser produzidas por sulfato redução. Estes fluidos corrosivos se formam principalmente durante a compactação e a maturação termal de folhelhos ricos em matéria orgânica. Fluidos hidrotermais podem também causar dissolução de carbonatos e mineralizações de Zn e Pb comumente ocorrem em *vugs* e cavidades formadas neste processo. A dissolução de evaporitos de sulfato podem resultar em fluidos ricos em Ca^{2+} capazes de dissolver dolomita e/ou promover desdolomitização (Tucker & Wright 1990).

3.4.1.6 Silicificação

Silicificação, assim como a dolomitização, pode ocorrer tanto na eodiagênese quanto na diagênese tardia. Pode ser observada na forma de substituição de grãos e fósseis ou como nódulos e camadas de chert. Sílica também aparece como cimento em alguns carbonatos. Os principais tipos

de sílica em carbonatos são: (1) cristais euédricos de quartzo; (2) microquartzo; (3) megaquartzo; (4) calcedônia.

3.4.1.7 Dolomitização

O mineral dolomita, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, possui uma estrutura cristalina complicada e uma distribuição desigual ao longo do tempo geológico.

A dolomita possui sistema cristalino altamente ordenado e que requer tempo para precipitar. Cristais de dolomita nunca foram sintetizados em condições normais de temperatura e utilizando-se água naturais, a não ser com a interação de cianobactérias.

Ao longo do tempo houve muita discussão sobre dolomitas primárias *versus* dolomitas de substituição. Atualmente sabe-se que dolomitas primárias são muito raras, e estão restritas a ambientes evaporativos (principalmente lagunas, lagos e planícies de maré), pois devido a fatores cinéticos a dolomita não precipita em condições normais de temperatura e pressão a menos que a razão Mg/Ca aumente. Em alguns casos a precipitação de dolomita está relacionada à ação microbial. No entanto, cimentos de dolomita são comuns e precipitam diretamente dos fluidos dos poros durante a diagênese.

Diversos modelos foram propostos para explicar os processos de dolomitização, sendo que os principais são: evaporativo, infiltração por refluxo, zona de mistura, soterramento e água marinha.

Modelo evaporativo – ambientes de sabka, supramaré e lagunas hipersalinas. A razão Mg/Ca dos fluidos dos poros aumenta pela precipitação de aragonita e gipsita-anidrita, e isto promove a formação de dolomita. A presença de SO_4^{2-} também ajuda.

Modelo de infiltração por refluxo - ambientes de inframaré raso e recifes. Fluidos com alta razão Mg/Ca são gerados em lagunas e sob planícies de maré e sabkas por evaporação e estes descem devido ao contraste de densidade com a água do mar, resultando em uma zona de dolomitização.

Modelo de zona de mistura (tipo Coorong) – ambientes próximos à superfície, aonde há mistura de água meteórica e águas salinas. Neste caso se argumenta que a precipitação de dolomita é mais provável de ocorrer a partir de soluções diluídas (aonde existiriam menos íons interferindo) e a uma lenta taxa de cristalização. Existem cálculos que mostram que a mistura de água meteórica com mais de 30% de água do mar resultaria em fluido insaturado com relação a calcita e saturado em dolomita (Tucker 2001).

Modelo de soterramento – ambientes de margem de plataforma. Fluidos ricos em Mg^{2+} expelidos de pelitos bacinais atuam como fluidos dolomitizantes.

Modelo de águas marinhas (convecção de Kohout) - ambientes de margem de plataforma. Neste modelo águas marinhas mais frias são bombeadas dentro do sedimento pela ação de correntes e marés, e devido ao gradiente geotérmico abaixo das plataformas carbonáticas esta água é aquecida e um sistema de convecção de larga escala é formado. Mudanças diagenéticas, incluindo dolomitização, ocorrem então através deste processo.

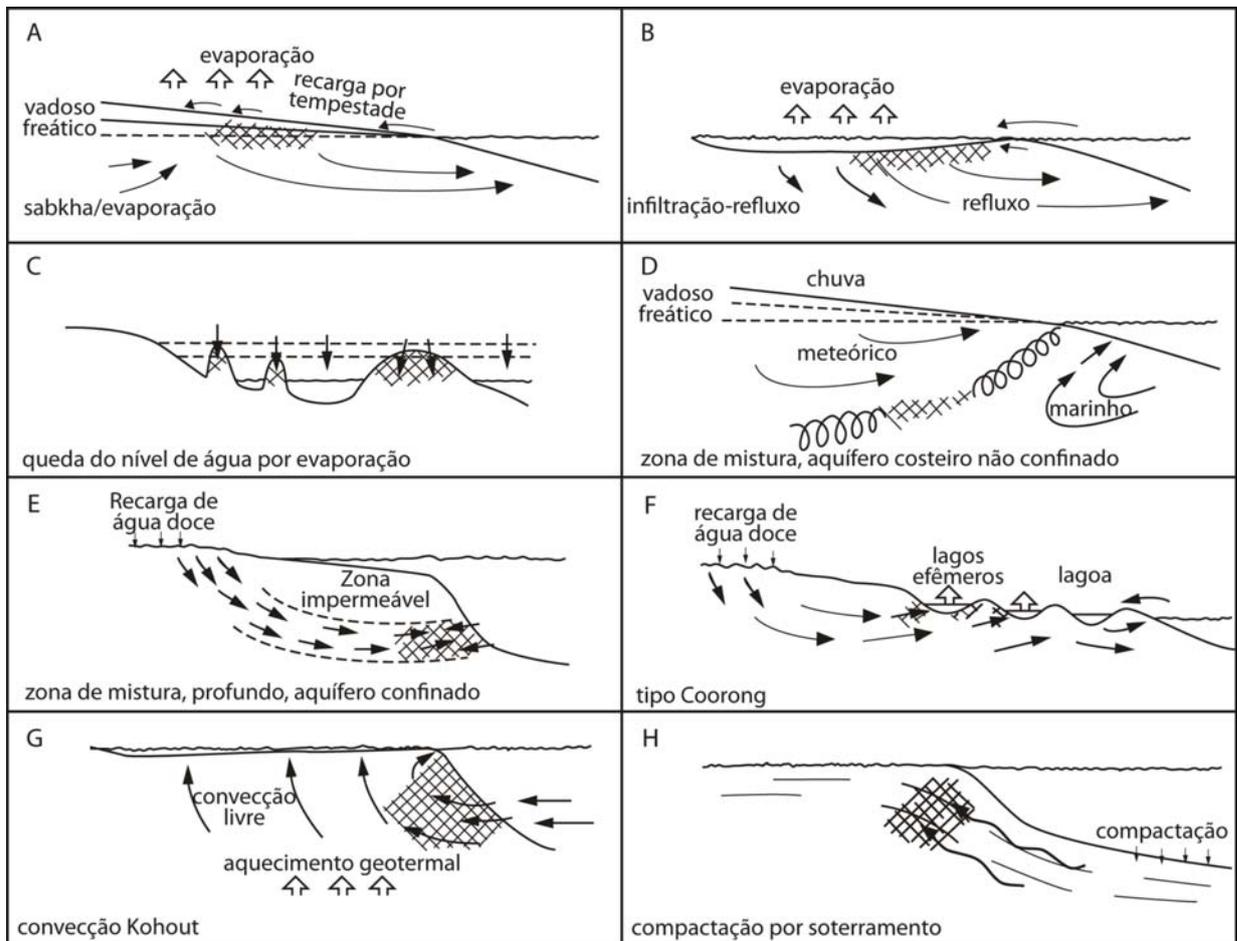


Figura nº9 Modelos de dolomitização ilustrando a variedade de mecanismos de movimentação de fluidos dolomitizantes através dos sedimentos (definidos por diferentes autores e compilados por Tucker & Wright 1990).

Os cristais de dolomita são descritos com base principalmente na sua forma e tamanho. Quanto à forma a dolomita pode ser classificada como **não-planar** (mosaico **xenotópico**), **planar euhédrico** (mosaico **idiotópico**) e **planar subhédrico** (mosaico **hipidiotópico**).

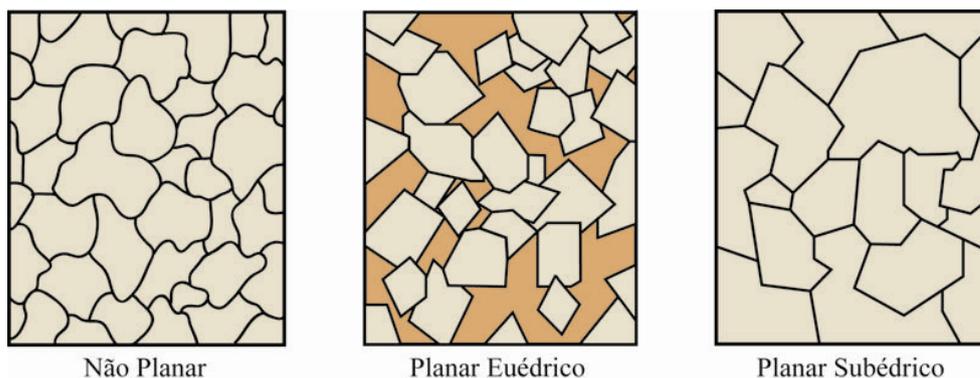


Figura nº10 Desenho esquemático mostrando a classificação dos cristais de dolomita quanto a sua forma (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003).

Quanto ao tamanho dos cristais existem algumas tabelas de classificação, as quais são utilizadas tanto para calcita quanto para dolomita. Neste trabalho foi adotada a classificação de Folk (1980).

Tabela nº1 Classificação de cristalinidade segundo Folk (1980).

Cripcristalina	Menor que 0,001 mm
Afanocristalina	0,001 – 0,0039 mm
Cristalinidade muito fina	0,0039 – 0,0156 mm
Cristalinidade fina	0,0156 – 0,0625 mm
Cristalinidade média	0,0625 – 0,25 mm
Cristalinidade grossa	0,25 – 1 mm
Cristalinidade muito grossa	1 – 4 mm
Cristalinidade extremamente grossa	Acima de 4 mm

3.4.1.8 Dolomita-em-sela e dolomita barroca

A dolomita-em-sela apresenta extinção ondulante e as bordas do cristal são curvas, isto devido a uma distorção na sua estrutura cristalina. Cristais de dolomita maiores que 1 mm são geralmente compostos por subcristais, o que dá ao cristal uma superfície serrilhada.

Já a dolomita barroca difere da dolomita-em-sela por apresentar forma anédrica, e em geral cimentar completamente a porosidade, enquanto a dolomita-em-sela pode forrar as paredes das cavidades.

A dolomita-em-sela pode ocorrer tanto como cimento quanto substituição de grãos carbonáticos, bem como em veios e fraturas, estando comumente associada a mineralizações de sulfeto epigenéticas. A dolomita-em-sela também ocorre associada com hidrocarbonetos e este fato tem sido utilizado para sugerir que ela se forma dentro da janela de óleo, a temperaturas de 60-

150°C. Processos de sulfato-redução na presença de matéria orgânica pode ocorrer a estas temperaturas e então induzir a precipitação de dolomita devido a diminuição do conteúdo de SO_4^{2-} e o aumento da alcalinidade (Tucker & Wright 1990).

3.4.2 Diagênese em ambiente marinho-raso

Em ambientes marinho-rasos, em baixas latitudes, a diagênese envolve a precipitação de cimentos e a alteração de grãos por micritização microbial e perfuração por outros organismos. A cimentação ocorre principalmente em áreas onde há alta energia, como ao longo da linha de costa e nas margens de plataformas, onde a água do mar é bombeada através dos sedimentos. Também ocorre em áreas de alta evaporação, como planícies de maré e praias (Tucker & Wright, 1990).

No ambiente marinho raso pode-se diferenciar três áreas com distintos processos diagenéticos:

- 1) **Marinho freático ativo** – região onde a água dos poros está sendo constantemente reabastecida e a cimentação é um processo comum (ex: recifes e bancos de areia);
- 2) **Marinho freático estagnado** – região aonde há pouco movimento de sedimentos e de fluidos de poros, havendo intenso processo de micritização microbial e pouca cimentação (ex: lagunas);
- 3) **Marinho vadoso** – região aonde a cimentação ocorre principalmente por processo de evaporação da água do mar e também pode ocorrer efeitos de ação microbial (ex: praias, planícies de maré).

Os cimentos precipitados em ambiente marinho são fases metaestáveis, como aragonita e calcita alto-magnésiana. Os cimentos de calcita alto-magnésiana são geralmente os que prevalecem em ambientes relacionados com recifes, enquanto cimentos de aragonita são mais comuns em ambientes de intermaré (formando *beach rocks*) e de *hardground*. Calcita alto-magnésiana pode precipitar como cristais microcristalinos (micrita), particularmente em ambientes recifais. Este material não pode ser estritamente classificado como cimento pois ele não necessariamente liga ou mantém unidos os componentes da rocha (Moore 1989).

Por serem fases metaestáveis, torna-se difícil o reconhecimento destes cimentos nas rochas carbonáticas mais antigas, pois estas fases minerais se estabilizam como calcita e dolomita através de processos de dissolução e reprecipitação. O cimento de aragonita mostra de forma mais significativa a perda textural em comparação com o cimento de calcita alto-magnésiana durante a estabilização.

Cimentos marinhos em rochas carbonáticas podem ser reconhecidos por feições gerais tais como (Tucker 2001):

- São a primeira geração de cimento;
- Geralmente formam franjas isópacas ao redor de grãos e paredes de cavidades;
- Normalmente são ou foram fibrosos;
- Podem ser cortados por perfurações ou englobar fragmentos esqueléticos;
- Eles podem estar associados com sedimentos presentes nas cavidades;
- Cristais são normalmente não-ferrosos e não-luminescentes

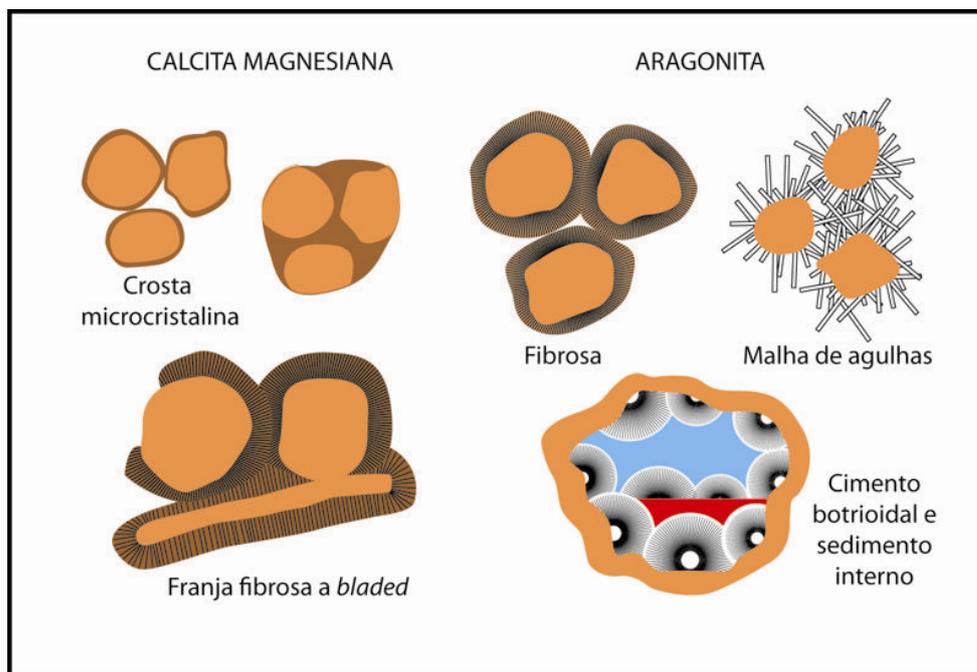


Figura nº11 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de cimentação marinha (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003).

3.4.3 Diagênese em ambiente meteórico

A diagênese meteórica envolve principalmente água doce, e os principais processos que ocorrem são dissolução, cimentação e formação de solos. A posição do lençol freático é importante e controla o limite entre a zona vadosa acima e zona freática que está abaixo.

Na **zona vadosa** os poros periodicamente contém água, ar ou ambos, e a zona superior de infiltração se diferencia da zona inferior de percolação. A água da chuva é insaturada com relação a CaCO_3 e contém também CO_2 atmosférico (e outros gases “ácidos”). Ao se infiltrar, adquire também CO_2 derivado do solo, além de ácidos orgânicos, fazendo com que a dissolução seja o processo principal operando nesta zona. À medida que a água se move para baixo em direção à zona

vadosa, torna-se supersaturada com relação a CaCO_3 , então ocorre a precipitação, normalmente de calcita baixo-magnésiana, pois a água meteórica possui a razão Mg/Ca muito baixa (Tucker 2001, Tucker & Wright 1990). Os cristais de calcita baixo-magnésiana precipitam na superfície dos grãos na forma de franjas assimétricas, mais espessas na parte inferior dos grãos (efeito de gota) ou localizado no contato entre os grãos (efeito de menisco).

Na **zona freática** os poros estão sempre preenchidos por água, e a água normalmente doce dá lugar a águas mais salinas à medida que aumenta a profundidade. Em regiões costeiras, o domínio da zona freática meteórica passa para a zona de mistura com a água do mar (*mixing zone*). Esta é uma zona importante para dolomitização e dissolução (Tucker and Wright 1990). Como um primeiro estágio de cimentação, ocorre precipitação de calcita baixo-magnésiana (cristais romboédricos de calcita ou calcita “dente-de-cão”) na forma de franja isópaca de cimento ao redor dos grãos.

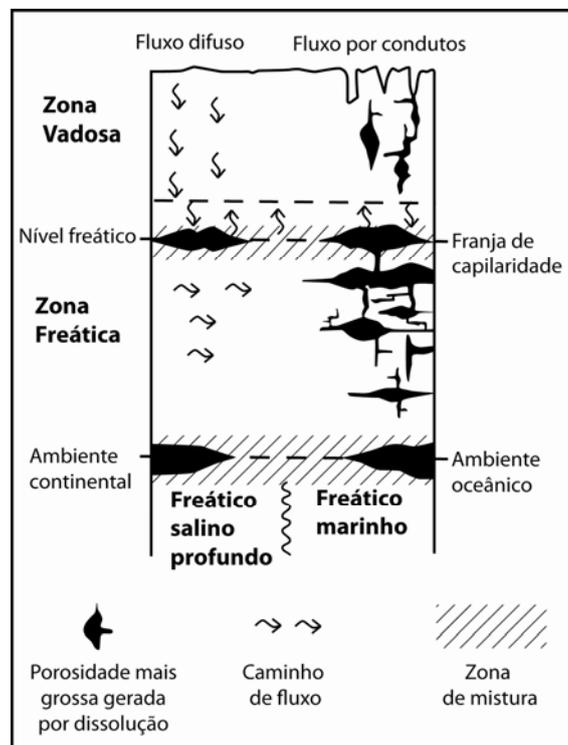


Figura nº12 Zonas de água subterrânea. O fluxo pode ocorrer através dos poros (fluxo difuso) ou fraturas (fluxo por condutos). Dissolução pode ocorrer na zona de mistura, na zona freática de capilaridade e especialmente na porção inferior da zona freática. Escalas são altamente variáveis (Tucker & Wright 1990).

Após este primeiro estágio de cimentação (que pode ser na zona vadosa ou na zona freática), ocorre a perda de Mg da calcita alto-magnésiana, resultando em sedimento composto por calcita baixo-magnésiana e aragonita. Como estágio seguinte ocorre dissolução da aragonita e reprecipitação de CaCO_3 na forma de calcita espática. O último estágio da diagênese meteórica

envolveria precipitação adicional de calcita baixo-magnésiana que preencheria a porosidade remanescente (Tucker 2001, Moore 1989).

O clima é o fator de maior influência na diagênese meteórica porque ele controla a quantidade de água meteórica e também afeta a temperatura, o grau de cobertura vegetal e desenvolvimento de solos. O clima também determina o tipo e a extensão da dissolução cárstica (Tucker 2001).

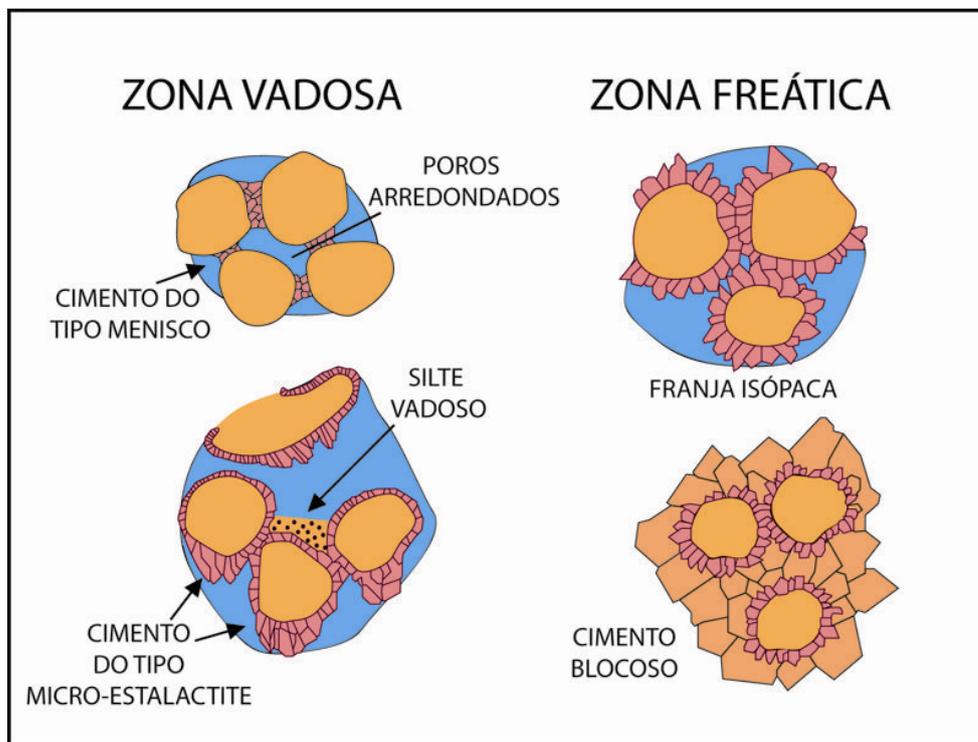


Figura nº13 Desenho esquemático ilustrando diferentes tipos de cimentação meteórica (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003).

3.4.4 Diagênese em ambiente de subsuperfície

Dos ambientes diagenéticos carbonáticos mais importantes, o de subsuperfície é o menos compreendido, embora a maioria das rochas antigas tenham sido a ele submetidas, muitas delas por centenas de milhões de anos. Processos como cimentação, compactação e dissolução sob pressão, operam em um considerável intervalo de profundidade, pressão e temperatura e os fluidos dos poros apresentam variação de salinidade, química e origem (Tucker & Wright 1990).

As águas de subsuperfície são geralmente salmouras, cuja salinidade aumenta com a profundidade, podendo alcançar várias centenas de partes por mil. Também com o soterramento, sedimentos e fluidos estão sujeitos ao aumento de temperatura e pressão, fazendo com que algumas reações químicas ocorram mais rapidamente, como o caso da precipitação de dolomita.

A pressão dos fluidos dos poros aumenta com a profundidade devido ao aumento da massa sobrejacente. O desenvolvimento de altas pressões de fluidos de poro é importante na diagênese de subsuperfície pois este pode prevenir ou retardar a compactação mecânica e química, além da cimentação. Altas pressões também podem resultar em fraturamento. A formação de CO_2 , CH_4 e outros gases naturais oriundos a maturação a matéria orgânica também contribuem para o aumento na pressão de poros (Tucker & Wright 1990).

A razão de fluxo dos fluidos de poro em subsuperfície é bem menor se comparado com a razão de fluxo que ocorre em ambientes próximos à superfície. Isto indica que a razão de precipitação de cimento, dependendo da razão de fluxo de fluido, será bem menor no ambiente de subsuperfície, aonde os fluidos de poros são geralmente também supersaturados com relação a CaCO_3 . Fluidos de poros subsaturados também ocorrem aonde existe muita degradação de matéria orgânica e a pressão do CO_2 é alta. Neste caso ocorre processo de dissolução.

4 BACIA DO SÃO FRANCISCO

A Bacia do São Francisco, de idade proterozóica, recobre o cráton homônimo, estendendo-se pelos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás.

O Cráton do São Francisco é circundado por cinturões orogênicos neoproterozóicos (Ciclo Brasileiro), a saber: Cinturão Araçuaí (a leste), Faixa Brasília (a oeste e sul), Faixa Rio Preto (a noroeste) e as Faixas Riacho do Pontal e Sergipana (a norte) - Figura 14. Os limites entre o cráton e os cinturões que o circundam mostram, na maioria dos casos, uma mudança de estilos tectônicos, cujos gradientes de deformação e metamorfismo aumentam do centro para as bordas do cráton.

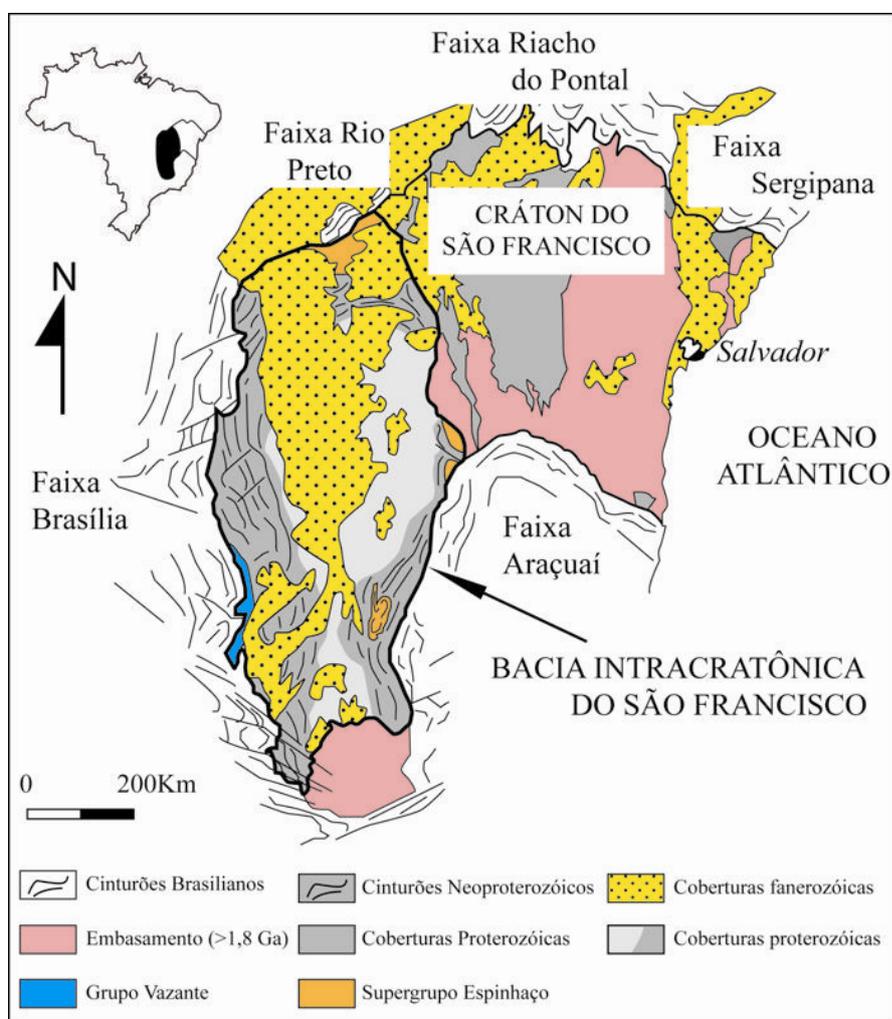


Figura nº14 Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco, mostrando a localização geográfica e delimitação da bacia (modificado de Alkmim & Martins-Neto 2001).

Almeida (1977) considera como base da Bacia do São Francisco o Supergrupo Espinhaço de idade paleo a mesoproterozóica, que é sobreposto pelo Supergrupo São Francisco

(Neoproterozóico), Grupo Santa Fé (Permo-carbonífero) e a Bacia São-Franciscana, composta pelos grupos Areado, Mata da Corda e Urucua (Cretáceo).

A maior extensão aflorante do Supergrupo São Francisco é constituída pelos depósitos carbonáticos e siliciclásticos do Grupo Bambuí, limitado a sudoeste pelo Grupo Vazante e a oeste pela Faixa de Dobramentos Brasília – FDB. Estas unidades sedimentares, portadoras de importantes depósitos de zinco e chumbo, têm sido recentemente palco de investigações de subsuperfície em função da ocorrência de indícios de hidrocarbonetos em superfície e poços perfurados para água nos estados de Goiás e Minas Gerais. Para investigação destes indícios, a Petrobras selecionou três áreas para a perfuração de poços pioneiros, sendo duas em Minas Gerais (Montalvânia e Remanso do Fogo) e uma em Goiás (Rio Corrente). Estes poços foram perfurados entre agosto de 1988 e março de 1989, constatando indício de gás nos três poços, e produção sub-comercial nos dois de Minas Gerais.

4.1 Grupo Bambuí

Estudos realizados desde a década de sessenta (Barbosa *et.al.*, 1969) já indicavam que o Grupo Bambuí se encontra num contexto de bacia do tipo *foreland*. Esta hipótese tem sido reforçada através de estudos recentes (Guimarães 1993, 1997; Castro 1997; Castro & Dardenne 2000, Alkimin & Martins-Neto 2001), que indicam deposição em bacia *foreland* gerada por cavalgamentos e sobrecarga tectônica durante a orogênese brasileira. Desta resultou a Faixa Brasília ao longo da margem oeste do Cráton do São Francisco, em resposta a colisões arco-continente e continente-continente, ocorridas no período entre 800 Ma e 600 Ma (Pimentel *et al.* 2000).

Segundo Dardenne (1981, 2000) o preenchimento da Bacia Bambuí é caracterizado por três sequências transgressivo-regressivas em *shallowing-upward*, cada qual mostrando pelitos e calcilutitos marinho-profundos na base, sobre os quais progradam depósitos marinho-rasos influenciados por tempestades, portadores de estromatolitos, representados por calcilutitos, calcarenitos, siltitos e arenitos. O primeiro megaciclo inicia-se com depósitos de argilitos, margas e ritmitos (pelito-carbonáticos), ricos em matéria orgânica (Formação Sete Lagoas). Seu topo é constituído em toda a bacia por calcarenitos e calcissiltitos de água rasa, contendo estromatolitos, além de feições de dissolução, estruturas *birdeyes*, *tepees* e gretas de contração indicando exposição subaérea.

O segundo megaciclo inicia-se com folhelhos da Formação Serra de Santa Helena, os quais mostram, em direção ao topo, uma tendência de aumento progressivo da energia, representado por arenitos finos retrabalhados por ondas de tempestade. Calcarenitos oolíticos e oncolíticos de águas rasas intensamente retrabalhados por ondas da Formação Lagoa do Jacaré completam o segundo megaciclo.

O terceiro megaciclo inicia-se com os pelitos da Formação Serra da Saudade, terminando com os depósitos da Formação Três Marias. Ao contrário dos megaciclos anteriores, o sistema de topo desta unidade não contém calcários, sendo constituída por psamitos sub-quartzosos (Guimarães 1993, Dardenne 1981, 2000).

As Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade constituem o Subgrupo Paraopeba, e sobre ele está a Fm. Três Marias. Estas formações correspondem ao Grupo Bambuí.

Os estromatolito presentes nos carbonatos do Grupo Bambuí foram identificados como do tipo *Gimnosolen*, sendo desta forma diferenciados dos estromatolitos presentes nos carbonatos do Grupo Paranoá (estratigraficamente abaixo), que são do tipo *Conophyton* (Dardenne 1979, Guimarães e Dardenne 1994 *apud* Guimarães 1997).

Como exemplo das fácies presentes nas formações do Gr. Bambuí, segue abaixo a litoestratigrafia na região de Belo Horizonte, MG (Dardenne 1981).

Tabela nº2 Litoestratigrafia na região de Belo Horizonte por Dardenne 1981 (contribuições de Branco e Costa 1961, Oliveira 1967, Scholl 1972, 1973, Alvarenga e Dardenne 1978).

Formação Três Marias	Arenitos arcóseos e siltitos
Formação Serra da Saudade	Siltitos, argilitos e folhelhos. Localmente ocorrem lentes de calcário e fosforitos.
Formação Lagoa do Jacaré	Siltitos e margas intercaladas com calcários pretos (fétidos, ricos em M.O.), com bancos oolíticos e psolíticos com estratificações cruzadas acanaladas.
Fm. Serra de Santa Helena	Folhelhos, siltitos, finas intercalações de lentes de arenitos e calcários.
Fm. Sete Lagoas	Sequência margosa e pelítica, com lentes de calcários e dolomitos de todas as dimensões

Dardenne (1981) mostrou em seus estudos que a bacia Bambuí se desenvolveu sobre uma crosta continental mais estável, sendo que as variações de espessura podem ser explicadas por reativação de falhas e/ou paleorelevo. Na hipótese de uma correlação do Grupo Vazante com o Grupo Bambuí, o autor argumenta que as grandes espessuras das fácies dolomíticas registradas na região de Vazante-Paracatú parecem indicar uma faixa costeira mais instável e com maior taxa de subsidência. Propõe assim a individualização do Gr. Vazante em relação às unidades clássicas do Grupo Bambuí.

5 CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA DAS ROCHAS CARBONÁTICAS AMOSTRADAS NO POÇO 1-RC-1-GO DAS FORMAÇÕES SETE LAGOAS E LAGOA DO JACARÉ (GRUPO BAMBUÍ), REGIÃO DE ALVORADA DO NORTE, GOIÁS

Na região de Alvorada do Norte (GO) sobressaem as unidades de topo do Grupo Bambuí – formações Serra da Saudade e Três Marias – estando exposta também a Formação Lagoa do Jacaré.

Em Goiás, a Formação Sete Lagoas, base do Grupo Bambuí, sobrepõe a Formação Jequitaiá, ou o Grupo Paranoá, ou ainda o embasamento granito-gnáissico, mas não está exposta em Alvorada do Norte.

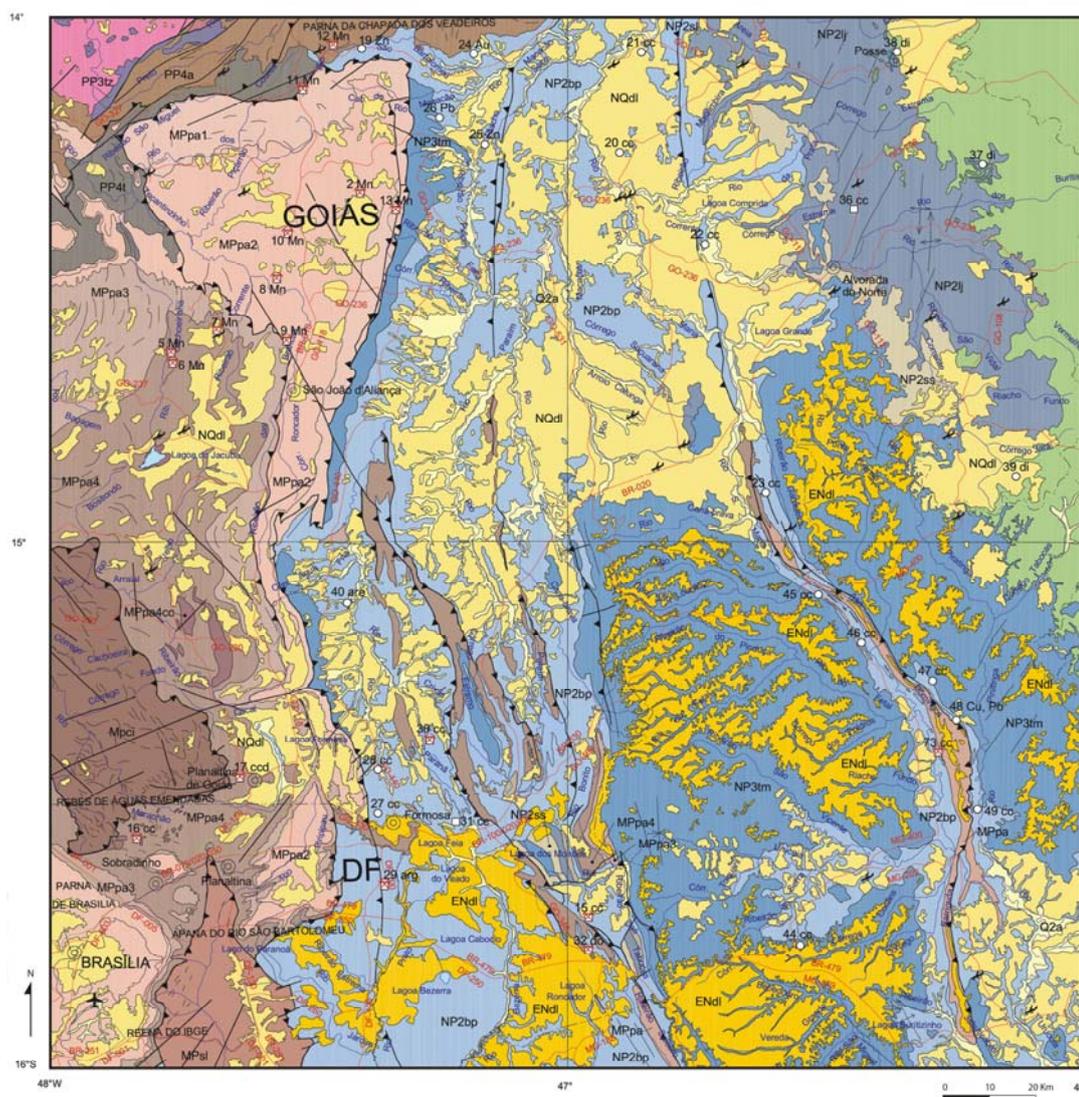


Figura nº15 Mapa geológico das regiões de Alvorada do Norte (quadrante nordeste) e Bezerra-Cabeceiras (quadrante sudoeste). Em tons de azul estão as rochas do Grupo Bambuí. Carta geológica do Brasil ao milionésimo, CPRM.

Na região de Bezerra-Cabeceiras afloram as unidades do Grupo Bambuí, bem como a Fm. Jequitai e o Grupo Paranoá, os quais situam-se estratigraficamente abaixo. Devido à sua proximidade com a área de Alvorada do Norte e por ser uma área aonde foram realizados estudos litoestratigráficos detalhados (Guimarães 1993), Bezerra-Cabeceiras torna-se uma importante área de correlação (Figura 16)

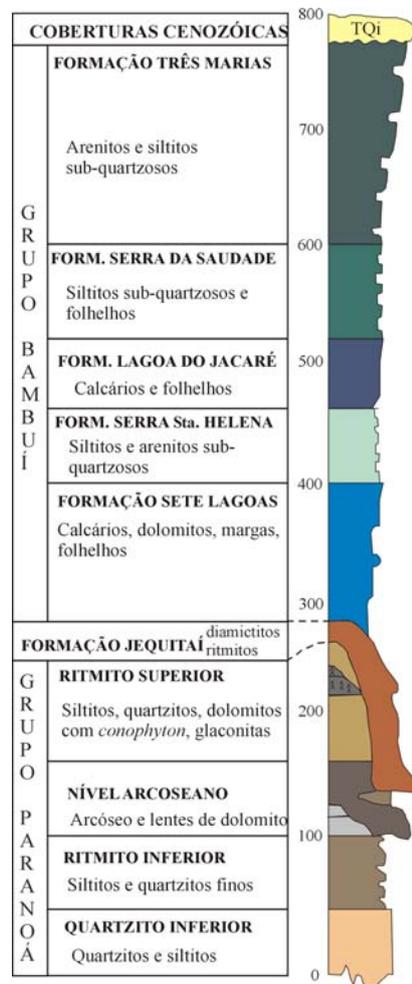


Figura nº16 Coluna litoestratigráfica simplificada da região de Bezerra-Cabeceiras, GO (Guimarães, 1993).

O poço 1-RC-1-GO foi perfurado próximo à cidade de Alvorada do Norte, Goiás, cortada pelo Rio Corrente. O referido poço, então denominado Rio Corrente, tem como coordenadas geográficas a latitude de -14,33° e a longitude de -46,19° (Figura 17). A cidade de Alvorada do Norte encontra-se à leste da Falha de São Domingos. Em mapeamento realizado na área, Della Piazza *et al.* (1987) mostraram que o poço 1-RC-1-GO foi perfurado próximo ao lineamento estrutural de Alvorada do Norte, o qual possui direção N-NW, e cujo eixo, de caimento sudeste, passa alguns quilômetros à leste de Alvorada do Norte. O mergulho das camadas se dá para oeste. Pequenos lineamentos descontínuos com direção aproximada nordeste também são assinaladas (carta geológica do Brasil ao milionésimo, CPRM).

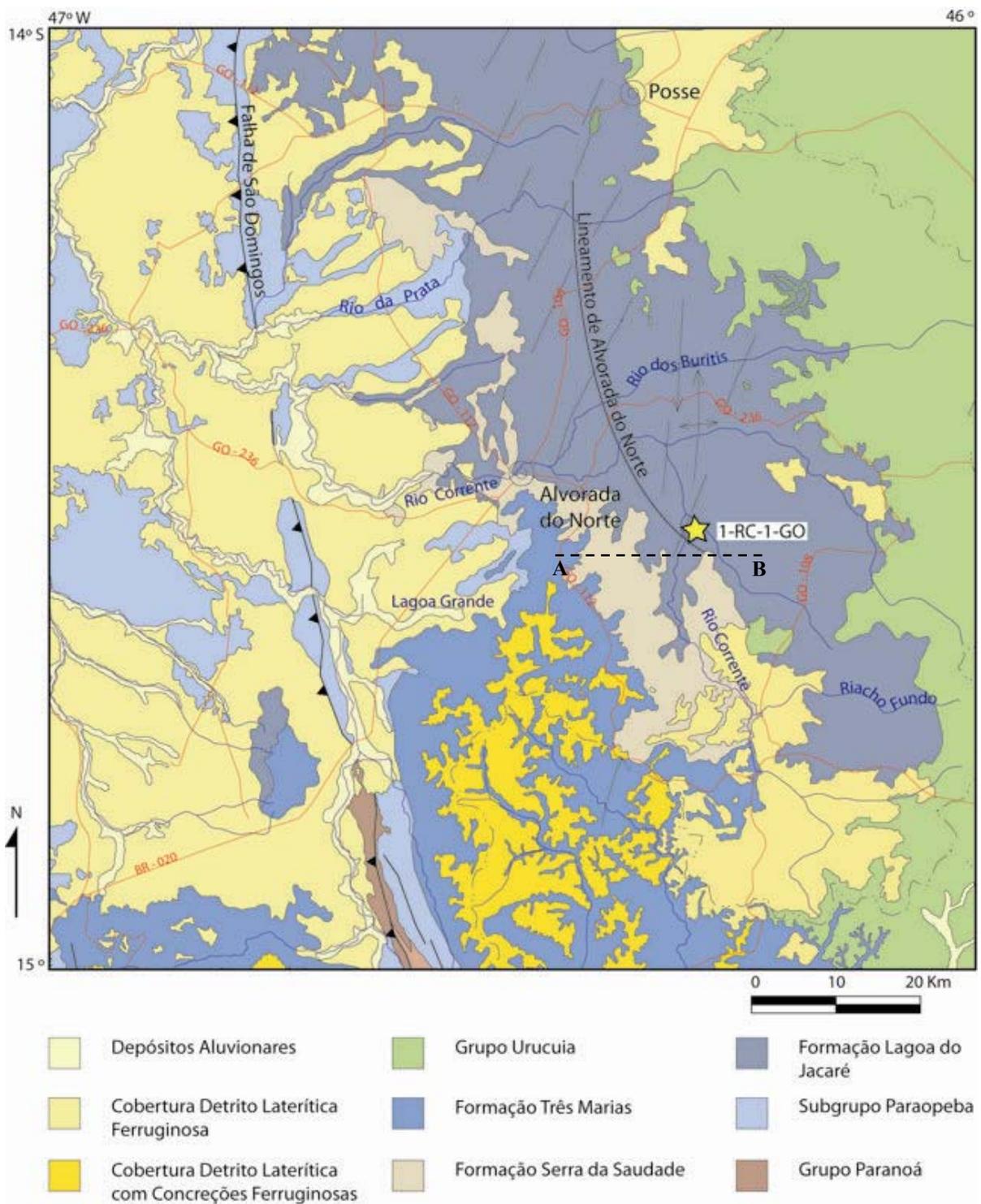


Figura nº17 Mapa geológico regional com a localização da cidade de Alvorada do Norte, do poço 1-RC-1-GO, além da falha de São Domingos e do Lineamento de Alvorada do Norte (carta geológica do Brasil ao milionésimo, folha SD-23, aonde o lineamento de Alvorada do Norte foi acrescentado, tendo como base dados retirados de Della Piazza et. al. 1987.). O perfil A-B está ilustrado na figura 20.

5.1 Empilhamento estratigráfico no poço 1-RC-1-GO

O poço 1-RC-1-GO atravessou três formações do Grupo Bambuí, a saber: Formação Lagoa do Jacaré (aflorante na região), Formação Serra de Santa Helena e Formação Sete Lagoas (Figura 18).

O presente trabalho trata das rochas carbonáticas das formações Lagoa do Jacaré (testemunhos 1 e 2) e Sete Lagoas (testemunho 4).

Durante o estudo do poço 1-RC-1-GO surgiu uma nova possibilidade de interpretação para o empilhamento estratigráfico, onde o pacote carbonático situado entre as profundidades de 690 a 1110 m, antes interpretado como Fm. Sete Lagoas (Martins 1999, 2005, Martins & Lemos 2007), poderia ser em parte constituído por carbonatos do Gr. Paranoá. A primeira anomalia observada foi a grande espessura de carbonatos que corresponderia à Fm. Sete Lagoas, com 420 metros. Esta espessura é bem incomum para esta Formação, sendo que estudos de campo nesta região mostram espessuras de no máximo 250 metros. Outro fato observado através dos perfis de raios-gama, sônico, densidade e resistividade foi que este pacote carbonático possui dois intervalos com características distintas, sendo que um situa-se entre 970 a 1110 m (intervalo I), e o segundo entre 690 a 970 m (intervalo II), como ilustrado na Figura 18.

Na borda ocidental do Cráton do São Francisco são encontradas rochas carbonáticas no topo do Gr. Paranoá e na base do Gr. Bambuí (Fm. Sete Lagoas). Estas unidades são separadas pelas rochas glaciogênicas da Fm. Jequitaí, mas em algumas localidades a ausência do registro glacial dificulta a identificação desses dois carbonatos, e por isto o controle estratigráfico é muito importante. Além da presença das glauconitas no Gr. Paranoá e das cloritas no Gr. Bambuí, também os estromatolitos do Gr. Paranoá (*Conophyton*) se distinguem daqueles do Gr. Bambuí (*Gimnosolen*) (Marchese 1974, Guimarães *et. al.* 2003). Mas o reconhecimento dos tipos de estromatolitos não foi possível no poço 1-RC-1-GO, pois amostras de calha são as únicas disponíveis para estudo neste intervalo.

Então procurou-se outras características que pudessem ajudar em uma interpretação mais acurada. As rochas carbonáticas do Gr. Paranoá são dolomíticas e mais silicosas quando comparadas às do Gr. Bambuí. Realizou-se então análises de difratometria de raios-x em amostras de calha para comparação das porcentagens de dolomita e sílica.

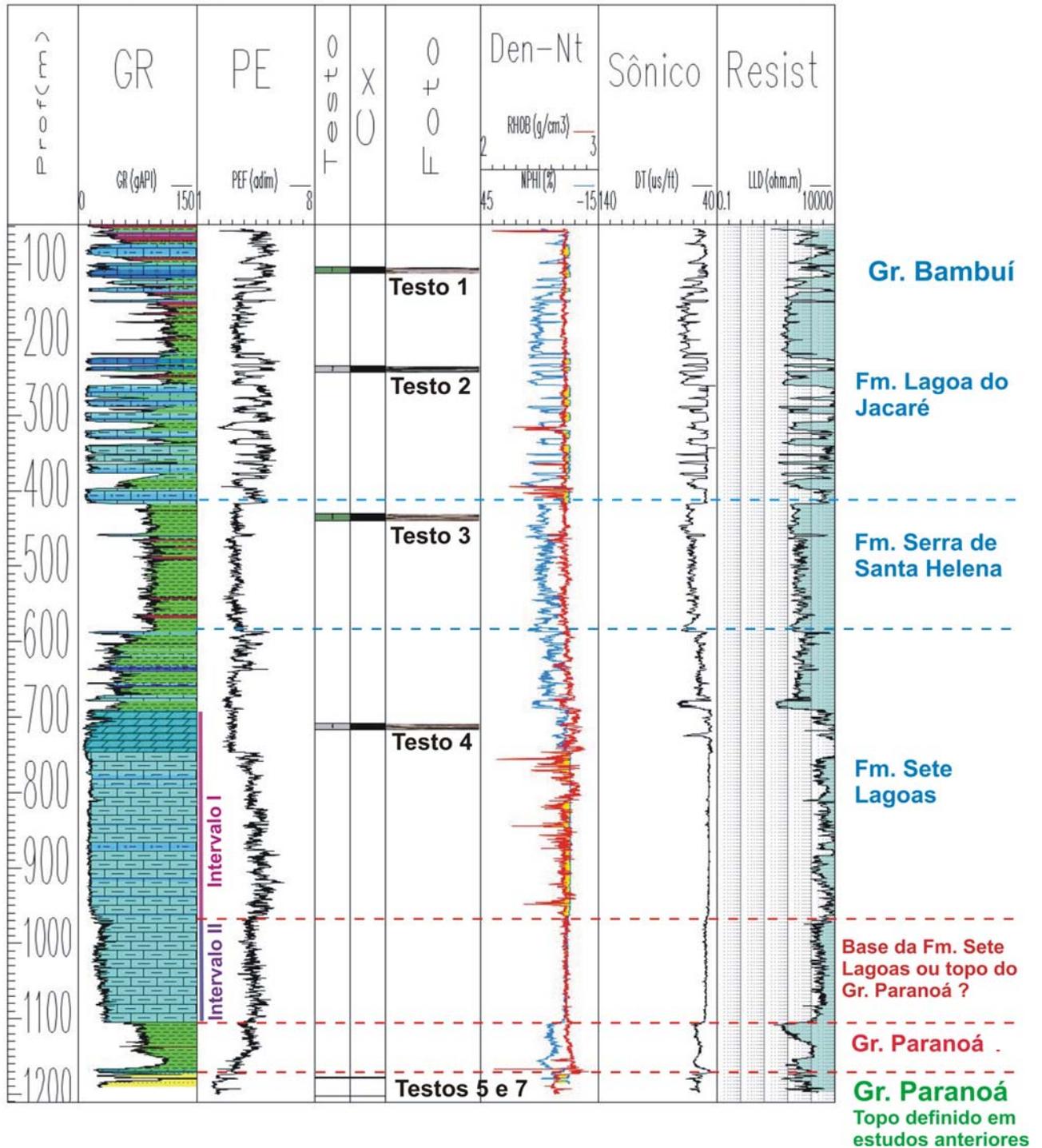


Figura nº18 Imagem dos perfis de raios gama (GR) com o preenchimento da litologia (carbonatos em tons de azul e pelitos em tons de verde), fator fotoelétrico (PE), densidade e neutrão (Den-Nt), sônico e resistividade do poço 1-RC-1-GO, com a localização dos testemunhos (testos 1 a 4 no Grupo Bambuí e testos 5 e 7 no Grupo Paranoá). É ressaltado na figura os contatos entre as formações do Gr. Bambuí (tracejados em azul) e dois possíveis contatos entre o Grupo Paranoá e o Grupo Bambuí (tracejados em vermelho). Imagem extraída do SIGEO, PETROBRAS.

As análises mostraram que no intervalo de 846 a 909 m a composição da rocha é 100% calcítica. No intervalo de 918 a 951 m a composição predominante é 95% calcita e 5% dolomita. No intervalo de 969 a 1014 m a composição predominante é 60-65% calcita, 10% dolomita, 15% quartzo, 15% plagioclásio e 5-10% argila, e no intervalo de 1023 a 1069 m é 70% calcita, 10%

dolomita, 10% quartzo, 10% plagioclásio e 5% argila. Estes resultados mostram que o intervalo I é mais dolomítico que o intervalo II. A presença de quartzo no intervalo I está relacionada com a presença de plagioclásio e argilominerais, o que indica tratar-se de quartzo detrítico, e não diagenético.

Analisando amostras de calha em lupa petrográfica, identificou-se a presença de grãos esverdeados, possivelmente glauconíticos, em arenitos imediatamente abaixo do carbonato (abaixo de 1110 m). Estudos feitos por Guimarães (1997) mostraram que a presença de glauconita é uma feição típica do Gr. Paranoá, sendo que este mineral não foi descrito na Fm. Sete Lagoas. Logo o nível pelito-arenítico situado entre 1110 e 1160 metros corresponde ao Gr. Paranoá.

Os perfis de densidade e caliper mostraram feições de fraturamento e dissolução intensa no pacote carbonático superior (intervalo II), contrastando nitidamente com o pacote carbonático da base (intervalo I), o qual é maciço. Este contraste de comportamento da rocha com relação ao fraturamento e dissolução entre os intervalos carbonáticos I e II pode estar relacionado ao fato do pacote inferior conter grãos siliciclásticos, mas também pode estar indicando tratar-se de unidades estratigráficas distintas.

Análises isotópicas de amostras de calha foram realizadas com o objetivo de verificar diferenças entre os dois intervalos carbonáticos. Tais análises de fato mostram mudança de valores de um intervalo carbonático para o outro (Figura 19). Para o intervalo I os valores de $\delta^{13}\text{C}$ variam entre +0,99 e -0,13‰ e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -7,04 e -8,95 ‰. O nível calcítico correspondente ao intervalo II (Fm. Sete Lagoas) mostrou valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre +1,58 e +1,18‰ e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -5,75 e -8,50‰. O dolomito do topo da Fm. Sete Lagoas mostra valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre +2,51 e +3,47‰ e valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -4,34 e -9,88 ‰.

É importante notar que logo abaixo do contato entre os intervalos II e I há uma transição nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, o que provavelmente corresponde à mistura de calha dos intervalos.

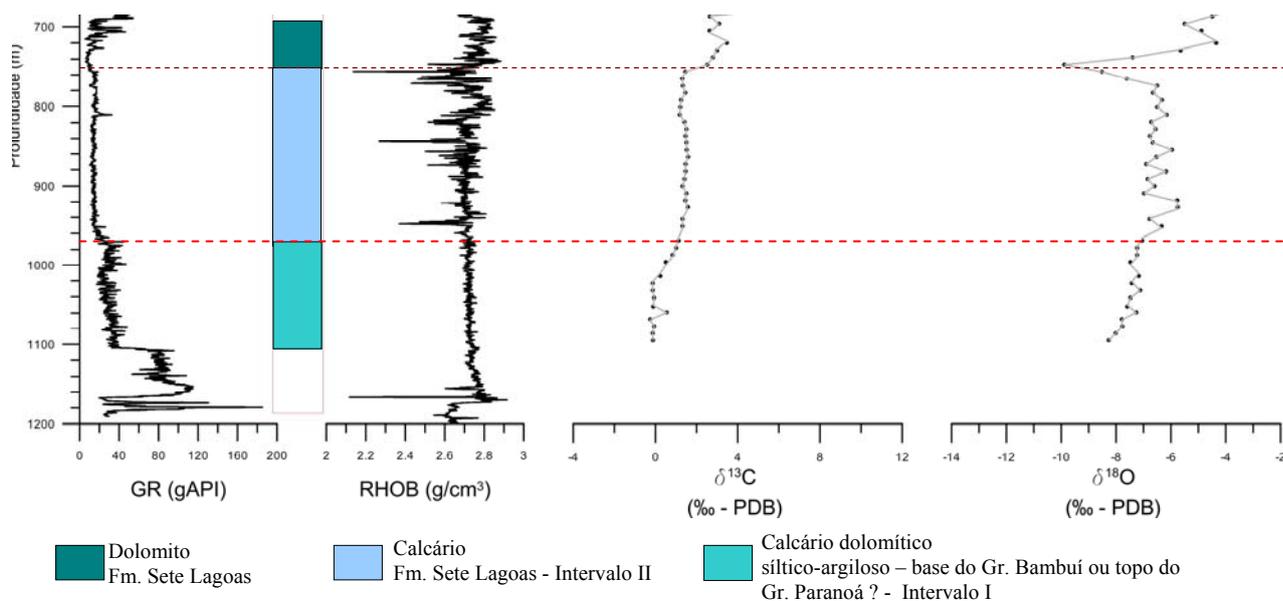


Figura nº19 Perfis de raio-gama (GR), densidade (RHOB) e dados isotópicos de carbono e oxigênio realizados em amostras de calha. Intervalo de 700 a 1200 metros, poço 1-RC-1-GO. A mudança gradual de valores isotópicos que se observa abaixo do contato entre os dois pacotes carbonáticos podem estar relacionados à contaminação (mistura) das amostras de calha, aonde amostras do intervalo superior pode ter se misturado no início do intervalo inferior. A grande variação nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ para o dolomito do topo da Fm. Sete Lagoas está possivelmente relacionado a evento de exposição.

Estudos isotópicos nos carbonatos dos Grupos Bambuí e Paranoá realizados por Alvarenga *et al.* (2007) mostram que os carbonatos do Gr. Paranoá apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ positivos, variando entre +0,8 e +2,7‰. Para os carbonatos da Formação Sete Lagoas os dolomitos da capa (*cap dolomite*), relacionados com evento de glaciação, apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ negativos entre -6,0 e -3,2‰. Calcários acima do dolomito de capa iniciam com valores ainda muito negativos de Carbono (-6,0‰), passando gradualmente para valores altamente positivos (até +9,2‰). Vieira *et al.* (2007) também mostram uma forte mudança isotópica da base para o topo da Fm. Sete Lagoas, aonde valores de $\delta^{13}\text{C}$ passam de -4,5‰ a 14‰.

Porém o trabalho de Alvarenga *et al.* (2007) trata de carbonatos do Gr. Paranoá que estão abaixo do nível de glauconita, visto que na área estudada (Bezerra-Formosa, GO) não ocorre o Ritmito Superior. No poço 1-RC-1-GO o nível carbonático correspondente ao Intervalo I está acima do Ritmito Superior, e portanto os valores isotópicos podem ser diferentes daqueles registrados pelos referidos autores para as rochas carbonáticas do Gr. Paranoá.

Santos *et al.* 2000 realizaram análises isotópicas nos carbonatos dos Grupos Bambuí e topo do Gr. Paranoá na Serra de São Domingos (GO), onde observaram que a transição do Gr. Paranoá para o Gr. Bambuí é marcada pelo aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ de +1,0‰ no Gr. Paranoá, para +2,6‰ na Fm. Sete Lagoas e passando para +12‰ na Fm. Lagoa do Jacaré.

O intervalo I apresenta valores de Carbono pouco positivos e por vezes negativos, o que poderia indicar relação com o evento de glaciação. Porém dados isotópicos de Carbono para

rochas carbonáticas do Gr. Paranoá também podem se aproximar de zero, como mostram os estudos de Santos *et. al.* (2000) e Alvarenga *et. al.* (2007), porém nunca foram registrados valores negativos. Desta maneira, todo o pacote carbonático (intervalos I e II) apresenta assinatura isotópica semelhante à do Grupo Bambuí registrada em estudos anteriores.

Outra feição importante foi registrada pelo perfil de *Dipmeter*, o qual reflete a inclinação das camadas, mostra no poço 1-RC-1-GO uma anomalia no contato entre os intervalos I e II, aonde o ângulo de inclinação aumenta de forma significativa e brusca. Esta feição é indicativa de plano de falha.

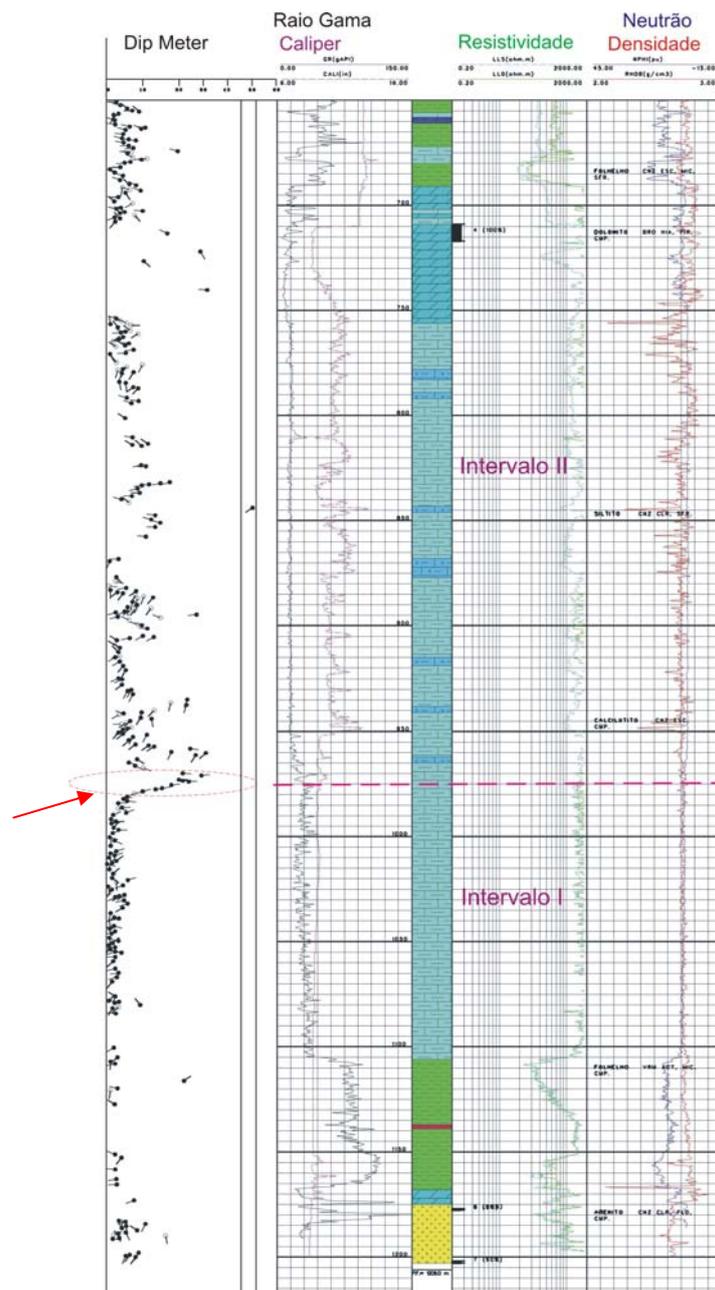


Figura nº20 Perfil composto do intervalo de 650 a 1210 metros do poço 1-RC-1-GO, com os perfis de Dipmeter, Raio Gama, Caliper, Resistividade, Densidade e Neutrão. Notar que no intervalo II o perfil de caliper mostra arrombamento na parede do poço, o que indica presença de fraturas e cavidades, confirmado pelo perfil de densidade. O perfil de Dip Meter mostra feição de fratura (circulado em vermelho) no contato entre os intervalos I e II. Imagem extraída do SIGEO, PETROBRAS.

Em suma, as principais diferenças entre os intervalos I e II são:

- O intervalo carbonático superior, intervalo II, (certamente pertencente ao Gr. Bambuí) é calcítico, com exceção do topo, o qual foi intensamente dolomitizado, sem presença de terrígenos e com valores isotópicos de Carbono entre +1,58 e +1,18‰. Todo este nível apresenta feições de intenso fraturamento e dissolução, observados principalmente através de perfis de poço, mas também observado em testemunho.

- O intervalo carbonático inferior, intervalo I (Base do Gr. Bambuí ou topo do Gr. Paranoá - ?) é constituído por calcita (60-65%), dolomita (10%), plagioclásio, quartzo, argilominerais, com valores isotópicos de Carbono entre +0,99 e -0,13‰. Em perfil não apresenta feições de fraturamento e dissolução.

Não foi possível estabelecer com precisão o contato entre os Grupos Paranoá e Bambuí. No presente trabalho foi considerado que o intervalo carbonático I corresponda ao topo do Gr. Paranoá, e que o contato entre Gr. Paranoá e Gr. Bambuí ocorra através de falha. Porém estudos mais detalhados são necessários, visto que a assinatura isotópica do intervalo I é semelhante à do Gr. Bambuí.

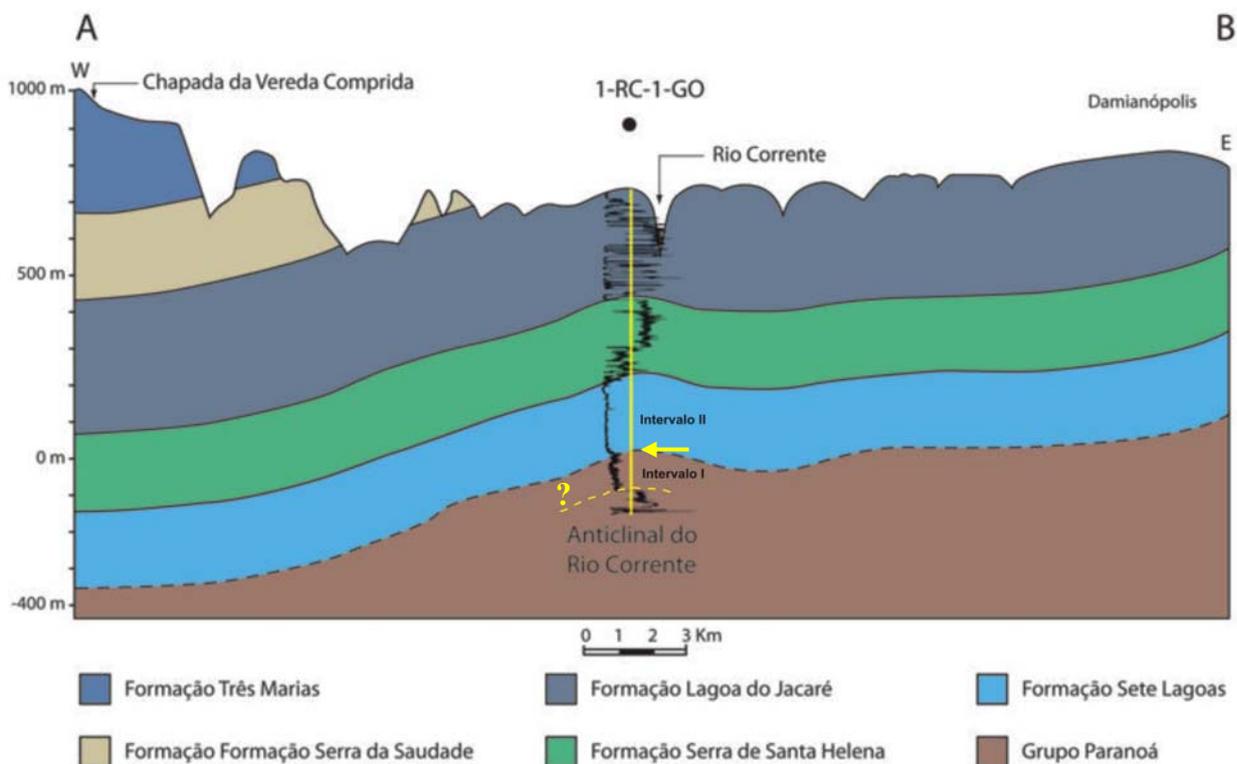


Figura nº21 Seção geológica esquemática com a localização do poço 1-RC-1-GO (modificado de Melo *et. al.* 1991) e o perfil de raios-gama (ver localização da seção em mapa na Figura 17). A linha tracejada preta marca contato inferido entre os Grupos Paranoá e Bambuí, sugerido no presente trabalho. No contato entre os intervalos I e II ocorre plano de falha (seta amarela), o qual não está representado na figura. A linha tracejada amarela marca a base de todo o pacote carbonático.

5.2 Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas, base do Grupo Bambuí, regionalmente sobrepõe a Formação Jequitaiá, ou o Grupo Paranoá, ou ainda o embasamento granito-gnáissico, mas não está exposta em Alvorada do Norte. Aqui é reconhecida no poço 1-RC-1-GO sobrepondo nível carbonático provavelmente pertencente ao Grupo Paranoá.

As amostras de calha e o perfil de raios-gama mostram que a Formação Sete Lagoas apresenta aproximadamente 380 metros de espessura, sendo que destes, 280 metros correspondem a espesso pacote carbonático, cujos 60 metros do topo correspondem a dolomito (Figura 18). Este nível dolomítico teve 8 metros testemunhado, sendo este objeto de estudo no presente trabalho. Sobre este estão pelitos intercalados com carbonatos, correspondentes à Fm. Serra de Santa Helena.

Com base no intervalo testemunhado, de 709 a 717 m, foram definidas duas fácies sedimentares – dolorrudito intraclástico e dolarenito intraclástico peloidal - e a sequência de eventos diagenéticos.

5.2.1 Fácies de dolorrudito intraclástico

A fácies de dolorrudito apresenta coloração cinza claro a cinza médio, localmente rosado, sendo composto por intraclastos carbonáticos, em sua maioria fragmentos de estromatolitos colunares em matriz micrítica, encontrando-se localmente cimentado. Os clastos, em dimensões de seixo a matacão, são subangulosos a subarredondados, em grande parte alongados.

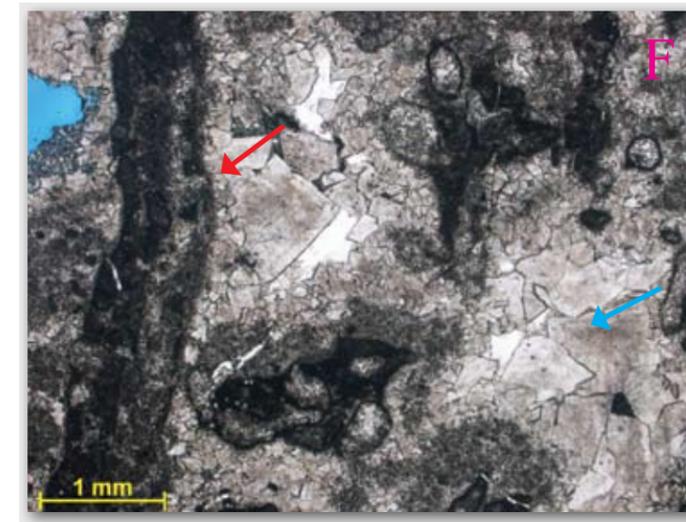
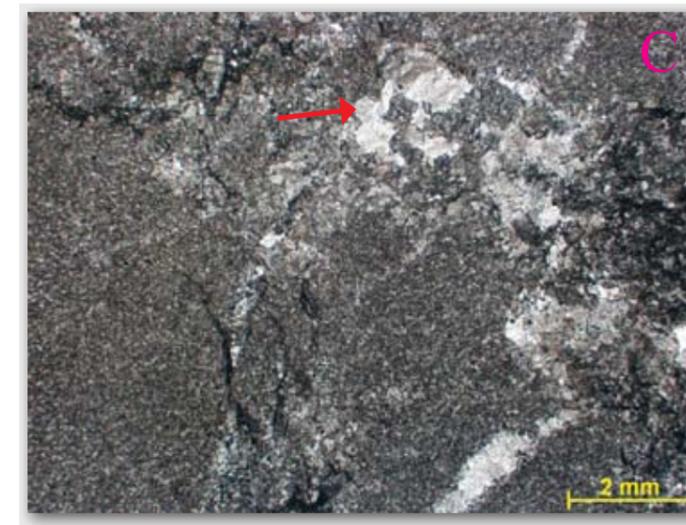
Em lâmina delgada, observa-se a intensa dolomitização da rocha, onde a dolomita varia sua cristalinidade de média a muito grossa quando substituindo intraclastos, e de muito fina a fina quando substituindo matriz. Finos cristais de pirita ocorrem de forma dispersa.

Destaca-se no intervalo de 711 a 711,26m a presença delgados níveis de dolorrudito do tipo “flat pebble”, constituído por intraclastos carbonáticos delgados e alongados, tamanho grânulo a seixo. Os intraclastos são fragmentos de calcarenito peloidal cimentado por calcita.

Como processos diagenéticos atuantes na fácies de dolorrudito intraclástico observaram-se: dolomitização, fraturamento, dissolução, cimentação por calcita, dolomita-em-sela e por vezes quartzo, além de compactação química, com a formação de estilolito). Localmente a rocha apresenta aspecto de brechação e micritização, possivelmente associados a processo de exposição.

Observam-se estilolitos e fraturas inclinadas e horizontais, estando estas parcial a totalmente cimentadas por calcita. Presença de porosidade secundária dos tipos intercrystalina e vugular, geralmente próximo a planos de fratura e estilolitos.

Figura 22: Dolorrudito intraclástico



A - Foto de detalhe do dolorrudito intraclástico com fragmentos de estromatolitos colunares (setas). Profundidade: 716,48m.

B - Fotomicrografia do dolorrudito intraclástico. Profundidade: 716,91m.

C - Fotomicrografia do dolorrudito intraclástico. Seta indicando porosidade secundária cimentada por dolomita próximo a estilolito. Profundidade: 716,68m.

D - Foto de detalhe do dolorrudito intraclástico com intraclastos carbonáticos alongados (seta). Profundidade: 711,07m.

E - Fotomicrografia do calcirrudito intraclástico com intraclastos carbonáticos alongados (setas). Profundidade: 711,22m.

F - Fotomicrografia de detalhe do calcirrudito intraclástico com intraclastos carbonáticos alongados (seta vermelha). Seta azul indicando cimento dolomítico. Profundidade: 711,22m.

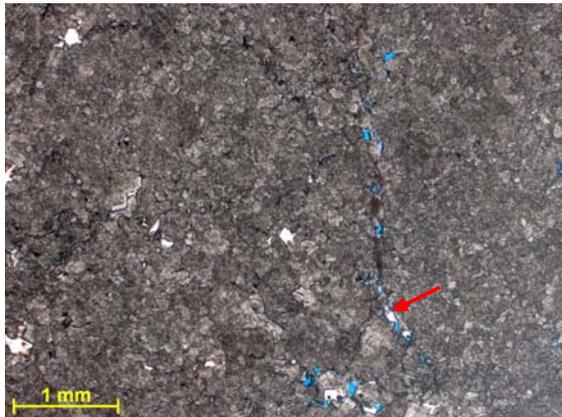


Figura nº23 Detalhe do dolerudito intracristalino. Notar que o intenso processo de recristalização não permite reconhecimento dos grãos intracristalinos em lâmina delgada. Seta indicando porosidade secundária. Fotomicrografia, polarizadores paralelos (P//). Profundidade: 714,93m.



Figura nº24 Seta indicando porção da rocha aonde a dolomita apresenta cristalinidade mais grossa, possivelmente correspondendo a intraclasto dolomitizado. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m.

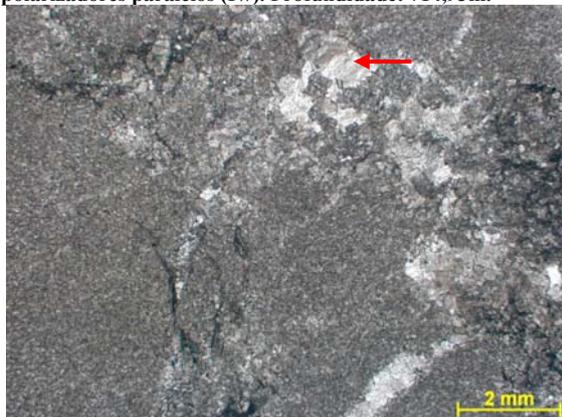


Figura nº25 Seta indicando porosidade secundária cimentada por dolomita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 716,68m.



Figura nº26 Detalhe do dolerudito intensamente recristalizado. Seta indicando pirita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 716,68m.

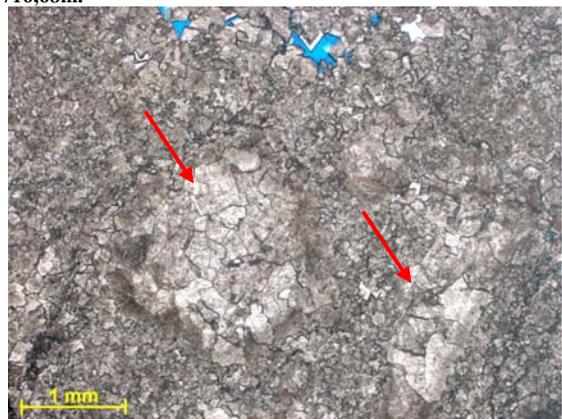


Figura nº27 Detalhe do dolerudito. Setas indicando porções da rocha aonde os cristais de dolomita são mais grossos, correspondendo a cimentação. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 714,93m.

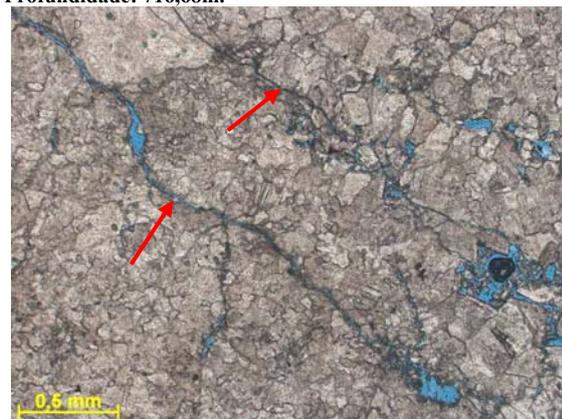


Figura nº28 Detalhe das fraturas com porosidade secundária associada (em azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m.

5.2.2 Fácies de dolarenito peloidal intraclástico

A faces de dolarenito peloidal intraclástico apresenta coloração cinza médio, sendo composto principalmente por pelóides e intraclastos carbonáticos, com granulação variando de areia fina a média e areia média a grossa. Oolitos ocorrem de forma dispersa ou concentrado em delgados níveis. Apresenta laminação, localmente com estruturas de escorregamento, marcas onduladas, estratificações cruzadas e estruturas do tipo *flaser*. Outras feições presentes são contatos erosivos entre as camadas e gradação normal (dolarenito intraclástico gradando para dolarenito peloidal).

Em lâmina delgada pode-se observar que a rocha não sofreu compactação mecânica, sendo que os grãos apresentam contatos pontuais e flutuantes. Delgada franja isópaca de cimento dolomítico ocorre ao redor dos grãos. Além desta franja de cimento ocorre outra fase de cimento dolomítico, aonde os cristais de dolomita apresentam-se anédricos, com cristalinidade variando de média a grossa.

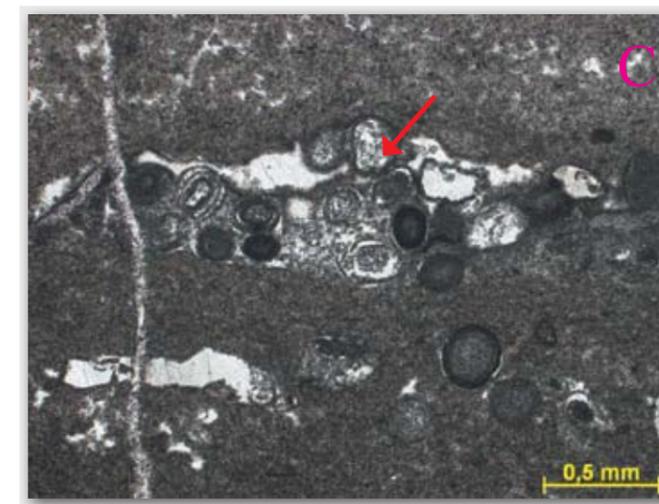
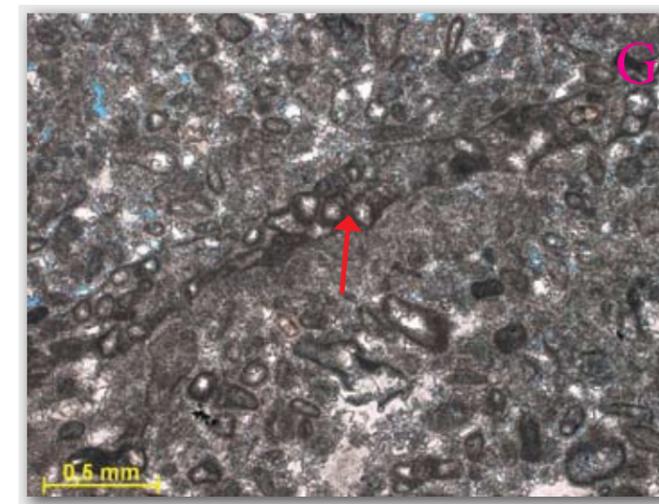
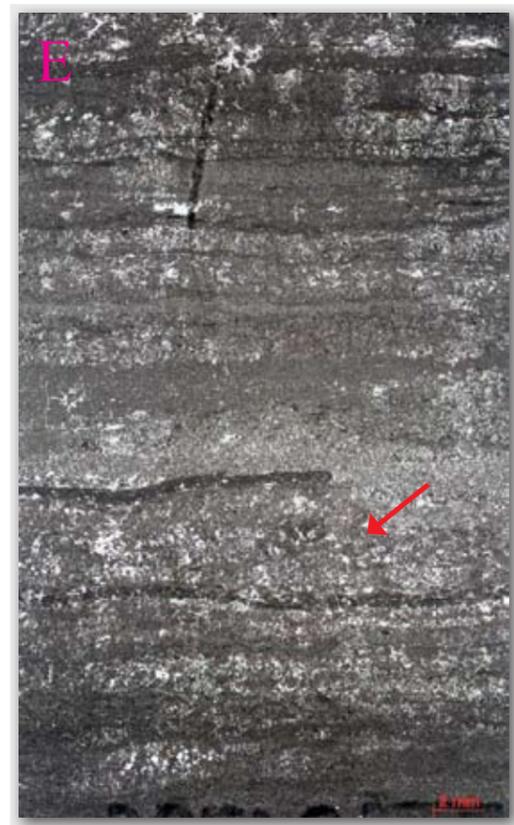
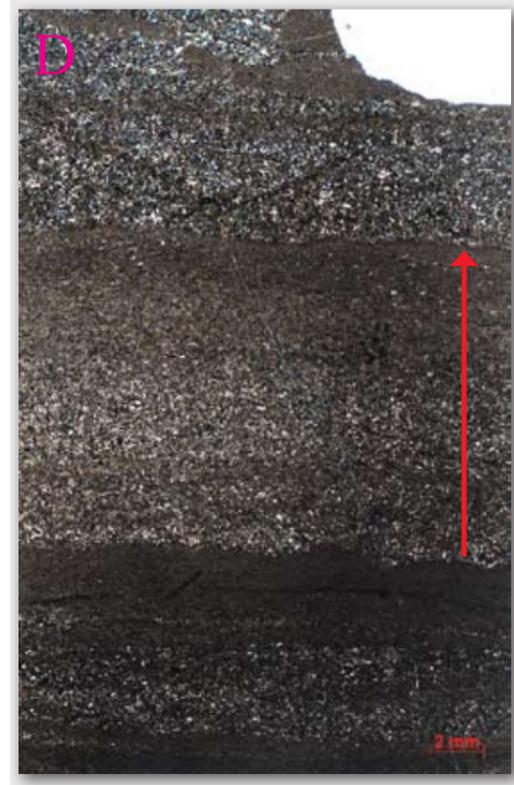
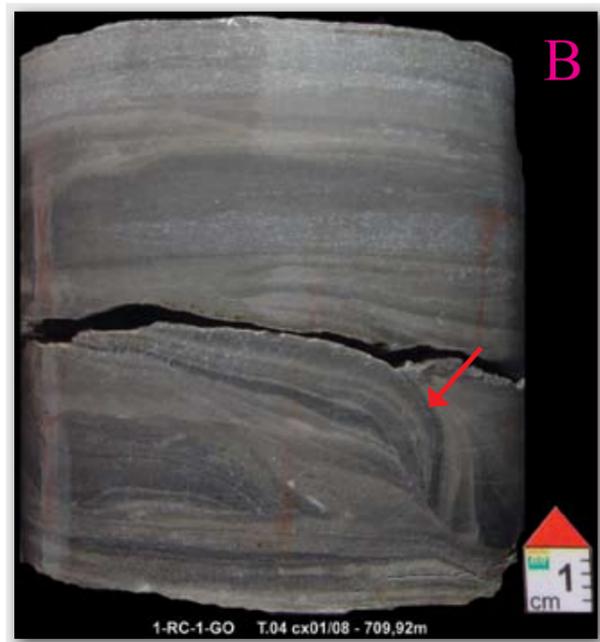
Em níveis de granulação mais grossa observou-se a presença de porosidade intergranular ainda preservada, porém também com a presença de porosidade secundária, esta gerada por processo de dissolução. A presença de porosidade primária é bastante rara, sendo mais comum a presença de porosidade secundária na forma de fraturas, vugs, porosidade intercrystalina e intragranular. Esta porosidade encontra-se parcial ou totalmente cimentada por dolomita e calcita blocosa. As fraturas encontram-se cimentadas apenas por calcita.

Observou-se discreto processo de silicificação (quartzo) próximo a estilólitos. Cristais de quartzo ocorrem também como cimento.

É comum a presença de porosidade fenestral centimétrica, preenchida por sedimentos carbonáticos finos no intervalo de 713,45 a 712,12 metros. Esta estrutura fenestral está relacionada com processos de carstificação.

No intervalo de 711,94 a 712,07 metros ocorre calcarenito muito grosso com coloração rosada a avermelhada devido à presença de óxido de Fe, possivelmente relacionado a processo de exposição.

Figura 29: Dolarenito peloidal intraclástico



A - Foto de detalhe do dolarenito peloidal intraclástico laminado, com estrutura do tipo *flaser* (seta). Profundidade: 709,47m.

B - Foto de detalhe do dolarenito peloidal intraclástico. Seta indicando estrutura de escorregamento. Profundidade: 709,92m.

C - Foto de detalhe do dolarenito peloidal intraclástico. Seta indicando estilolito com porosidade secundária ao longo do seu plano. Profundidade: 710,13m.

D - Fotomicrografia da fácies de dolarenito peloidal intraclástico. Seta indicando gradação de nível intraclástico na base para nível peloidal no topo. Profundidade: 710,87m.

E - Fotomicrografia do dolarenito peloidal intraclástico laminado. Seta indicando nível intraclástico de granulação mais grossa. Profundidade: 709,14m.

F - Fotomicrografia do dolarenito peloidal. Seta indicando filme de dissolução. Profundidade: 709,39m.

G - Fotomicrografia do dolarenito peloidal intraclástico. Seta indicando intraclasto carbonático. Profundidade: 710,87m.

H - Fotomicrografia do dolarenito peloidal. Seta indicando oolitos concentrados na forma de lente. Profundidade: 709,73m.

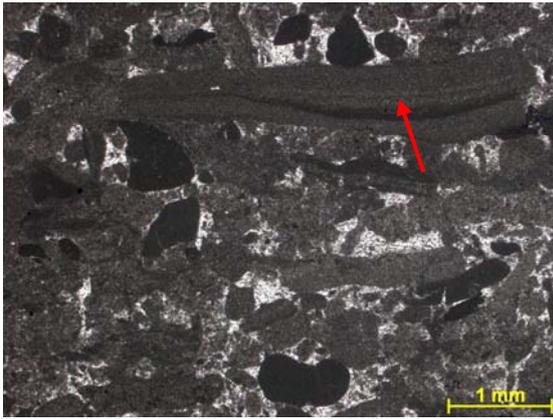


Figura nº30 Detalhe do dolarenito muito grosso. Seta indicando intraclasto carbonático. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m.

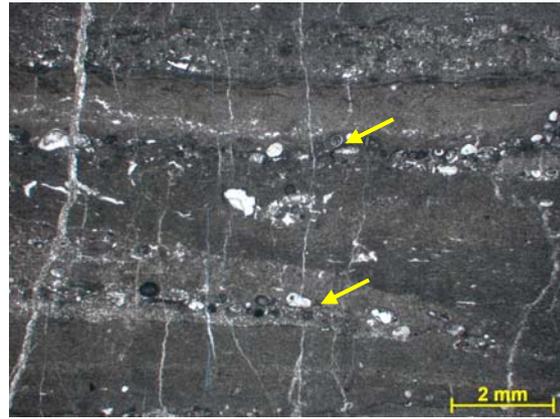


Figura nº31 Dolarenito peloidal laminado. Seta indicando níveis com oolitos e intraclastos carbonáticos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,73m.

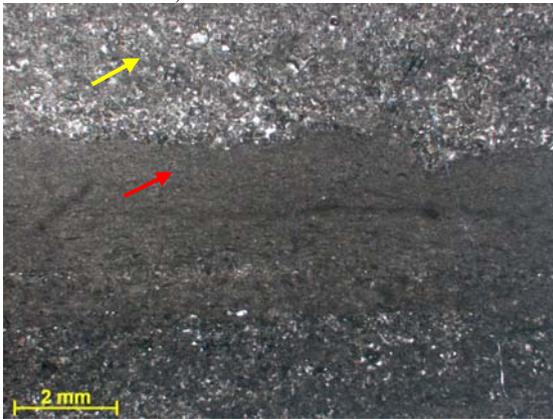


Figura nº32 Seta amarela indicando nível intraclástico com cimento dolomítico entre os grãos e seta vermelha indicando nível peloidal com matriz carbonática entre os grãos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

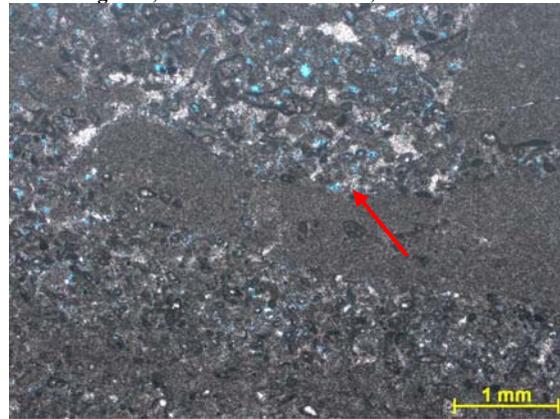


Figura nº33 Seta indicando contato erosivo entre dolarenito intraclástico (com porosidade) e dolarenito peloidal. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

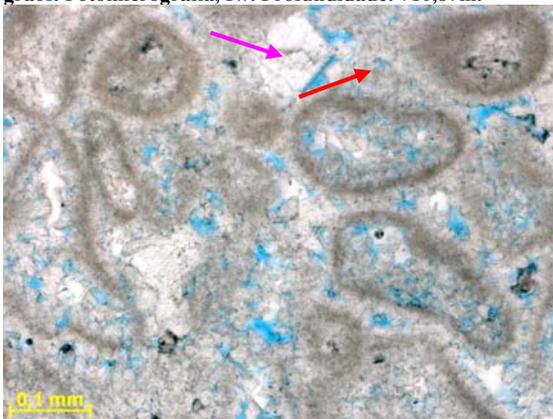


Figura nº34 Seta vermelha indicando cristais de dolomita possivelmente formadas pela substituição de cimento anterior (calcítico ou aragonítico) e seta rosa indicando cimento dolomítico mais tardio. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

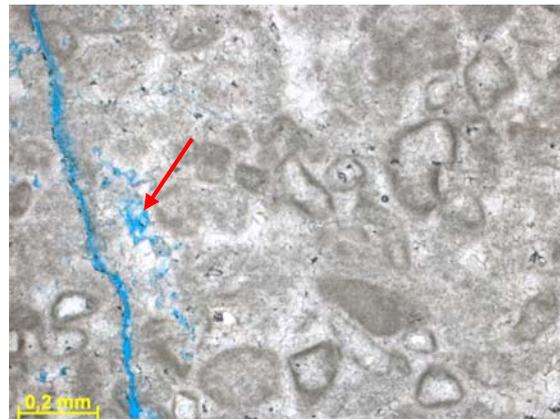


Figura nº35 Detalhe do dolarenito intraclástico intensamente cimentado, com porosidade secundária gerada por processo de dissolução próximo à fratura (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

5.2.3 Empilhamento de fácies e condições deposicionais – Formação Sete Lagoas

No intervalo de aproximadamente 8 metros amostrado no topo da Formação Sete Lagoas, foram observadas fácies carbonáticas de alta energia, com o predomínio de dolorrudito intraclástico (na base do testemunho) e dolarenito peloidal intraclástico (no topo do testemunho).

A presença de fragmentos de estromatolitos e areia carbonática sem matriz lamosa indica ambiente de alta energia, assim como uma posição próxima a biohermas estromatolíticas.

Em campo pôde-se observar fácies semelhante ao dolorrudito com fragmentos de estromatolitos presente no testemunho, porém apresentando composição calcítica (calcirrudito). Localmente observou-se estromatolitos colunares aparentemente *in situ*, ou seja, na sua posição de crescimento original.



Figura nº36 Calcirrudito com fragmentos de estromatólitos. Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau.



Figura nº37 Detalhe do calcirrudito com fragmentos de estromatólitos (setas). Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau.

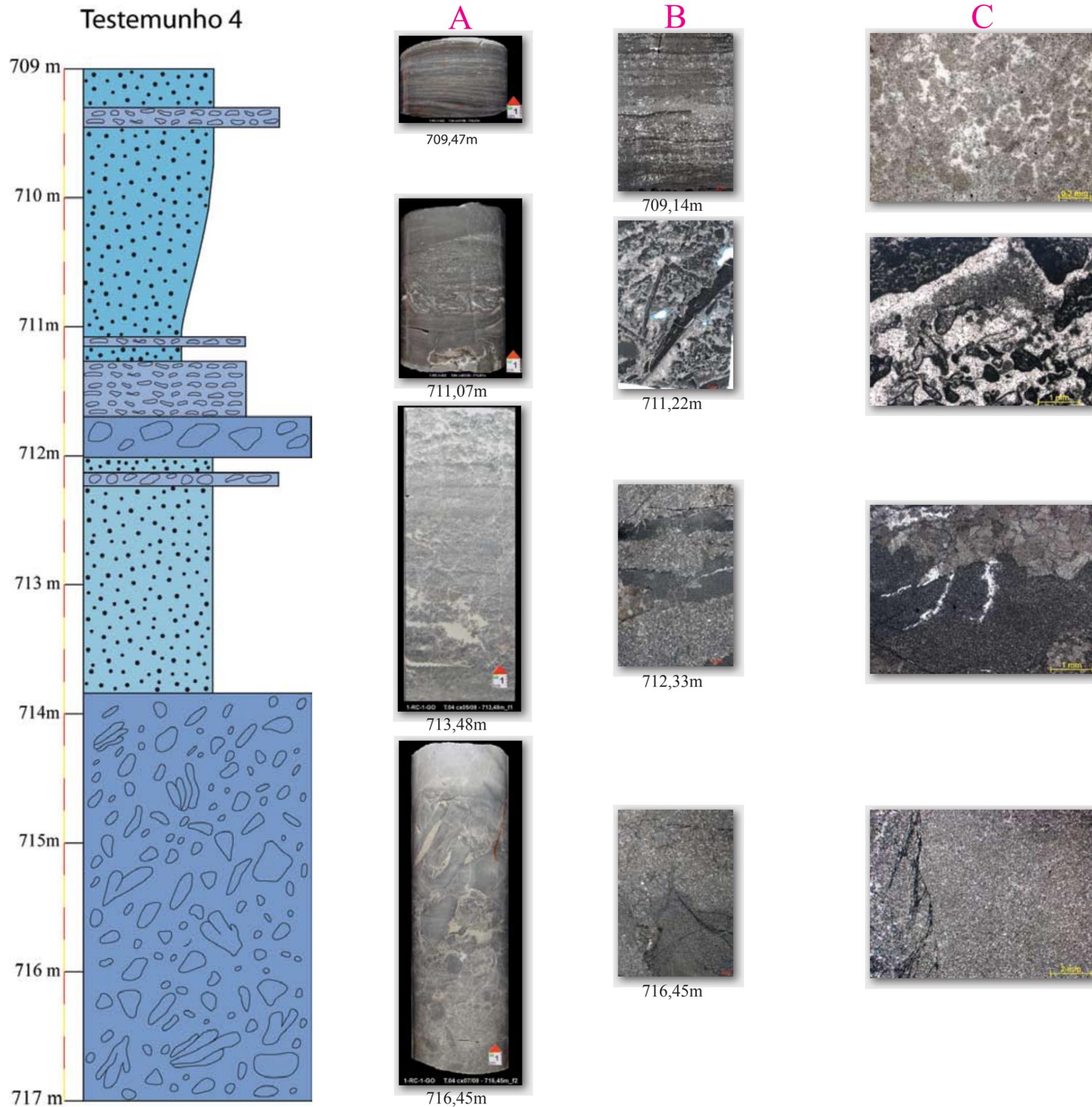


Figura nº38 Detalhe de fragmento de estromatólito colunar (seta). Notar que este encontra-se na posição horizontal, paralelo ao acamamento. Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau.



Figura nº39 Detalhe de estromatólitos colunares orientados, possivelmente estando em sua posição deposicional original (seta). Fazenda Capetinga, próximo ao córrego Bisnau.

Figura 40:
Empilhamento de fácies
- Testemunho 4



A - Fotos de detalhe das fácies presentes no testemunho 4.

B - Fotomicrografias das fácies presentes no testemunho 4.

C - Fotomicrografias de detalhe das fácies presentes no testemunho 4.

5.2.4 Eventos diagenéticos na Formação Sete Lagoas

Cimentação eodiagenética

Apesar da intensa dolomitização, pode-se observar ao redor dos grãos constituintes dos dolarenitos a presença de uma franja isópaca de cimento dolomítico, com cristais finos prismáticos, por vezes semelhantes à textura dente-de-cão. Além da franja de cimento ocorre também cristais anédricos de dolomita, de cristalinidade fina a média. Estes cimentos dolomíticos são produto de substituição de cimentos calcíticos eodiagenéticos, possivelmente meteóricos de zona freática. Pode ter havido alguma cimentação marinha também, porém não foi claramente identificado.

Esta cimentação precoce segurou o arcabouço da rocha, impedindo que houvesse compactação mecânica entre os grãos, os quais apresentam contatos pontuais e flutuantes.

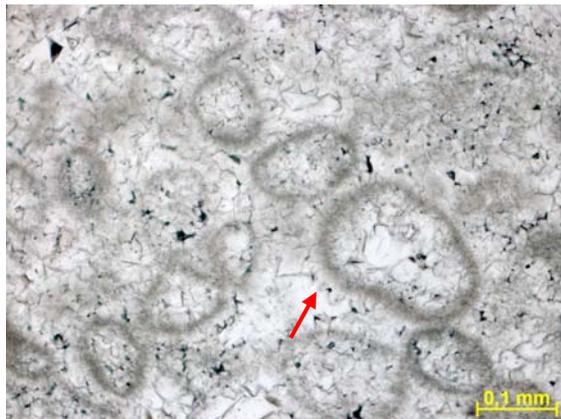


Figura nº41 Seta indicando franja de cimento dolomítico. Notar contatos pontuais e flutuantes entre os grãos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

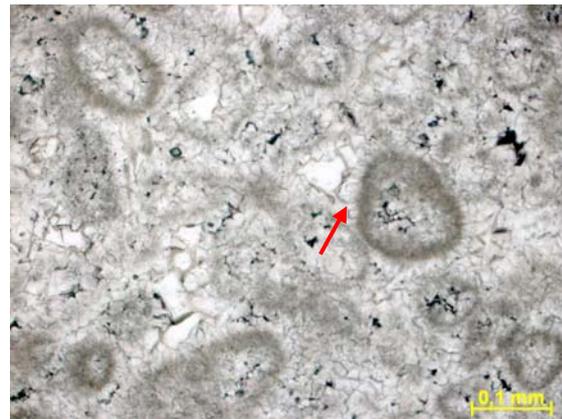


Figura nº42 Seta indicando franja isópaca de cimento dolomítico ao redor do grão. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

Carstificação

Todo o intervalo carbonático amostrado no testemunho 4 mostra feições de carstificação e localmente de exposição, com intensa dissolução da rocha.

São observadas cavidades e porosidade fenestral, as quais foram preenchidas por sedimento carbonático fino e localmente por dolarenito. Estão presentes também feições semelhantes a espeleotemas, por vezes com formas botrioidais e arranjo de cristais fibro-radiais.

Da base do testemunho até o topo nota-se um aumento na quantidade e no tamanho das cavidades e porosidade fenestral, culminando com uma superfície de exposição, intensamente oxidada, a qual marca o topo de um ciclo deposicional (Figura 45).

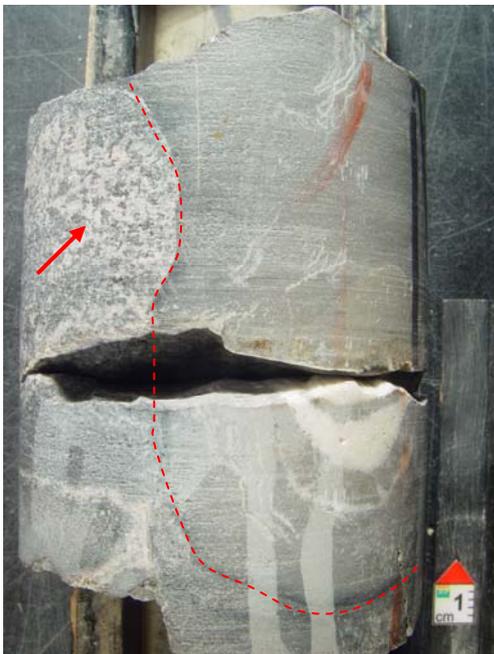


Figura nº43 Detalhe de possível espeleotema (delimitado pela linha tracejada). Seta indicando dolarenito preenchendo cavidade ao redor. Profundidade: 710,60m.



Figura nº44 Detalhe de possível espeleotema (seta vermelha). Seta amarela indicando cavidade preenchida por sedimento fino, levemente laminado.

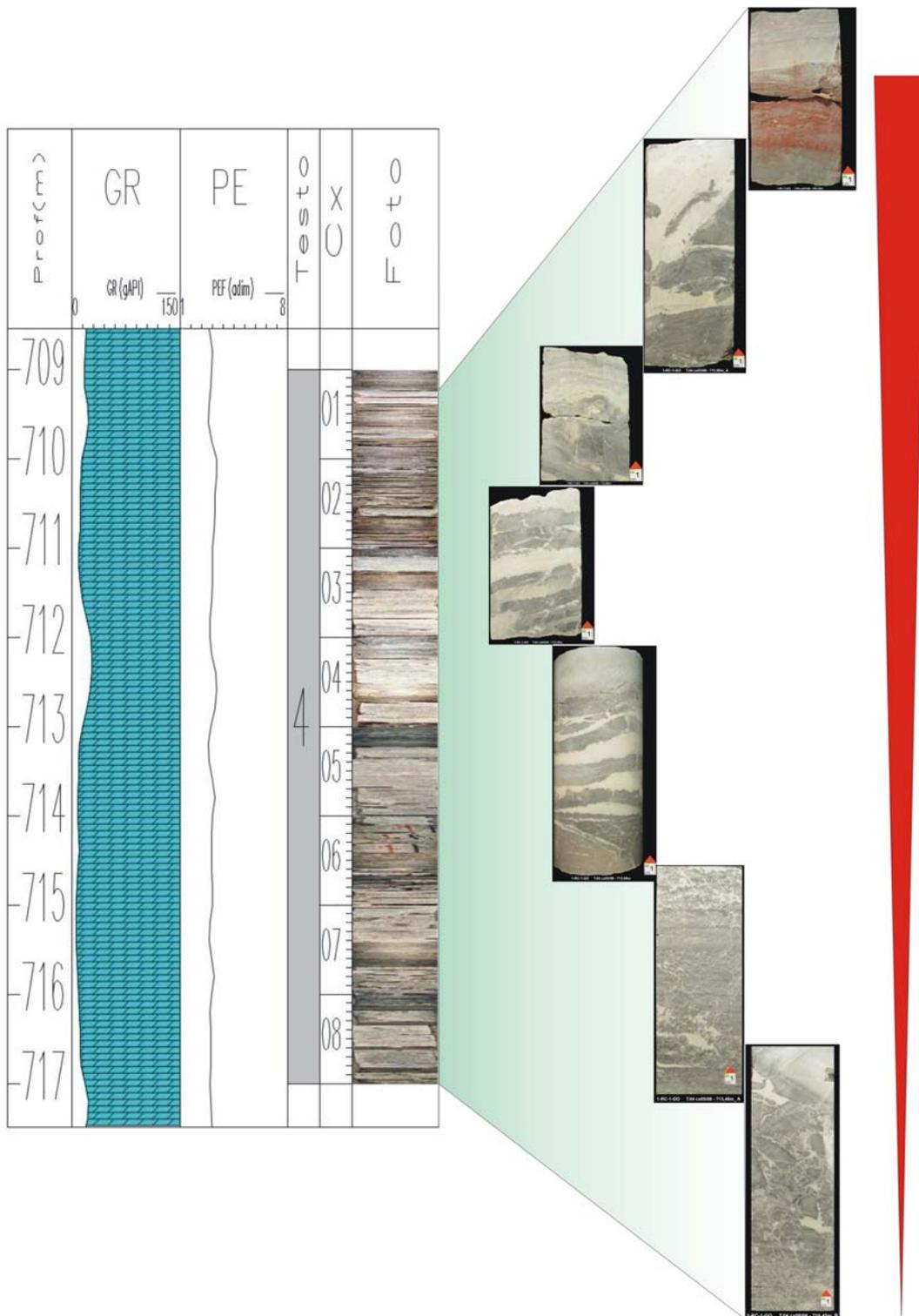


Figura nº45 Figura ilustrando processo de carstificação, com geração de cavidades e porosidade fenestral aumentando de intensidade da base para o topo do testemunho 4, culminando com uma superfície de exposição com processo de oxidação no topo do testemunho.

Dolomitização

No topo do pacote carbonático da Formação Sete Lagoas ocorre uma intensa dolomitização da rocha original. Os perfis de raio-gama, densidade e fator fotoelétrico marcam bem este nível dolomítico(Figura 18).

É importante observar que a dolomitização não mascarou as feições deposicionais da rocha, sendo possível observar textura, grãos e cimentos precoces ainda com feições originais ou próxima a estas. Os cristais de dolomita são em sua maioria xenotópicos, e sua cristalinidade varia de muito fina a grossa, dependendo se estão substituindo grãos ou cimento.

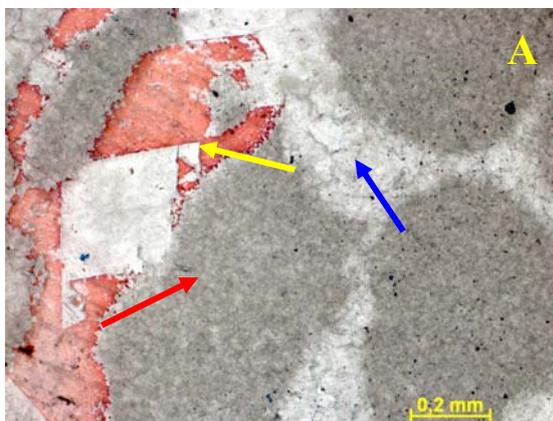


Figura nº46 Fotomicrografia mostrando que apesar da intensa dolomitização da rocha, esta não mascarou a textura original da rocha, sendo possível diferenciar grão (seta vermelha) de cimento (seta azul). Seta amarela indicando porosidade secundária cimentada por calcita (em vermelho) e dolomita (cristal romboédrico). Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade:711,61m.

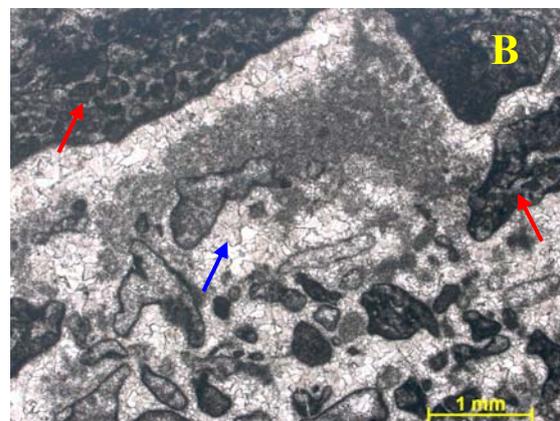


Figura nº47 Detalhe da fácies de dolorrudito com matriz dolarenítica. Notar que a dolomitização não mascarou a textura original da rocha, sendo possível diferenciar grãos (setas vermelhas) de cimento (seta azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade:711,22m.

Com o auxílio de análises de catodoluminescência e isotópicas, constatou-se a existência de duas fases de dolomitização.

A primeira está relacionada a um evento exposição observado através de estudos regionais realizados por Dardenne (1981) e Nobre-Lopes (2005), durante o qual ocorreram também processos de carstificação. A dolomita correspondente a esta fase apresenta luminescência muito baixa a ausente.

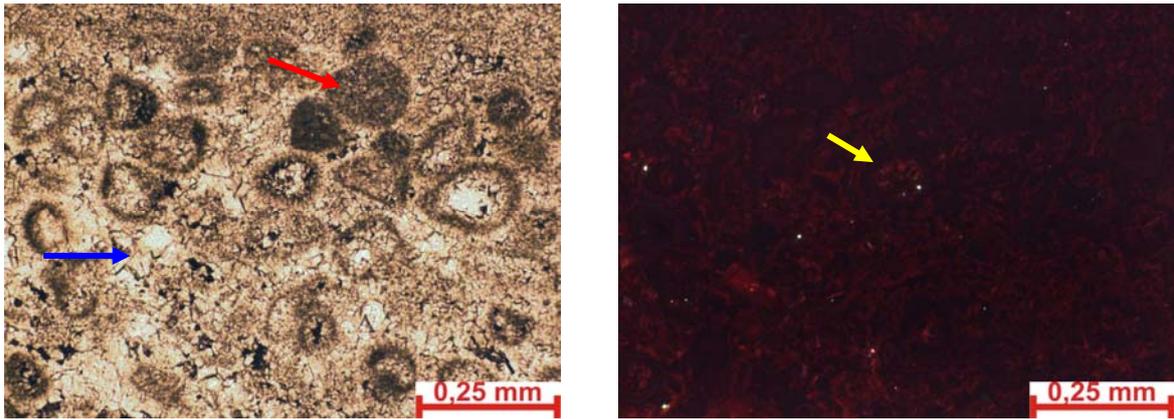


Figura nº48 A – Detalhe do dolarenito. Seta vermelha indicando grão carbonático e seta azul indicando cimento dolomítico. Rocha intensamente recristalizada. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência do dolarenito. Mesma visada da foto A. Pode-se observar que a franja de cimento ao redor dos grãos (seta amarela) apresenta baixa luminescência, e tanto os grãos quanto o cimento de dolomita que oblitera os poros apresentam luminescência semelhante, mais intensa do que a franja de cimento. Profundidade:710,87m.

Após a subida do nível do mar as cavidades geradas pela dissolução meteórica foram preenchidas por sedimento carbonático fino. Este sedimento fino encontra-se também dolomitizado. Porém imagens de catodoluminescência e dados isotópicos mostram que esta dolomita formou-se em um segundo evento diagenético.

As bordas das cavidades mostram crescimento de cristais de dolomita zonados, com luminescência moderada a baixa. A dolomita correspondente ao sedimento fino mostra-se mais luminescente, e finos cristais romboédricos de dolomita, também zonados, se destacam nas imagens de catodoluminescência.

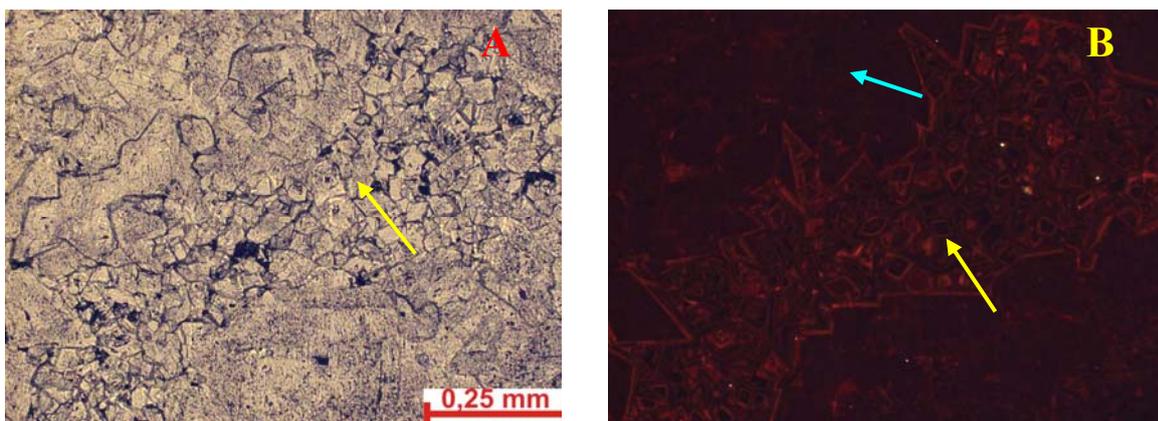


Figura nº49 A – Seta amarela indicando cristais finos de dolomita, os quais correspondem ao sedimento fino que encontra-se preenchendo cavidades. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando cristais finos de dolomita, os quais apresentam formas romboédricas e encontram-se zonados. Seta azul indicando dolomita correspondente à matriz da rocha, apresentando luminescência muito baixa. Profundidade:713,30m.

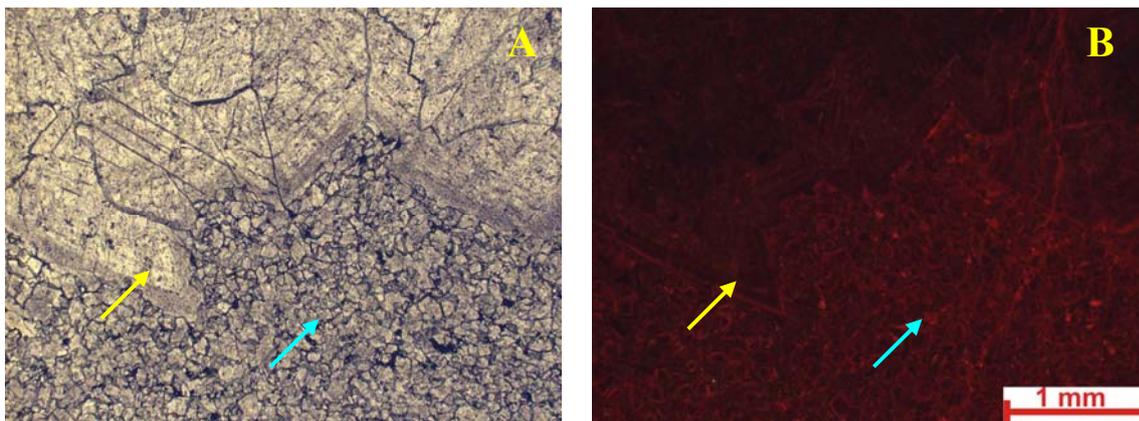


Figura nº50 A – Seta amarela indicando cristais de dolomita crescendo na borda da cavidade preenchida por sedimento fino dolomitizado (seta azul). Fotomicrografia, P//. B -Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando cristal de dolomita zonado presente na borda da cavidade preenchida por sedimento fino (seta azul). Profundidade:712,33m.

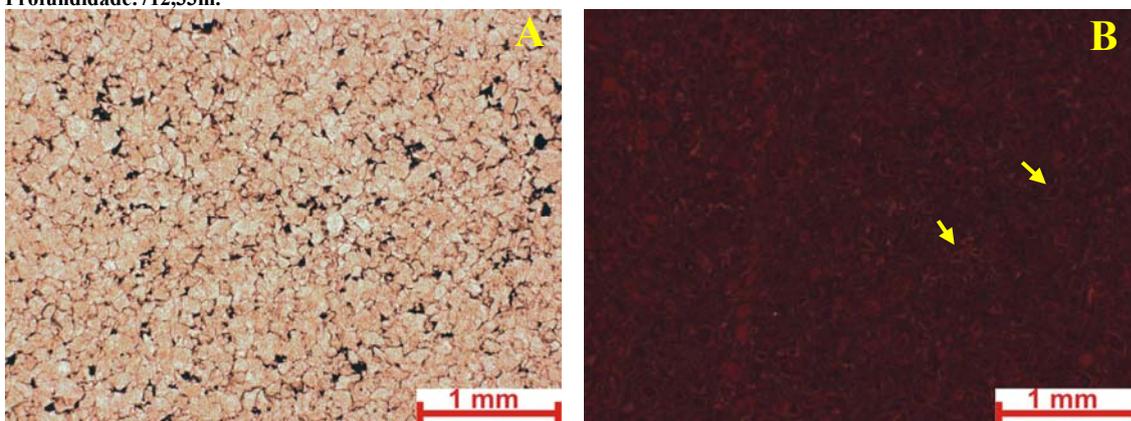


Figura nº51 A – Detalhe do sedimento carbonático fino de preenchimento de cavidade dolomitizado. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Detalhe dos cristais romboédricos de dolomita zonados (setas). Profundidade:712,33m.

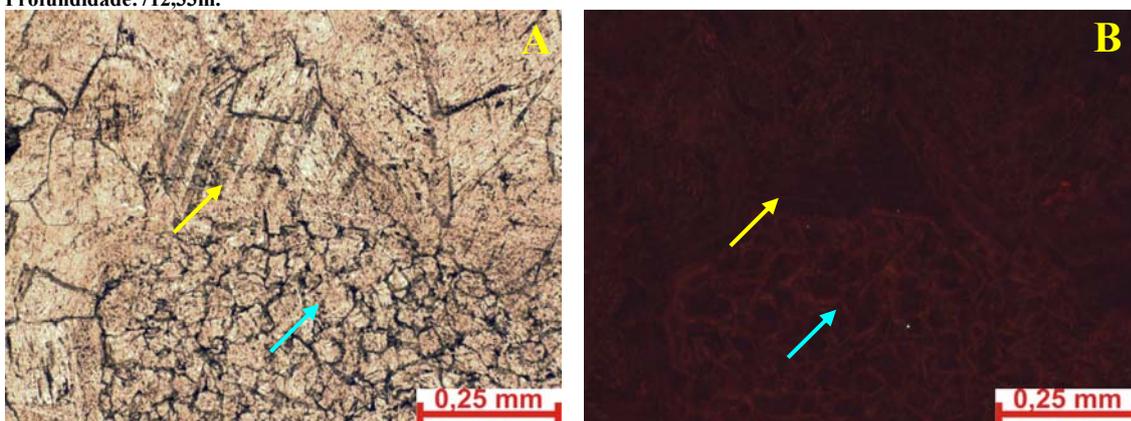


Figura nº52 A – Seta amarela indicando cristais de dolomita crescendo na borda da cavidade preenchida por sedimento fino dolomitizado (seta azul). Fotomicrografia, P//. B -Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando cristal de dolomita zonado presente na borda da cavidade preenchida por sedimento fino (seta azul). Profundidade:713,12m.

Compactação química

Foi observada a presença de estilolitos horizontais a subhorizontais em amostras do testemunho, os quais gerados pelo processo de soterramento e compactação. Estes estilolitos ocorrem preferencialmente no contato entre camadas ou no limite entre cavidades (preenchidas por sedimento fino) e a rocha. Em lâmina delgada observa-se que há concentração de matéria orgânica no plano dos estilolitos, a qual encontra-se frequentemente piritizada.

Ocorrem também estilolitos verticais e subverticais, sendo que neste caso eles são formados pela ação de esforços tectônicos.



Figura nº53 Foto de detalhe mostrando estilolitos subhorizontais. Profundidade: 713,08m.



Figura nº54 Foto de detalhe mostrando estilolitos subhorizontais no contato entre cavidades preenchidas por sedimento fino e a matriz da rocha. Profundidade: 713,48m.



Figura nº55 Foto de detalhe mostrando estilolitos vertical. Profundidade: 713,48m.

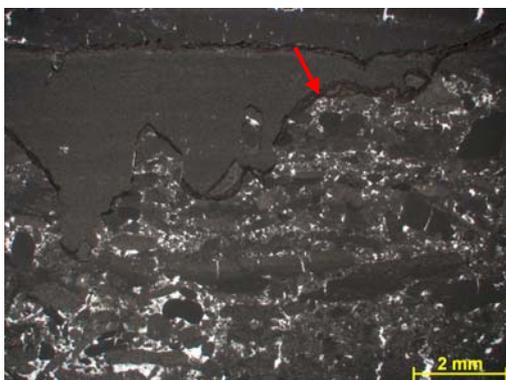


Figura nº56 Seta indicando estilolito no contato entre dolarenito muito grosso e dolarenito fino laminado. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m.

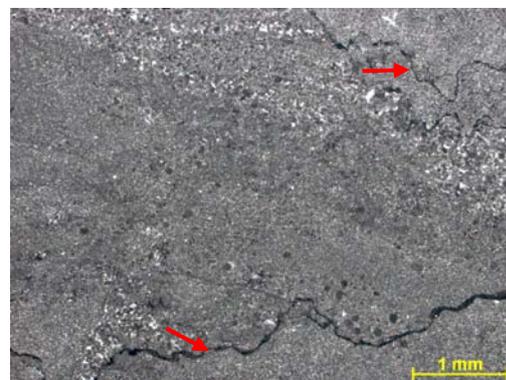


Figura nº57 Setas indicando estilolitos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,39m.

Fraturamento e dissolução na mesodiagênese

Os carbonatos da Formação Sete Lagoas mostram-se intensamente cimentados, sendo rara a presença de porosidade primária, a qual está presente em alguns níveis de dolarenito. Estes níveis contendo alguma porosidade primária preservada tornaram-se então o caminho preferencial para a passagem de fluidos corrosivos. Alguns níveis de dolarenito sofreram então um processo de dissolução mais intenso.

Fraturas, microfraturas e estilólitos atuaram também como caminho preferencial para a percolação destes fluidos, sendo comum observar dissolução ao longo de planos de fraturas e de estilólitos, assim como em suas proximidades. Foram geradas através deste processo porosidade secundária dos tipos intercrystalina, vugular, móldica e do tipo *channel*.

Através do estudo de lâminas delgadas, pode-se observar pelo menos dois eventos principais de fraturamento e dissolução, ambos na mesodiagênese.

No primeiro evento foram geradas fraturas e microfraturas, além de porosidade secundária dos tipos intercrystalina, móldica, intragranular e vugular próximo às fraturas e planos de estilólitos. Tanto as fraturas quanto porosidade existente foram intensamente cimentadas por calcita blocosa. Este evento ocorreu de forma mais intensa entre 709 e 710 metros de profundidade.

No segundo evento ocorreu fraturamento e posterior dissolução da rocha, sendo que as fraturas encontram-se abertas ou localmente cimentadas por dolomita. Ocorre também dissolução ao longo de plano de estilólitos. Porosidade secundária dos tipos intercrystalina e vugular foram geradas, as quais encontram-se parcialmente cimentadas por dolomita de cristalinidade grossa a muito grossa, dolomita-em-sela e localmente quartzo.

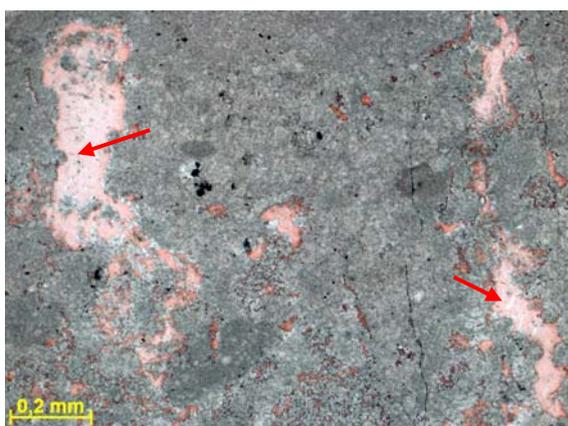


Figura nº58 Setas indicando porosidade secundária cimentada por calcita blocosa. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m.

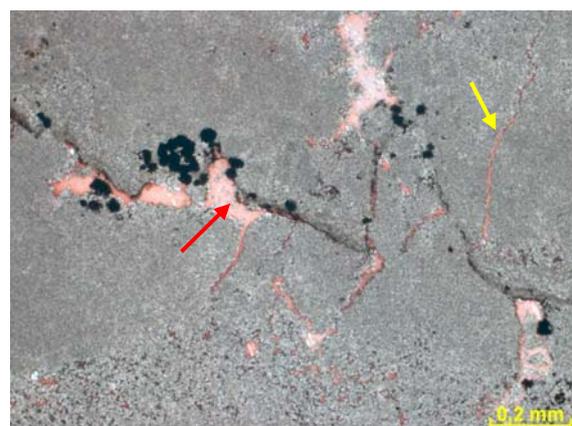


Figura nº59 Seta vermelha indicando porosidade secundária próxima a estilólito, cimentada por calcita blocosa. Seta amarela indicando microfratura cimentada por calcita. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m.



Figura nº60 Foto de detalhe mostrando fratura aberta (seta vermelha) com porosidade vugular associada (seta amarela). Notar que a dissolução ocorreu de forma mais intensa ao longo do plano da fratura e nas suas proximidades. Profundidade: 714,33m.

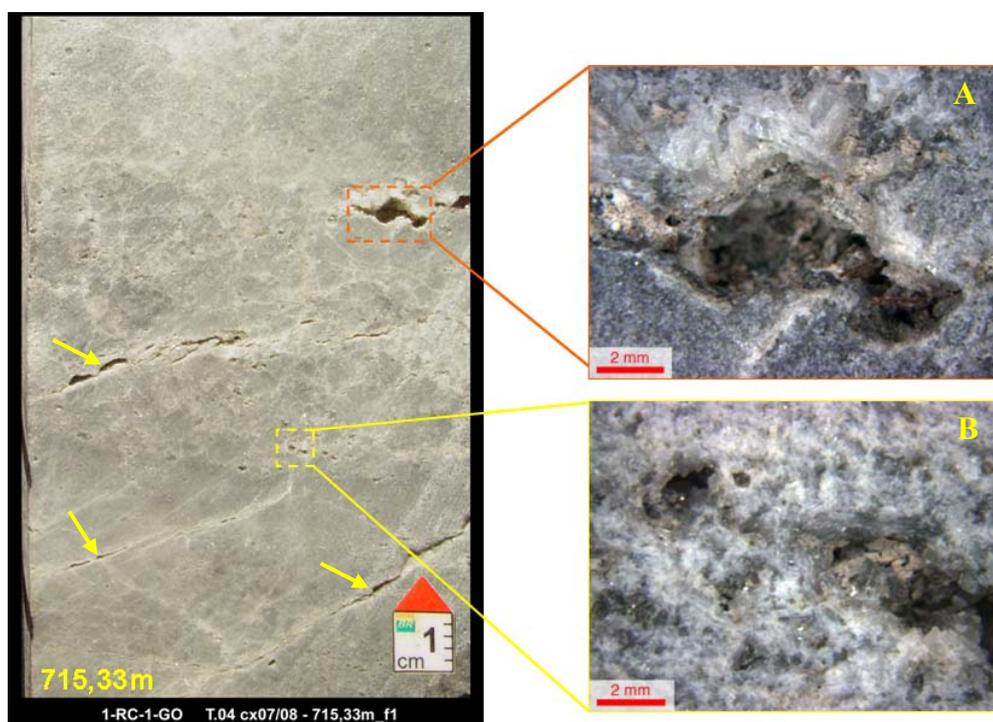


Figura nº61 Foto de detalhe mostrando porosidade secundária dos tipos vugular (Fotos A e B), intercrystalina (Foto B) e porosidade em fraturas (setas). Profundidade: 715,33m.

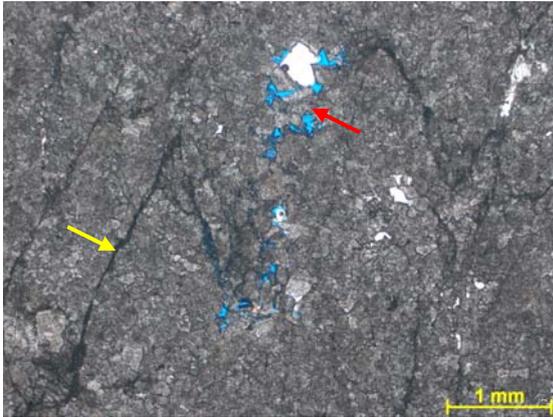


Figura nº62 Seta amarela indicando estilólito. Seta vermelha indicando porosidade secundária em plano de estilólito e próximo a ele. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 714,93m.

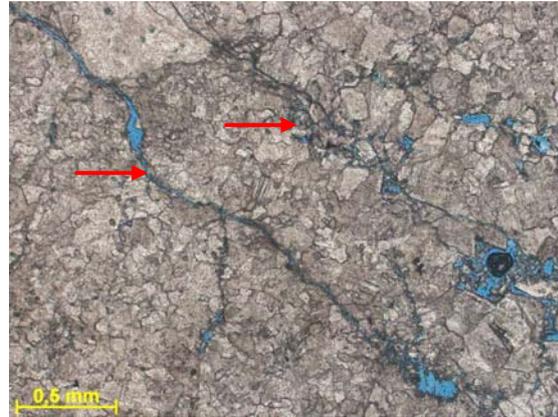


Figura nº63 Detalhe das fraturas com porosidade secundária associada (em azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m.

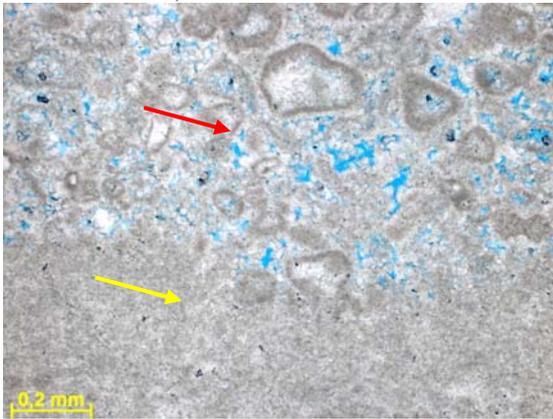


Figura nº64 Contato entre dolarenito intracrístico com porosidade (seta vermelha) e dolarenito peloidal (seta amarela). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

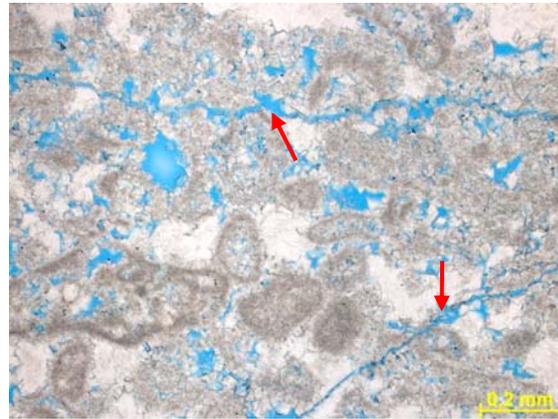


Figura nº65 Detalhe das fraturas abertas em nível de dolarenito intracrístico intensamente dissolvido. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 710,87m.

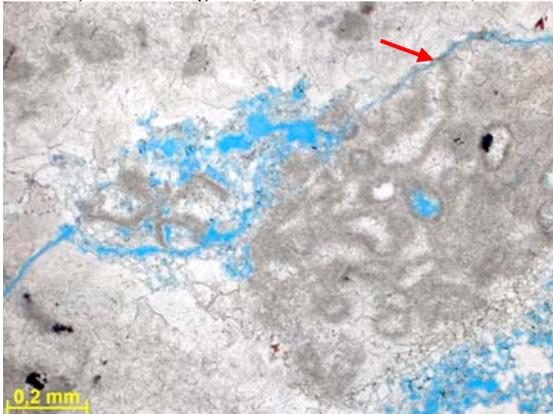


Figura nº66 Detalhe da porosidade secundária, gerada por processo de dissolução (em azul). Seta indicando fratura aberta. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,22m.

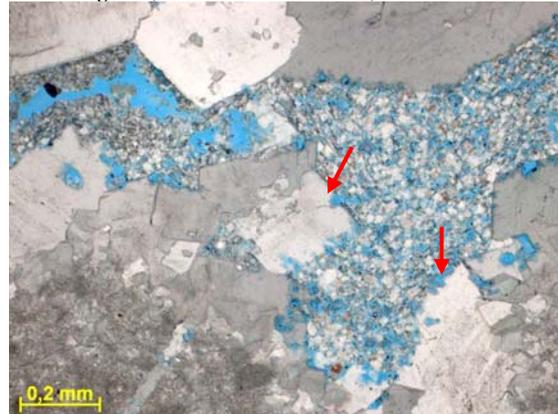


Figura nº67 Detalhe dos cristais de dolomita com as bordas dissolvidas. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,22m.

Cimentação na mesodiagênese

Calcita blocosa

Cimento calcítico blocoso pode ser observado principalmente no intervalo que vai do nível com intensa oxidação, no topo do testemunho, até aproximadamente um metro abaixo.

Esta cimentação está relacionada a um primeiro evento de fraturamento durante a mesodiagênese. A cimentação ocorreu após a compactação química, visto que porosidade gerada por dissolução ao longo de planos de estilólitos encontra-se também cimentada por calcita blocosa. Fraturas subverticais e inclinadas, além de porosidade secundária dos tipos vugular, intercrystalina e móldica, encontram-se cimentadas por calcita. Porosidade primária do tipo intergranular, também cimentada por calcita blocosa, é observada em níveis de dolarenito de granulação mais grossa.

Em catodoluminescência os cristais de calcita apresentam-se homogêneos, ou seja, não-zonados. Isto indica que a composição do fluido mineralizante não mudou durante a cristalização, a qual provavelmente se deu de forma rápida. A luminescência é baixa, geralmente um pouco mais intensa que a da rocha dolomítica.

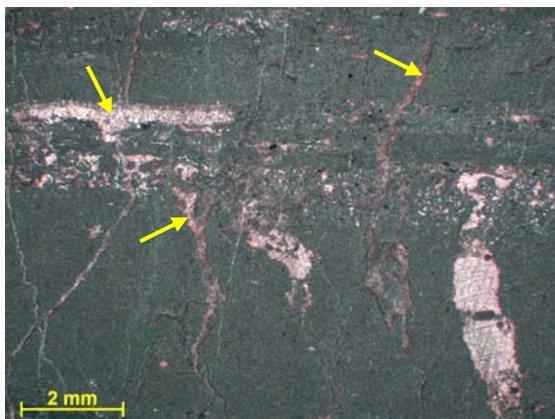


Figura nº68 Setas indicando fraturas e porosidade secundária do tipo vugular cimentados por calcita. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,73m.

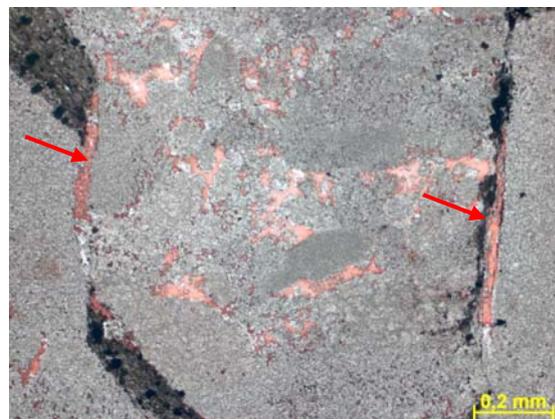


Figura nº69 Setas indicando porosidade secundária cimentada por calcita em plano de estilólito. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,34m.

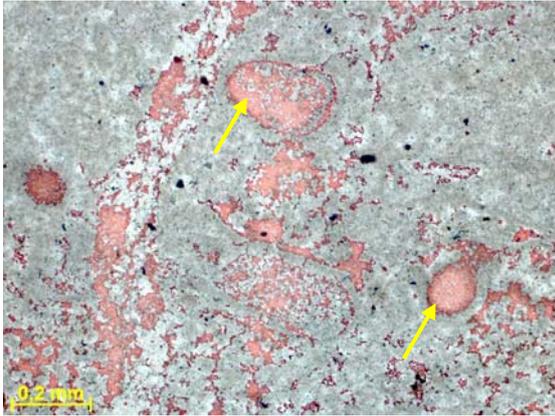


Figura nº70 Detalhe da porosidade secundária cimentada por calcita (em vermelho). Setas indicando porosidade móldica cimentada. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,73m.

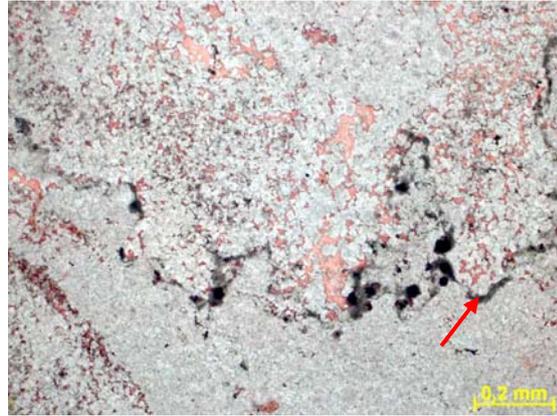
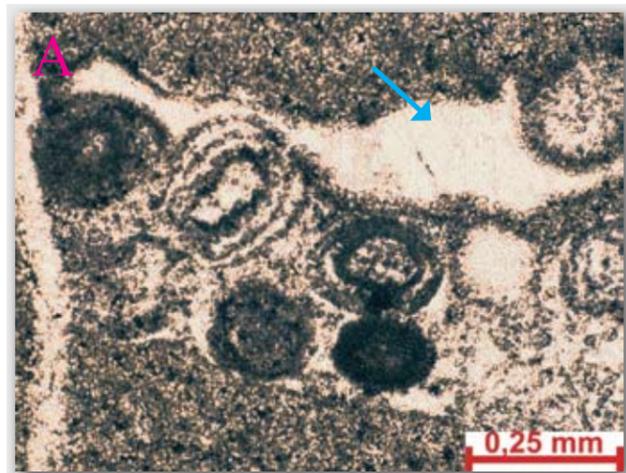
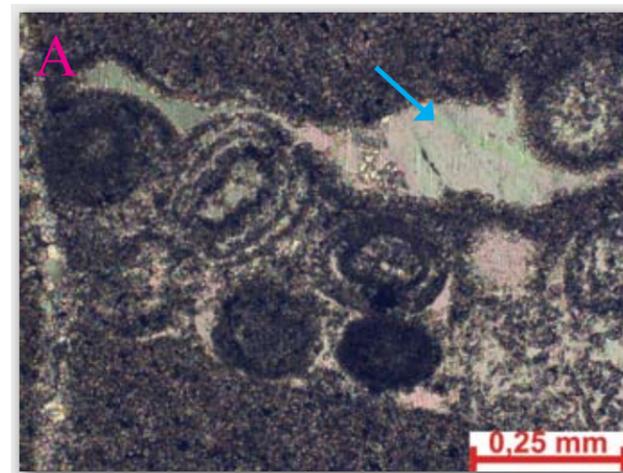


Figura nº71 Detalhe da porosidade secundária dos tipos intercrystalina e microvugular cimentadas por calcita (cor vermelha) próximo a estilolito (seta). Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 709,39m.

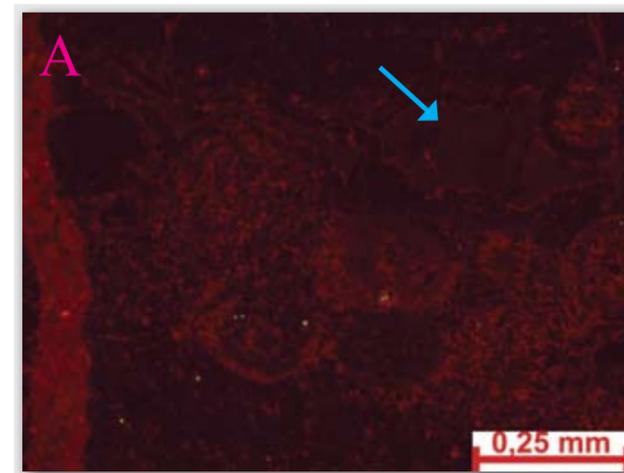
Figura 72: Cimentação por calcita



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



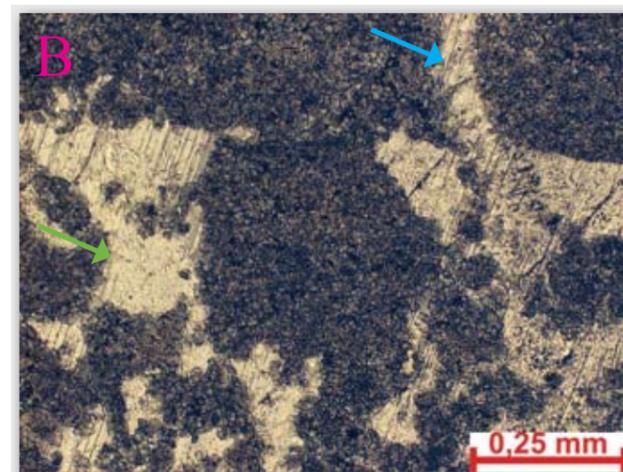
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



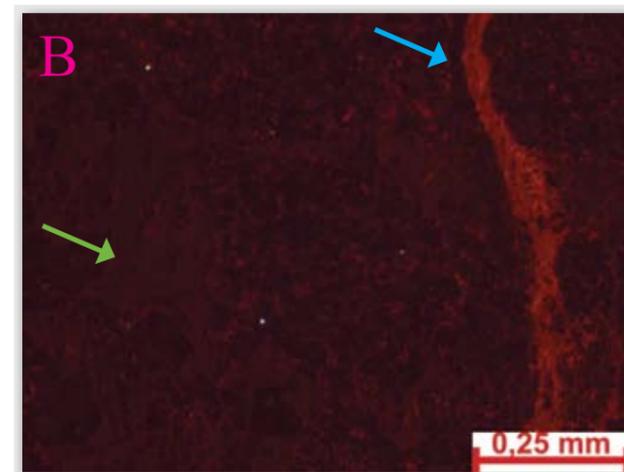
Fotomicrografia de catodoluminescência.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



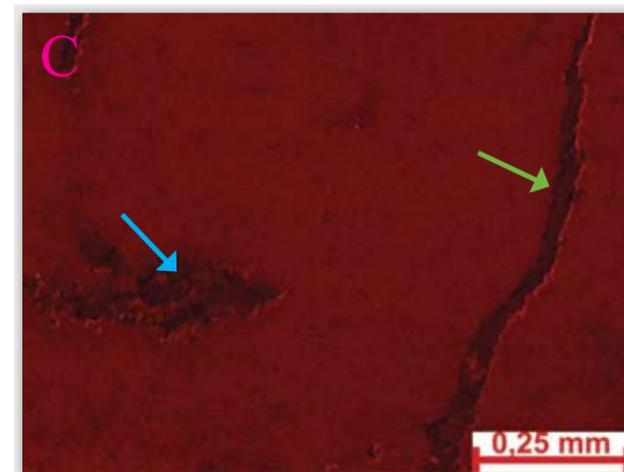
Fotomicrografia de catodoluminescência.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



Fotomicrografia de catodoluminescência.

Fotomicrografias mostrando cimentação por calcita blocosa em lâmina delgada (polarizadores paralelos e cruzados) e em catodoluminescência.

A - Seta indicando cimento de calcita blocosa. Notar que os cristais de calcita não são zonados e apresentam luminescência menor que a da matriz da rocha. Profundidade: 709,73m.

B - Setas verdes indicando cimento de calcita blocosa com luminescência um pouco menor que a da matriz da rocha. Setas azuis indicando calcita cimentando fratura, apresentando luminescência maior. Profundidade: 709,73m.

C - Setas azuis indicando porosidade vugular cimentada por calcita blocosa (baixa luminescência) e setas verdes indicando fratura cimentada por também pela calcita blocosa. Profundidade: 709,39m.

Notar que a fratura observada na figura B ocorreu após a cimentação por calcita blocosa (baixa luminescência), pois além de cortar o cimento de calcita, ela encontra-se cimentada por outra fase calcítica, a qual apresenta luminescência mais alta. Já a fratura observada na figura C é anterior à cimentação por calcita blocosa (baixa luminescência), visto que encontra-se cimentada por esta.

Dolomita

Abaixo do nível com maior quantidade de cimentação calcítica, ou seja, a partir da profundidade de aproximadamente 710 metros até a base do testemunho, ocorre cimentação por dolomita de cristalinidade grossa a muito grossa e dolomita-em-sela. Esta cimentação ocorre somente em porosidade secundária do tipo vugular, obliterando parcial ou totalmente a porosidade, e por vezes em fraturas, estando relacionada ao segundo evento de fraturamento ocorrido na mesodiagênese.

Em catodoluminescência os cristais de dolomita de cimentação aparecem em tons de vermelho mais escuro (levemente púrpura), e em geral são homogêneos, sendo que localmente observa-se zonação na borda dos cristais.

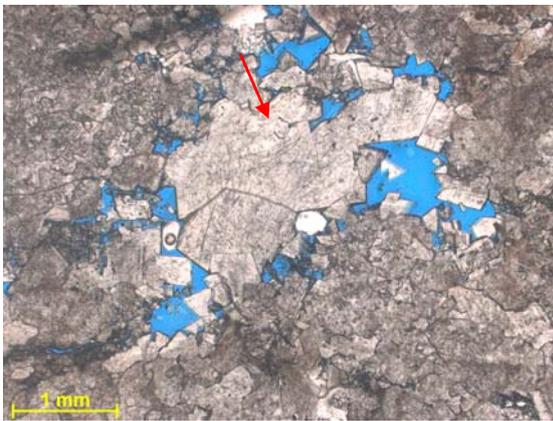


Figura nº73 Seta indicando cimento de dolomita em porosidade vugular. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,10m.



Figura nº74 Seta indicando cimento de dolomita-em-sela. Fotomicrografia, polarizadores cruzados (PX). Profundidade: 712,33m.

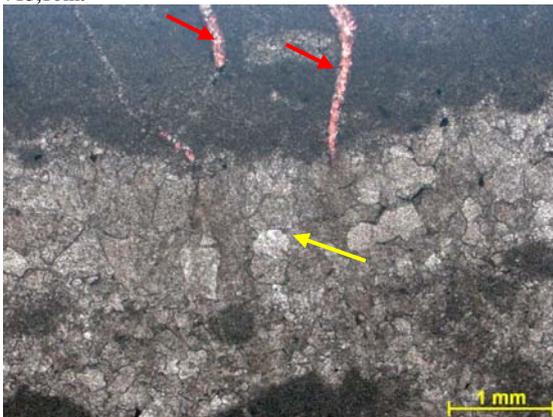


Figura nº75 Setas indicando fraturas cimentadas por calcita na porção de dololutito. Notar que estas terminam no contato com a porção cimentada por dolomita (seta amarela). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,61m.



Figura nº76 Detalhe do cimento dolomítico de cristalinidade muito grossa. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 716,68m.

Figura 77: Cimentação por dolomita e dolomita-em-sela

Fotomicrografias mostrando cimentação por dolomita e dolomita-em-sela em lâmina delgada (polarizadores paralelos e cruzados) e em catodoluminescência.

A - Seta indicando cimento de dolomita. Observar cristais zonados, crescendo a partir das bordas do poro em direção ao centro. Profundidade: 714,93m.

B - Setas indicando cimento de dolomita. Observar cristais zonados crescendo a partir das bordas em direção ao centro do poro. Profundidade: 715,30m.

C - Setas indicando cimento de dolomita-em-sela. Notar que o cristal de dolomita localmente apresenta zonação. Profundidade: 716,68m.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



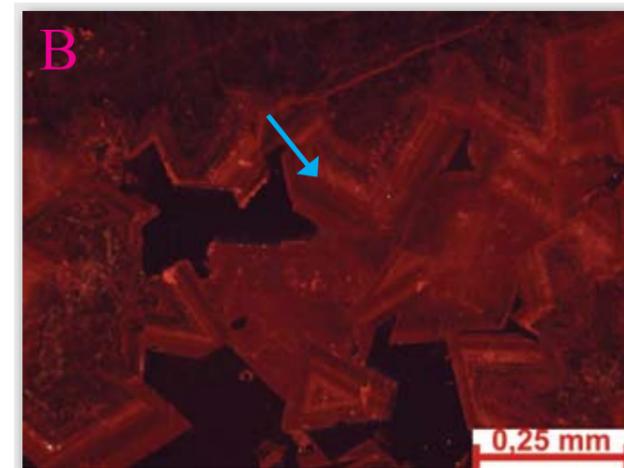
Fotomicrografia de catodoluminescência.



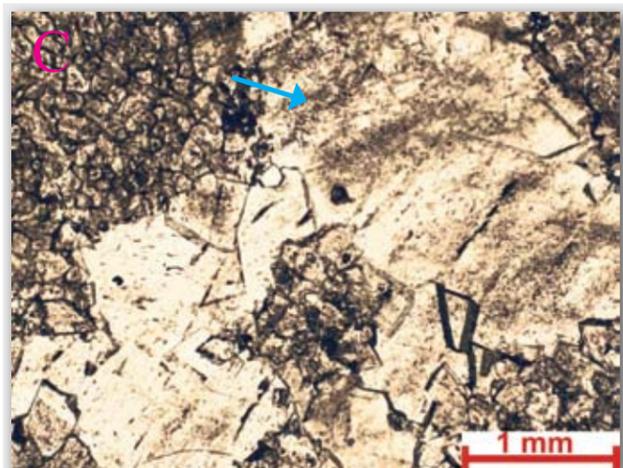
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



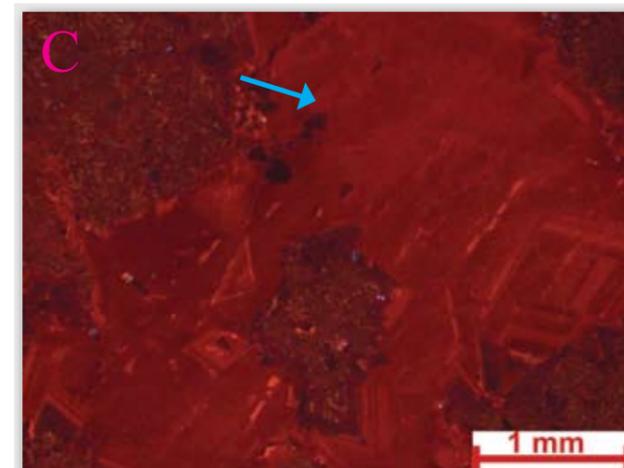
Fotomicrografia de catodoluminescência.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



Fotomicrografia de catodoluminescência.

Quartzo

Cristais de quartzo ocorrem pontualmente, preenchendo parcial ou totalmente pequenos poros da rocha, correspondendo então a última fase de cimentação. Por vezes observa-se processo de silicificação ao longo de planos de estilólitos, o que indica que o fluido mineralizante percolou também através destes.

O cimento de quartzo em porosidade vugular foi observado apenas na base do testemunho 4, no intervalo de aproximadamente 715 metros até a 717 metros.

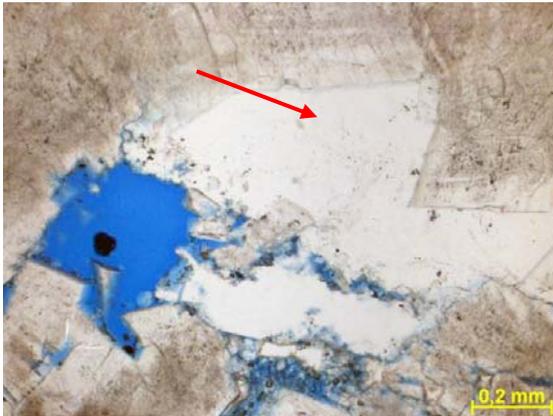


Figura nº78 Seta indicando cimento de quartzo. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,30m.



Figura nº79 Seta indicando cristal de quartzo cimentando parcialmente a porosidade. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 715,17m.

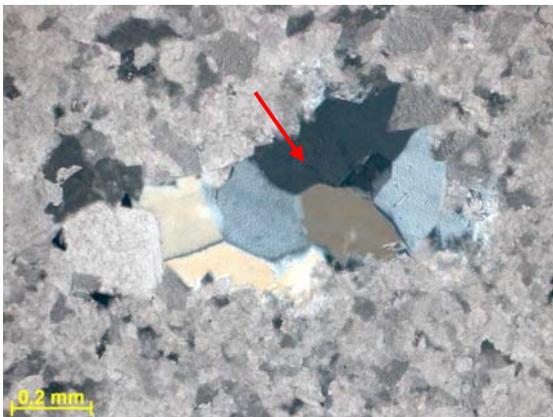


Figura nº80 Seta indicando cimento de quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 715,17m

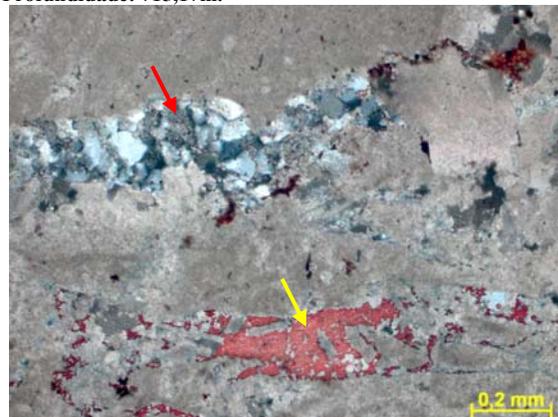


Figura nº81 Seta vermelha indicando silicificação próxima a plano de estilólito. Seta amarela indicando porção calcítica. Lâmina tingida por solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 711,22m

Sequência diagenética

Através dos estudos petrográficos pode-se construir uma sequência de eventos diagenéticos que atuaram nos carbonatos da Formação Sete Lagoas.

Inicialmente estes carbonatos foram submetidos a processos de cimentação bastante precoce, provavelmente de origem meteórica, a qual sustentou o arcabouço da rocha evitando que os grãos sofressem compactação mecânica durante o soterramento. Estes cimentos ocorrem tanto na forma de franja isópaca de cristais finos prismáticos ao redor dos grãos como na forma de cimento equante preenchendo parcial ou totalmente os poros. Estas fases de cimentação, originalmente calcíticas, foram posteriormente dolomitizadas.

Uma primeira fase de dolomitização ocorre nas rochas do topo da Formação Sete Lagoas, sendo que logo em seguida houve carstificação sendo possível identificar cavidades e possíveis espeleotemas, além de níveis com feições de exposição. Estes processos diagenéticos estão relacionados à processo de descida da lâmina d'água.

Com a subida da lâmina d'água sedimentos carbonáticos micríticos, e localmente arenosos, foram depositados sobre o sistema cárstico, também preenchendo as cavidades. Estes sedimentos foram dolomitizados (segunda fase de dolomitização). A dolomitização não mascarou a textura original da rocha, sendo possível reconhecer diferentes tipos de grãos, cimentos e matriz.

Como processo diagenético seguinte está a compactação química, o qual gerou estilólitos e filmes de dissolução.

Pôde-se reconhecer dois eventos de fraturamento e dissolução, os quais ocorreram após a compactação química, na mesodiagênese. No primeiro evento houve, além das fraturas, a geração de porosidade secundária, a qual foi posteriormente cimentada por calcita blocosa. O segundo evento gerou fraturas e microfraturas abertas, localmente cimentadas por dolomita. Um processo de dissolução tardio gerou porosidade secundária dos tipos vugular e intercrystalina principalmente próximo às fraturas e estilólitos. Esta porosidade foi parcialmente cimentada por dolomita de cristalinidade grossa a muito grossa, dolomita-em-sela e localmente quartzo. Este evento de dissolução e posterior cimentação pode estar relacionado a ascensão de fluidos hidrotermais.

Cristais de pirita formaram-se em planos de estilólitos e também de forma dispersa na rocha.

A tabela abaixo resume os principais eventos diagenéticos observados nos carbonatos da Formação Sete Lagoas, presentes no testemunho 4 do poço 1-RC-1-GO.

Tabela nº 3 Resumo dos principais eventos diagenéticos observados através do estudo petrográfico realizado nos carbonatos da Formação Sete Lagoas presentes no testemunho 4 do poço 1-RC-1-GO.

	Eventos Diagenéticos	Tempo	
		Eodiagênese	Mesodiagênese
Associação Eodiagenética	Franja de cimento dolomítico (possivelmente meteórico, posteriormente dolomitizado)	●	
	Cimento dolomítico equante (possivelmente meteórico, posteriormente dolomitizado)	●	
	Dolomitização	●	
	Carstificação	●	
	Compactação química		●
Associação Mesodiagenética	Faturamento		●
	Dissolução		●
	Cimentação por calcita blocosa		●
	Pirita framboidal (em planos de estilólitos ou dispersas)		●
	Cimentação por dolomita e dolomita-em-sela		●
	Cimentação por quartzo		●
	Migração de betume		●
	Piritização do betume		●
			●
			●

5.3 Formação Lagoa do Jacaré

A Formação Lagoa do Jacaré é aflorante na região de Alvorada do Norte, sendo constituída pela intercalação de níveis pelíticos e carbonáticos.

As amostras de calha e o perfil de raios-gama mostram que a Formação Lagoa do Jacaré apresenta aproximadamente 370 metros de espessura nesta região (Figura 18). Pacotes carbonáticos, com espessuras entre 10 e 20 metros, encontram-se intercalados com níveis pelíticos.

Embora o poço tenha atravessado grande espessura da Formação Lagoa do Jacaré, apenas os intervalos de 103 a 112 m e de 234 a 243 m de profundidade foram testemunhados, e serviram de base para os estudos petrográficos na área.

5.3.1 Fácies de calcirrudito intraclástico

A fácies de calcirrudito intraclástico, de cor cinza claro a cinza médio, é composta por intraclastos carbonáticos e matriz calcarenítica peloidal. Os intraclastos são fragmentos de calcarenito e calcilito peloidal. Estes apresentam-se subangulosos a subarredondados, em grande parte alongados e delgados, com o tamanho variando entre areia grossa e matacão, estando por vezes orientados. A matriz é predominantemente peloidal, porém localmente apresenta oolitos e intraclastos carbonáticos tamanho areia média a muito grossa.

O contato entre os grãos é dos tipos pontual e flutuante, indicando que o processo de cimentação ocorreu de forma precoce, evitando a compactação mecânica dos grãos.

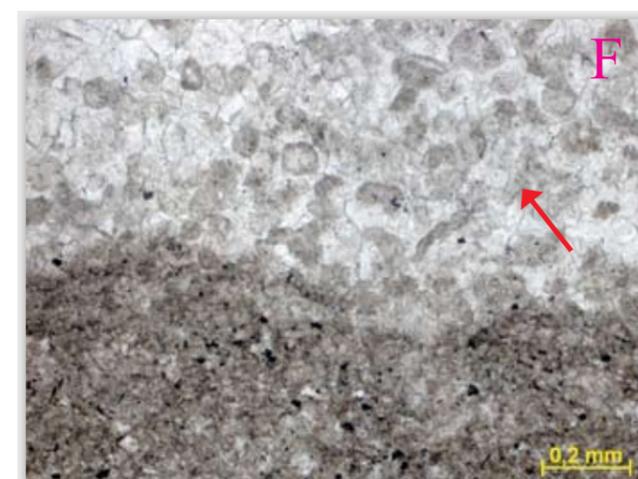
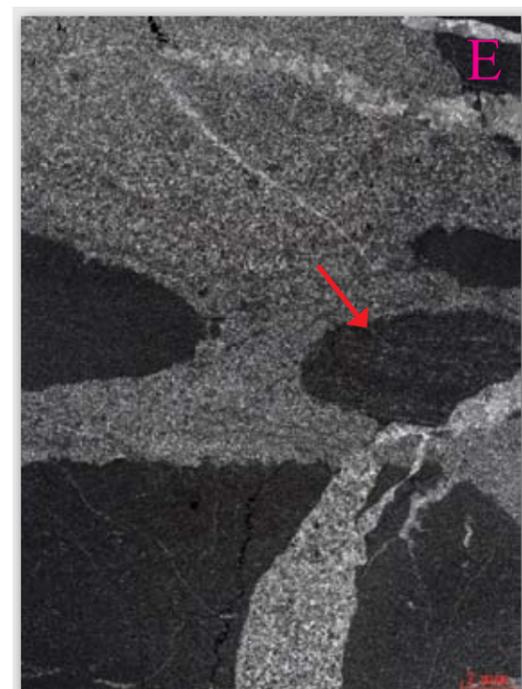
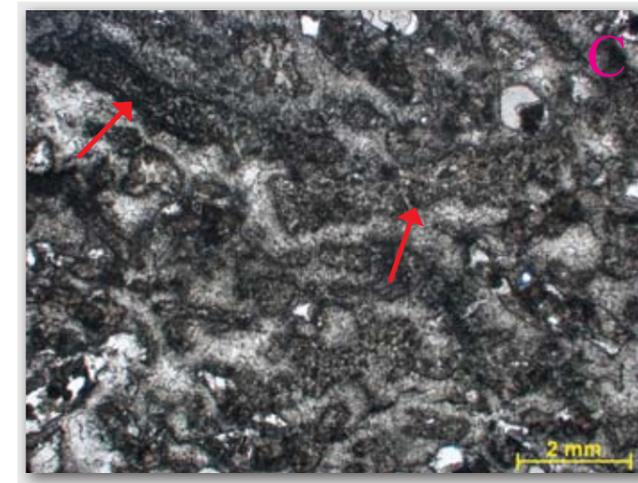
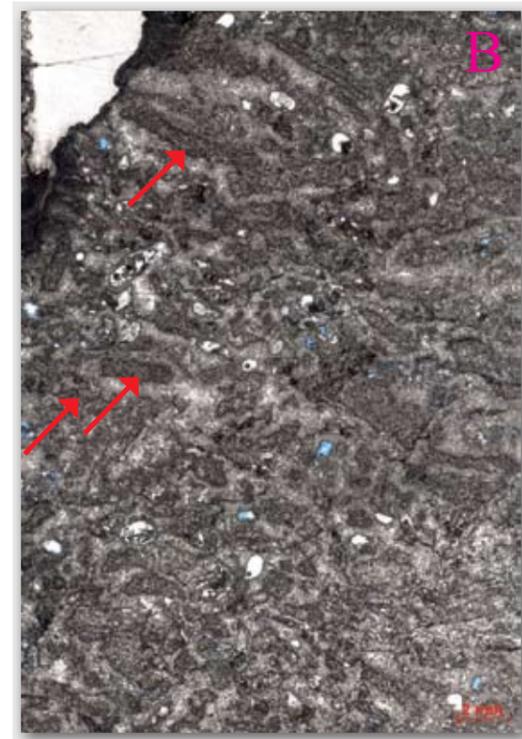
A rocha encontra-se intensamente cimentada por calcita do tipo mosaico grosso e calcita blocosa. É comum a ocorrência de franja isópaca de cimento calcítico ao redor dos fragmentos intraclásticos, tratando-se possivelmente de cimentação marinha (difícil reconhecimento devido à intenso processo de neomorfismo).

Observa-se processo de dissolução tardio, o qual ocorreu após o evento de compactação química. A dissolução ocorre preferencialmente ao longo de planos de estilolitos, gerando porosidade do tipo canal, e próximo a estes a dissolução ocorre de forma mais intensa, gerando porosidade dos tipos móldica e vugular. A porosidade secundária encontra-se parcial a totalmente cimentada por cristais de calcita blocosa e dolomita-em-sela.

É comum a presença de finos cristais de pirita dispersos na rocha, concentrados em estilolitos e filmes de dissolução ou associados à cimentação por calcita e dolomita-em-sela.

Ocorrem estilolitos subhorizontais em sua maioria, mas também subverticais, além fraturas verticais, subverticais e subhorizontais cimentadas por calcita, localmente com pirita associada.

Figura 82: Calcirrudito intraclástico



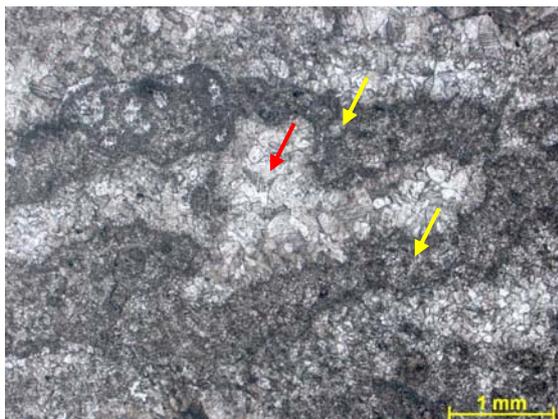


Figura nº83 Setas amarelas indicando intraclastos carbonáticos e seta vermelha indicando cimento de calcita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,41m.

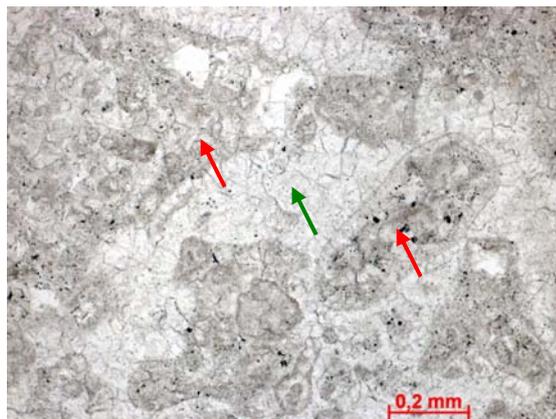


Figura nº84 Detalhe dos intraclastos carbonáticos (setas vermelhas) cimentados por calcita (seta verde). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m.

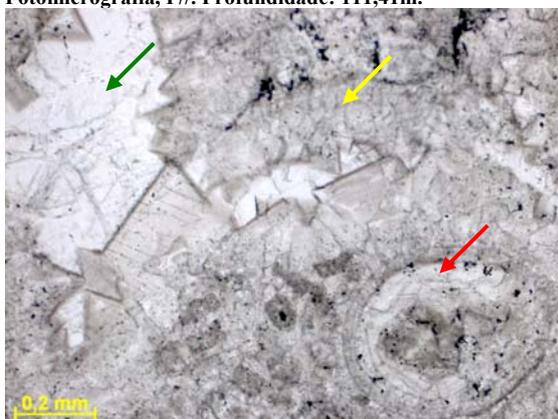


Figura nº85 Seta vermelha indicando oolito (notar a presença de pelóides ao lado), seta amarela indicando cimento calcítico nas bordas e seta verde indicando cimento calcítico blocoso no centro do poro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m.



Figura nº86 Observar contatos flutuantes e pontuais entre os grãos, indicando que a cimentação por calcita ocorreu na eodiagenese, visto que não há compactação dos grãos. Seta indicando estilolito, mostrando que a compactação química ocorreu após a cimentação. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,41m.

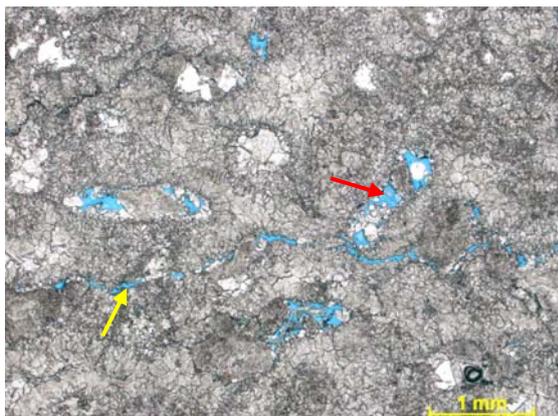


Figura nº87 Detalhe da porosidade secundária (em azul). Seta vermelha indicando porosidade do tipo canal e seta amarela indicando porosidade móldica parcialmente cimentada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m.

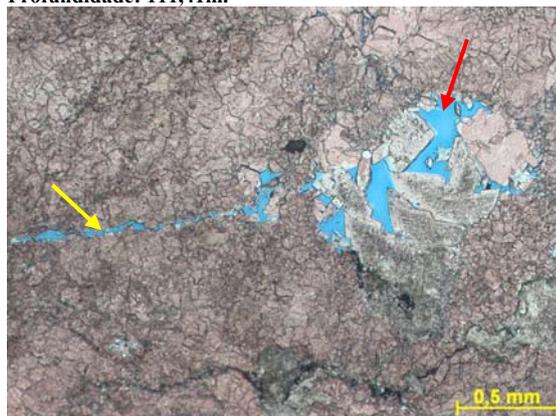


Figura nº88 Seta amarela indicando porosidade secundária do tipo canal e seta vermelha indicando porosidade vulgular parcialmente cimentada por dolomita-em-sela e calcita blocosa. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m.

5.3.2 Fácies de calcarenito intraclástico peloidal

A fácies de calcarenito intraclástico peloidal apresenta coloração cinza claro a médio, e sua granulação varia de areia muito fina a areia grossa, por vezes muito grossa, com laminação incipiente, localmente apresentando estratificações cruzadas. Os intraclastos carbonáticos são constituídos por fragmentos de calcarenito e calcilito peloidal. Estes apresentam-se subarredondados, localmente alongados e delgados. Ocorrem também alguns oolitos dispersos ou concentrados em delgados níveis ou porções. O contato entre os grãos é dos tipos pontual e flutuante.

Em alguns níveis de granulação mais fina há predominância de pelóides, e a fácies torna-se então calcarenito peloidal intraclástico ou, por vezes, apenas calcarenito peloidal. É comum a presença de delgadas intercalações de calcilito.

No intervalo de 107,75 a 107, 58 m observa-se textura de granocrescência. Neste caso calcarenito fino grada para calcirrudito com fragmentos tamanho seixo.

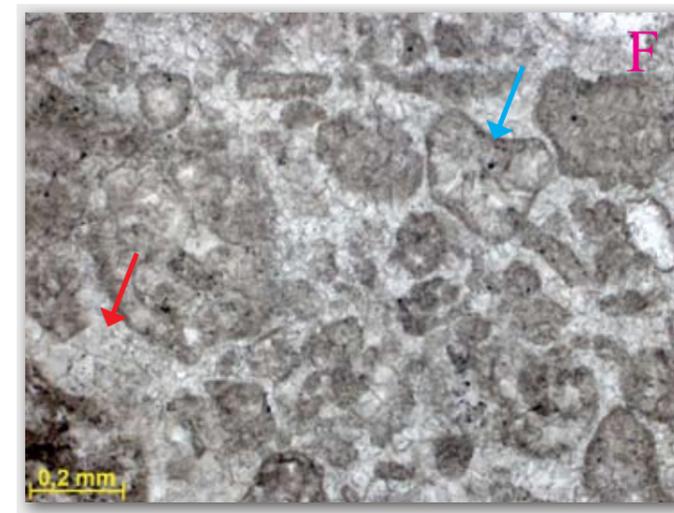
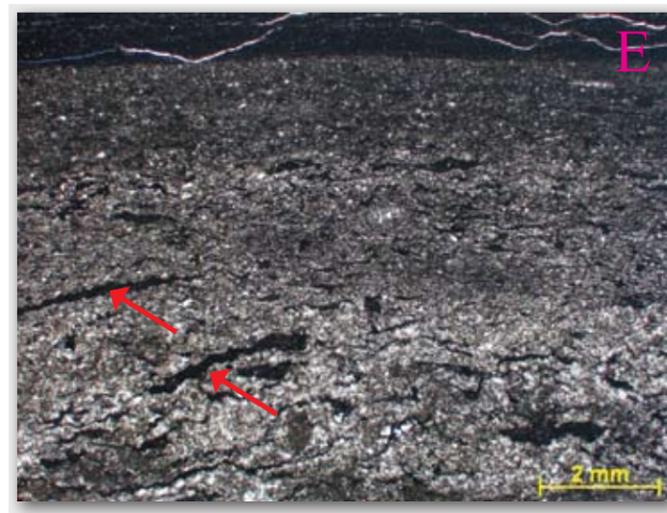
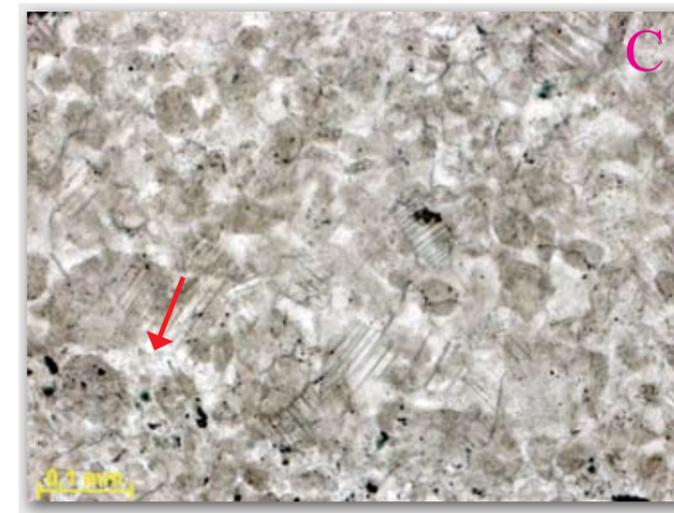
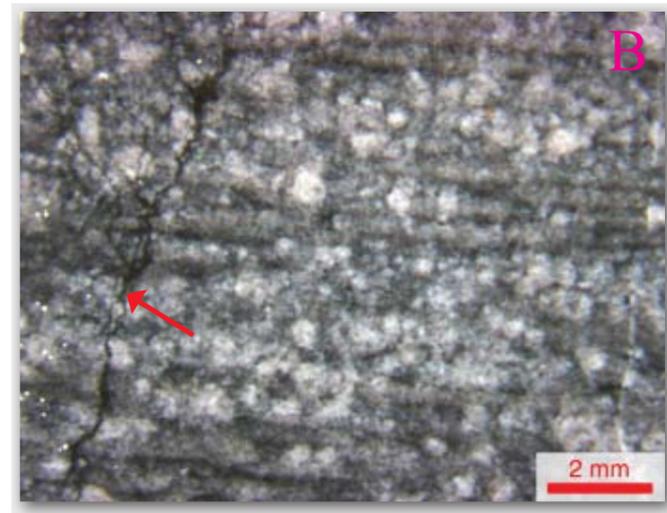
Observa-se tanto macro como microscopicamente a ocorrência de estruturas de deformação sin-sedimentar, como laminações encurvadas e estruturas de escape de fluido, sendo comum a presença de vulcões de areia.

Esta fácies encontra-se intensamente recristalizada e cimentada por calcita do tipo mosaico grosso e calcita blocosa. Por vezes observa-se a ocorrência cimento calcítico na borda dos poros, aonde os cristais de calcita crescem a partir da parede dos grãos em direção ao centro do poro.

Ocorre na fácies de calcarenito intraclástico peloidal processo de dissolução tardio, pós-compactação química. A dissolução ocorre preferencialmente ao longo de planos de estilolitos, gerando porosidade do tipo “channel”, e próximo a estes a dissolução ocorre de forma mais intensa, gerando porosidade dos tipos móldica e vugular. A porosidade secundária encontra-se parcial a totalmente cimentada por cristais de calcita blocosa e dolomita-em-sela.

É comum a presença de finos cristais de pirita dispersos na rocha, concentrados em estilolitos e filmes de dissolução ou associados à cimentação por calcita e dolomita-em-sela. Ocorrem estilolitos predominantemente horizontais, mas também verticais, filmes de dissolução e fraturas verticais e horizontais, parcial a totalmente cimentadas por calcita. Nota-se que alguns estilolitos cortam fraturas verticais.

Figura 89: Calcarenito intraclástico peloidal



A - Foto de detalhe do calcarenito intraclástico peloidal. Notar grande quantidade de filmes de dissolução e estilolitos paralelos ao acamamento (setas indicando). Profundidade: 103,30m. Testemunho 1.

B - Foto de detalhe do calcarenito intraclástico peloidal obtida em lupa petrográfica. Notar presença de estilolito subvertical (seta indicando). Profundidade 103,80m. Testemunho 1.

C - Fotomicrografia do calcarenito intraclástico peloidal. Notar que a rocha encontra-se intensamente cimentada por calcita. Seta indicando cimento calcítico. Profundidade: 108,33m. Testemunho 1.

D - Foto de detalhe do calcarenito intraclástico peloidal. Profundidade: 240,25m. testemunho 2.

E - Fotomicrografia do calcarenito intraclástico peloidal. Notar presença de intraclastos carbonáticos alongados e delgados (setas indicando). Profundidade: 235,93m. Testemunho 2.

F - Fotomicrografia de detalhe do calcarenito intraclástico peloidal intensamente cimentado por calcita. Seta azul indicando grão carbonático e seta vermelha indicando cimento calcítico. Profundidade: 239,53m. Testemunho 2.

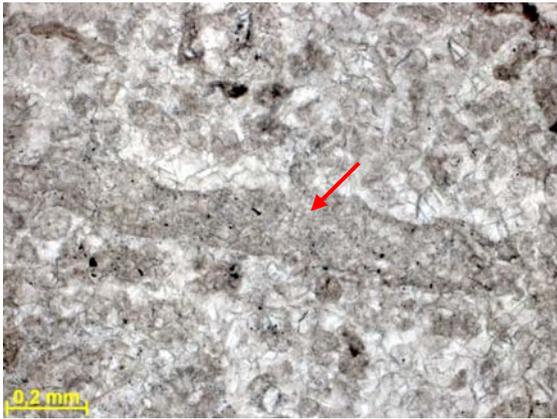


Figura nº90 Calcarenito intraclástico peloidal. Seta indicando intraclasto carbonático. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m.

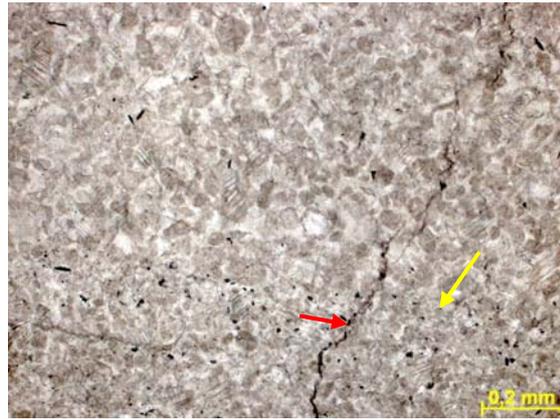


Figura nº91 Detalhe do calcarenito peloidal. Seta amarela indicando porção com pelóides tamanho silte. Seta vermelha indicando estilolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 108,33m.

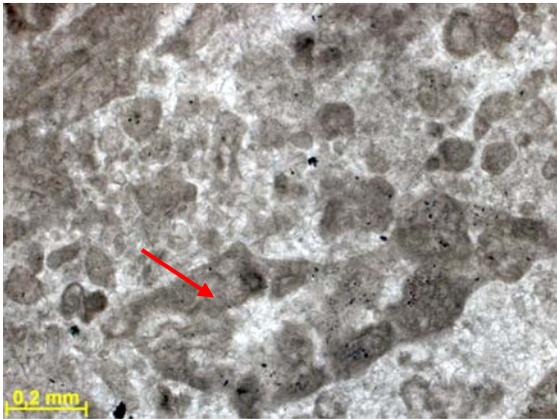


Figura nº92 Seta indicando intraclasto carbonático (fragmento de calcarenito). Fotomicrografia, P//. Profundidade 110,78m.



Figura nº93 Detalhe dos grãos oolíticos concentrados em pequena porção da rocha. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m.



Figura nº94 Detalhe da porosidade secundária gerada por processo de dissolução. Setas indicando porosidade do tipo canal cortando plano de estilolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 238,48.

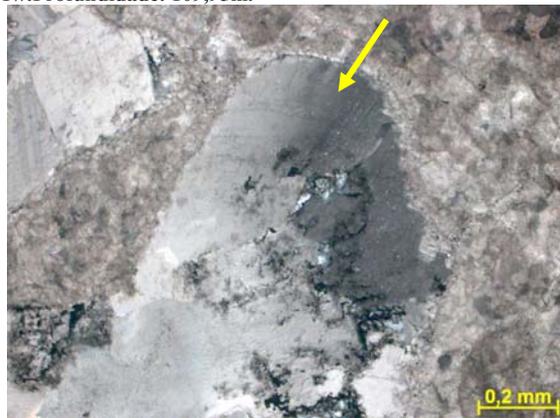


Figura nº95 Detalhe da dolomita-em-sela cimentando porosidade secundária. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 239,53.

5.3.3 Fácies de calcilito

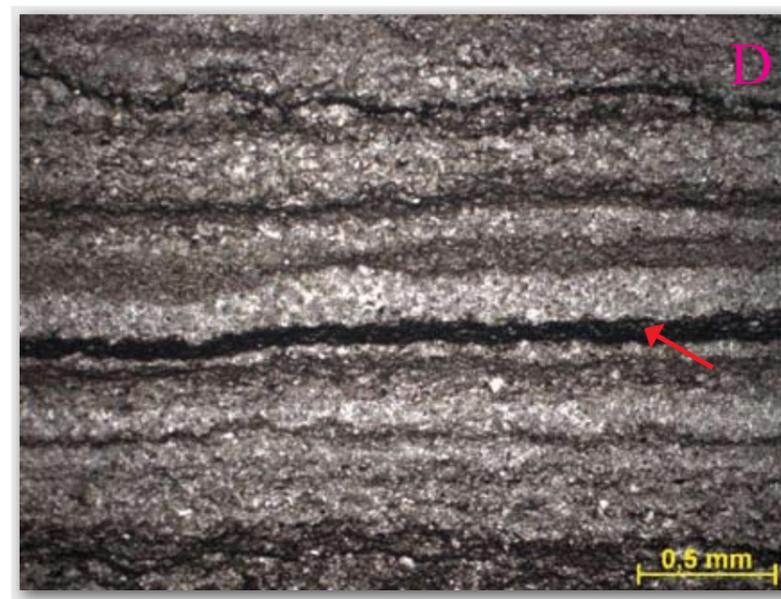
A fácies de calcilito ocorre intercalado com delgados níveis de lamito ou como delgadas intercalações na fácies de calcarenito. O calcilito apresenta-se laminado, sendo em geral peloidal, contendo filmes ou níveis ricos em matéria orgânica, os quais encontram-se por vezes piritizados. São observadas estruturas lenticulares (tipo *wavy*), indicando a ação de fluxo de água ou corrente. Ocorrem também camadas convolutas e truncamento de camadas.

Observa-se por vezes raros oolitos ou fragmentos intraclásticos carbonáticos dispersos. Finos cristais de pirita ocorrem também de forma dispersa na rocha.

A intercalação de calcilito se dá próximo ao limite dos pacotes carbonáticos com os níveis pelíticos. Grãos de quartzo e por vezes muscovita, tamanho silte, também são observados nos carbonatos quando próximos aos níveis siliciclásticos.

Ao longo de planos de estilolitos ocorreu processo de dissolução gerando porosidade secundária do tipo canal. Ocorre também porosidade do tipo microvugular cimentada por calcita blocosa.

Figura 96: Calcilutito



A - Foto de detalhe da fácies de calcilutito laminado. Seta indicando delgado nível truncado. Profundidade: 235,20m. Testemunho 2.

B - Foto de detalhe da fácies de calcilutito laminado Seta indicando acamamento plano-paralelo. Profundidade: 235,93m. Testemunho 2.

C - Fotomicrografia da fácies de calcilutito laminado. Seta indicando delgado nível rico em matéria orgânica. Profundidade: 235,68m. Testemunho 2.

D - Fotomicrografia da fácies de calcilutito. Seta indicando nível rico em matéria orgânica. Profundidade: 235,66m. Testemunho 2.

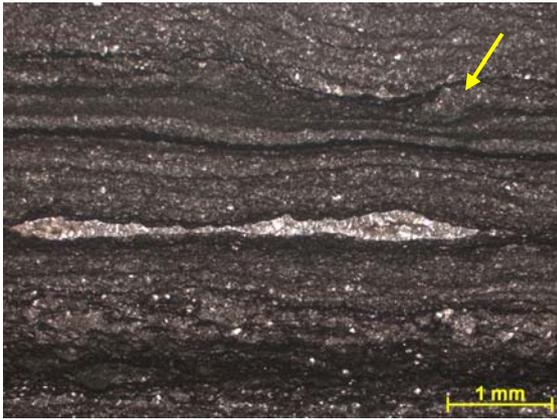


Figura nº97 Detalhe da fácies de calcilutito. Seta amarela indicando estrutura lenticular. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,68m.

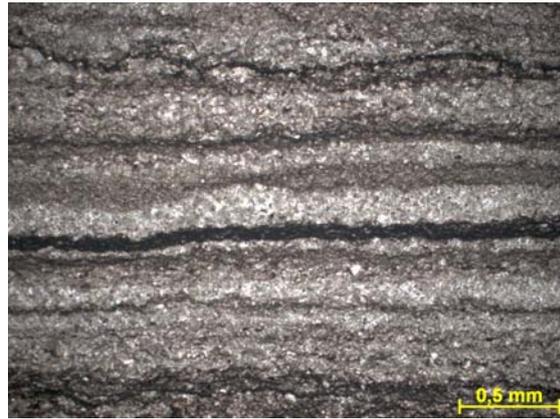


Figura nº98 Detalhe da laminação levemente ondulada. Níveis mais escuros contém maior quantidade de matéria orgânica. Os níveis mais claros são peloidais. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,68m.

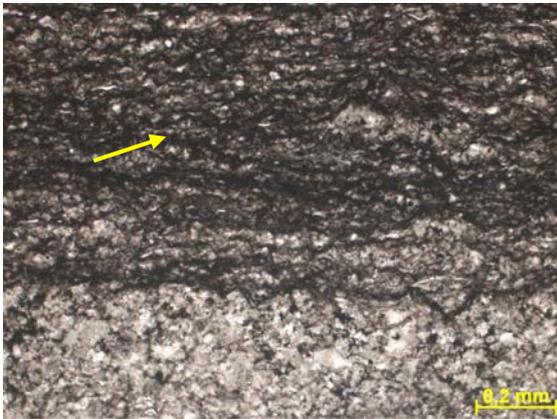


Figura nº99 Seta indicando nível rico em matéria orgânica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,93m.

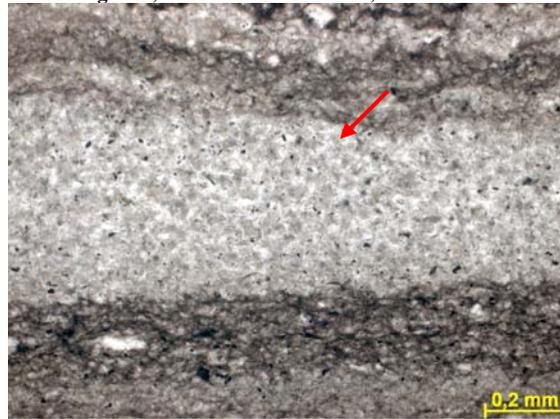


Figura nº100 Detalhe do nível peloidal. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 235,68m.

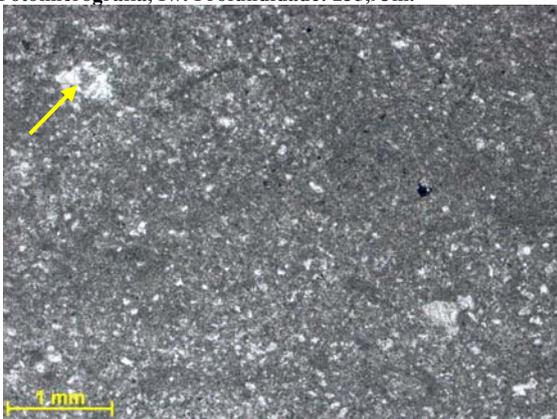


Figura nº101 Detalhe do calcilutito peloidal. Seta indicando pequenas porções com cimentação. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 103,62m.



Figura nº102 Detalhe da porosidade secundária do tipo canal ao longo do plano do estilólito. Porosidade em azul. Fotomicrografia, P//, profundidade: 103,62m.

5.3.4 Empilhamento de fácies e condições deposicionais – Formação Lagoa do Jacaré

Nos 18 metros amostrados na Formação Lagoa do Jacaré foram observadas fácies de alta energia, sendo elas calcarenitos e calcirruditos constituídos por intraclastos carbonáticos e pelóides, sem matriz micrítica. Estas fácies ocorrem na forma de bancos carbonáticos com espessuras entre 8 e 15 metros aproximadamente, ocorrendo intercalados com pelitos e arenitos finos. Fácies de calcilutito ocorrem próximo aos níveis pelíticos.

Na fácies de calcarenito são observadas tanto em testemunho como em afloramento a presença de estratificações cruzadas, marcas onduladas, estruturas tipo *flaser*, estruturas de escorregamento e de carga, principalmente diques de areia. Estes bancos calcareníticos formaram-se em águas rasas, estando presente o registro da ação de ondas. Neste ambiente grande quantidade de sedimento carbonático foi formado e depositado de forma rápida. Este fato é evidenciado pela grande quantidade de estruturas de deformação sin-sedimentar, principalmente estruturas de carga.



Figura nº103 Marcas onduladas em calcarenito da Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108.



Figura nº104 Estratificação cruzada em calcarenito Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108.



Figura nº105 Lapiseira indicando nível mais grosso de calcarenito. Seta indicando dique de areia. Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108.



Figura nº106 Lapiseira indicando dique de areia. Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108.

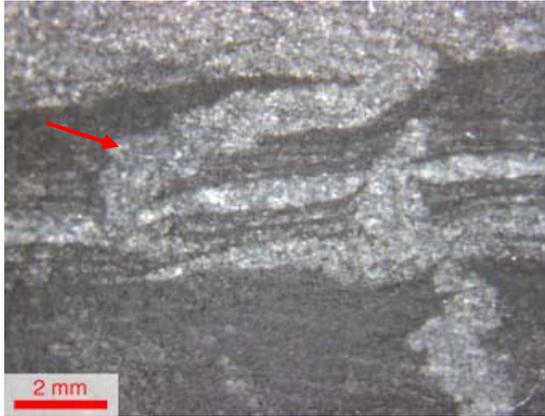


Figura nº107 Detalhe do dique de areia. Foto de detalhe obtida com lupa petrográfica. Testemunho 1. Profundidade: 107, 36m

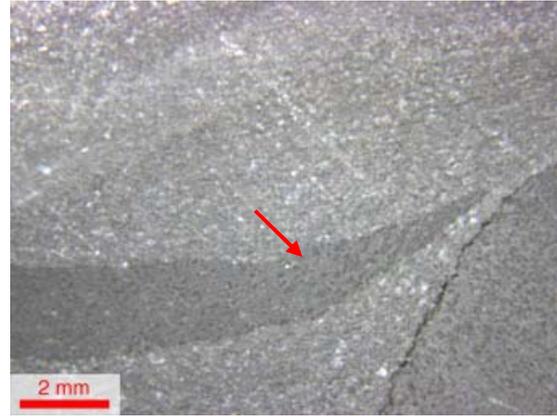


Figura nº108 Detalhe de estrutura do tipo flaser. Foto de detalhe obtida com lupa petrográfica. Testemunho 1. Profundidade: 106, 55m

A fácies de calcirrudito apresenta intraclastos carbonáticos alongados e ocorre como níveis menos espessos. Os intraclastos são caracterizados como fragmentos de calcarenito peloidal. Por vezes observa-se imbricamento dos grãos e uma leve orientação, indicando ação de fluxo de água. Sua origem está relacionada a ambientes de água rasa, possivelmente intermaré ou supramaré, aonde o sedimento precocemente cimentado sofre retrabalhamento por ondas ou maré.

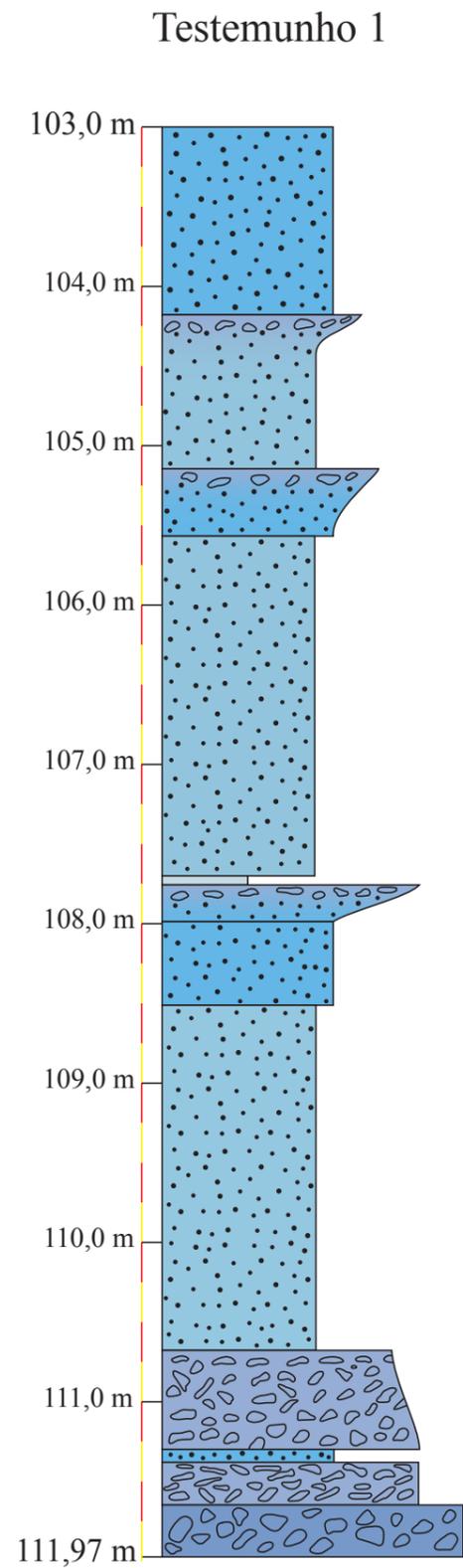


Figura nº109 Detalhe do calcirrudito intraclástico da Fm. Lagoa do Jacaré. Afloramento às margens da rodovia GO-108.



Figura nº110 Foto de detalhe da fácies de calcirrudito intraclástico. Testemunho 1. Profundidade: 111,44m.

Figura 111:
Empilhamento de fácies



104,70m



107,53m



111,10m



104,70m



107,53m



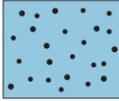
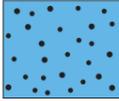
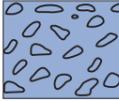
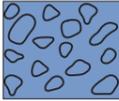
111,10m

Testemunho 1

A - Fotos e detalhe das fácies presentes no testemunho 1.

B - Fotomicrografia das fácies presentes no testemunho 1.

Legenda:

-  Calcilutito
-  Calcarenito fino a médio
-  Calcarenito médio a grosso
-  Calcirrudito com fragmentos de granulação a seixo
-  Calcirrudito com fragmentos de granulação grânulo a matação

1 m

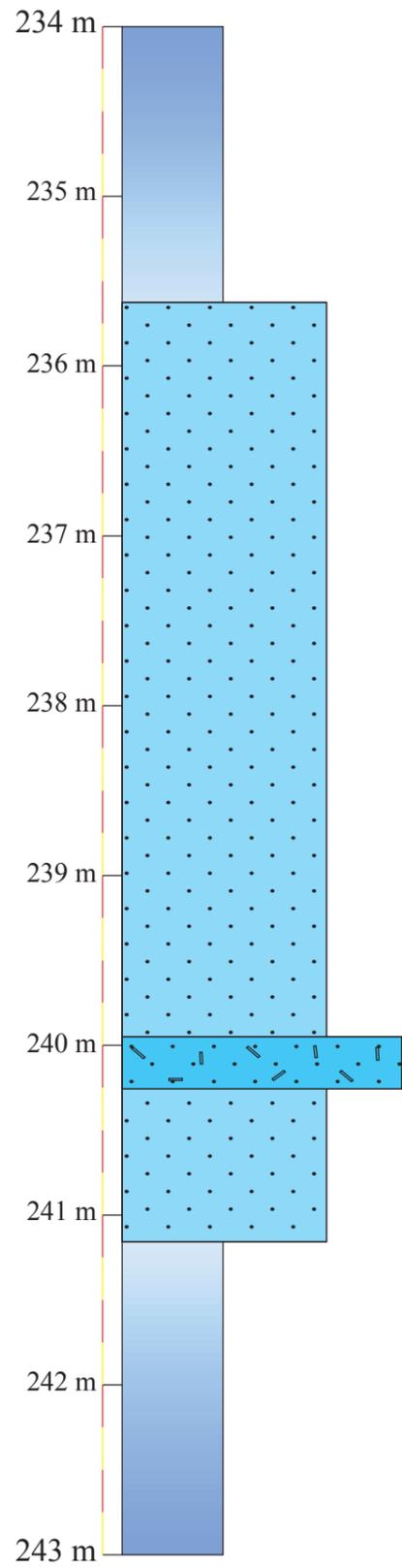
Figura 112:
Empilhamento de fácies

Testemunho 2

A - Fotos de detalhe das fácies presentes no testemunho 2.

B - Fotomicrografias das fácies presentes no testemunho 2.

Testemunho 2



235,20m



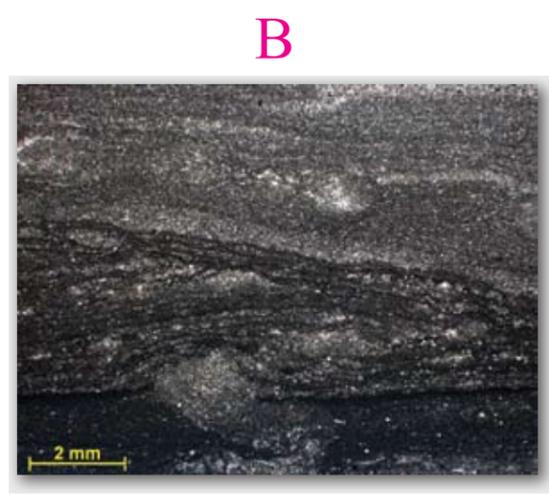
235,93m



238,47m



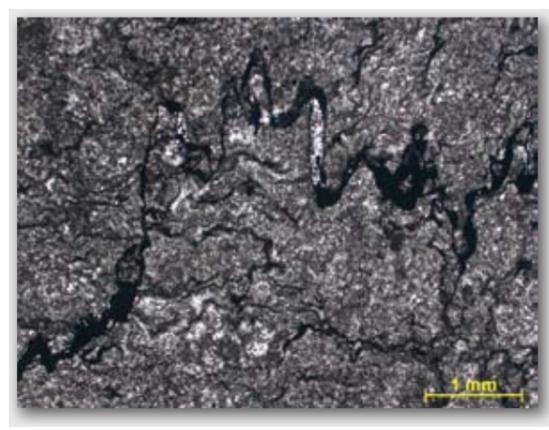
241,46m



235,18m



235,93m



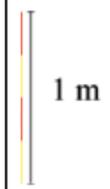
238,48m



242,80m

Legenda:

-  Delgadas intercalações de calcilutito e pelito.
Na base predomina calcilutito e no topo pelito.
-  Calcarenito/calcirrudito intraclástico.
-  Calcarenito intraclástico peloidal.
-  Delgadas intercalações de calcilutito e pelito.
Na base predomina pelito e no topo calcilutito.



5.3.5 Eventos diagenéticos na Formação Lagoa do Jacaré

Cimentação eodiagenética

Nas fácies de calcarenito e calcirrudito pode-se observar feição semelhante a delgada franja de cimento calcítico ao redor dos grãos, a qual corresponderia a cimentação marinha. Através de microscopia óptica nota-se que esta franja de cimento é sutil, sendo observada localmente. Porém imagens de catodoluminescência destacam a presença desta franja de cimento ao redor dos grãos, a qual possui luminescência muito baixa ou ausente.

Localmente ocorre cimento de calcita prismática que delinea cavidades, sendo que os cristais crescem a partir da parede em direção ao centro dos poros. Este ocorre posteriormente à franja de cimento calcítico. Em catodoluminescência este cimento mostra luminescência muito baixa ou ausente, e os cristais não apresentam zonação. Esta cimentação pode ter origem marinha ou em fase inicial de soterramento.

O cimento mais comum observado é o de calcita do tipo drusa ou mosaico grosso, preenchendo parcial ou totalmente os poros, a qual possivelmente corresponde a cimentação em ambiente de soterramento raso. No intervalo de 103 a 112 m este cimento apresenta baixa luminescência, porém no intervalo de 234 a 243 m ele apresenta-se zonado, com luminescência variando de moderada a alta.

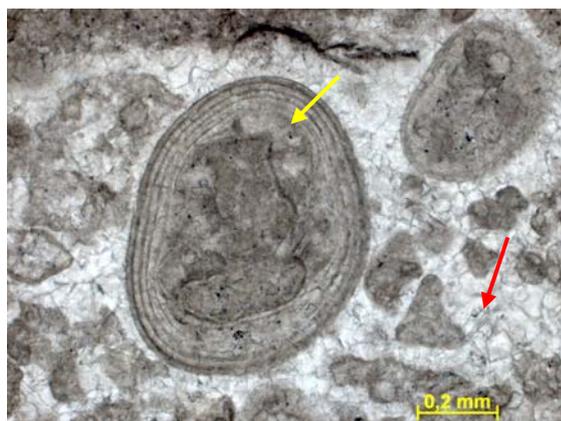


Figura nº113 Detalhe de oolito com núcleo de intraclasto carbonático (seta amarela). Seta vermelha indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso. Fotomicrografia, P//. Profundidade 111,41m.

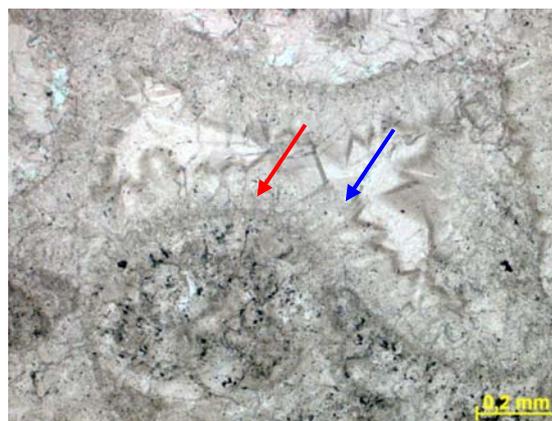


Figura nº114 Seta vermelha indicando possível franja de cimento calcítico ao redor dos grãos. Seta azul indicando cimento calcítico na borda do poro, com cristais crescendo a partir da parede do grão em direção ao centro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m.

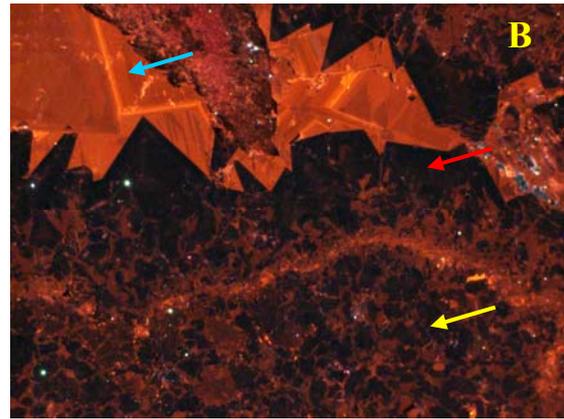
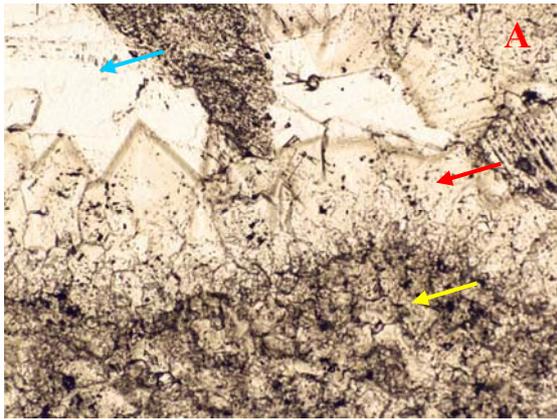


Figura nº115 A - Seta amarela indicando grão carbonático, seta vermelha indicando cimento de calcita prismática na borda do poro e seta azul indicando cimento de calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando grão carbonático, seta vermelha indicando cimento calcítico na borda do poro com baixa luminescência e seta azul indicando cimento de calcita blocosa com luminescência maior. Profundidade:111,05m.

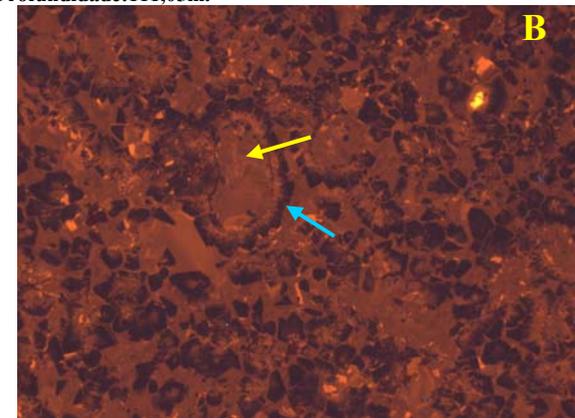
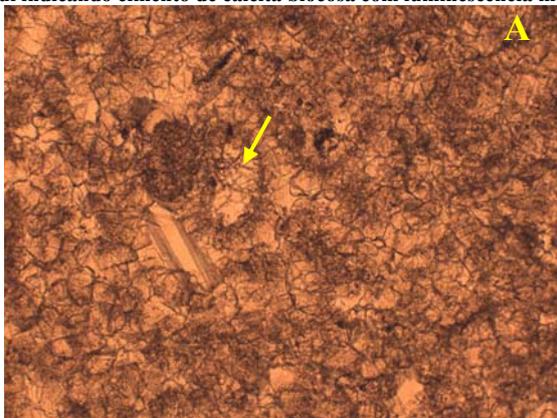


Figura nº116 A – Detalhe do calcarenito intensamente recristalizado. Seta indicando grão carbonático. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta amarela indicando grão carbonático, seta azul indicando franja de cimento calcítico com baixa luminescência ao redor do grão. Profundidade:237,76m.

Compactação química

É comum nos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré a presença de estilolitos horizontais, paralelos ao acamamento, os quais foram gerados pelo processo de compactação. Porém são observados também estilolitos subverticais e inclinados, estes estando relacionados à esforços tectônicos.

Filmes de dissolução também são comuns, concentrando matéria orgânica (comumente piritizada) e outros materiais insolúveis.



Figura nº117 Detalhe dos estilolitos horizontais, paralelos ao acamamento. Foto de detalhe. Profundidade: 103,30m.

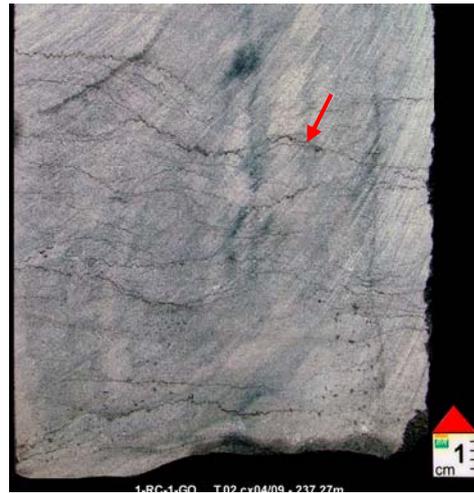


Figura nº118 Detalhe dos estilolitos horizontais e subhorizontais, paralelos ao acamamento. Foto de detalhe. Profundidade: 237,27m.



Figura nº119 Detalhe do estilolito no contato entre as litologias. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 236,67m.

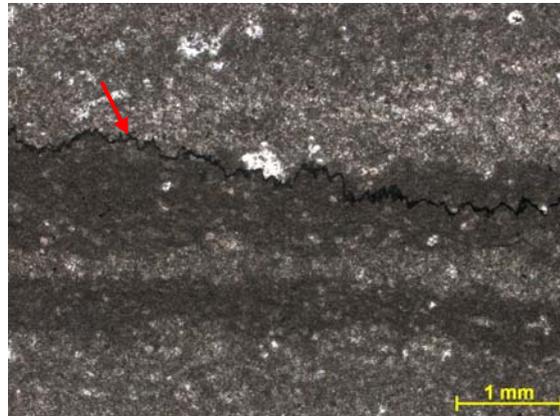


Figura nº120 Seta indicando estilolito acompanhando contato entre calcarenito (parte superior de foto) e calcilutito (abaixo do estilolito). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 110,78m.

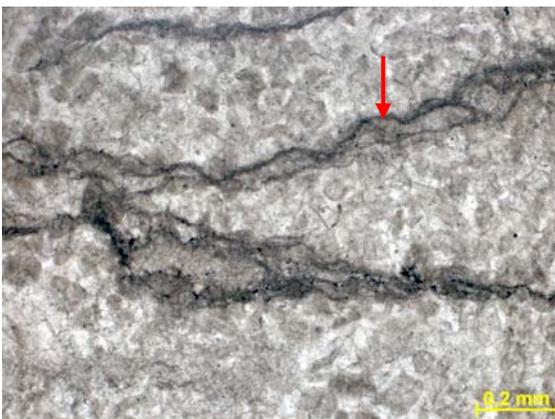


Figura nº121 Seta indicando filmes de dissolução. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m.



Figura nº122 Detalhe do estilolito subvertical. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m.

Fraturamento e dissolução na mesodiagênese

Foram observados dois processos de fraturamento e dissolução, sendo que o primeiro ocorreu antes do evento de recristalização da rocha, e o segundo ocorreu tardiamente.

No primeiro evento foram geradas fraturas e microfraturas as quais foram cimentadas por calcita, sendo estas subverticais a horizontais. Associado ao fraturamento ocorreu processo de dissolução, o qual gerou porosidade secundária dos tipos vugular, intragranular e intercrystalina. Esta porosidade encontra-se totalmente cimentada por calcita blocosa.

Em catodoluminescência os cristais de calcita de cimentação apresentam-se geralmente zonados, com luminescência em geral moderada a alta, porém com níveis de crescimento com baixa luminescência.



Figura nº123 Seta indicando fraturas horizontais e subverticais cimentadas por calcita. Seta amarela indica porosidade secundária também cimentada por calcita. Foto de detalhe. Profundidade: 105,95m.



Figura nº124 Seta vermelha indicando fratura subvertical cimentada por calcita. Seta amarela indicando porosidade secundária do tipo vugular cimentada por calcita. Foto de detalhe. Profundidade: 111,70m.

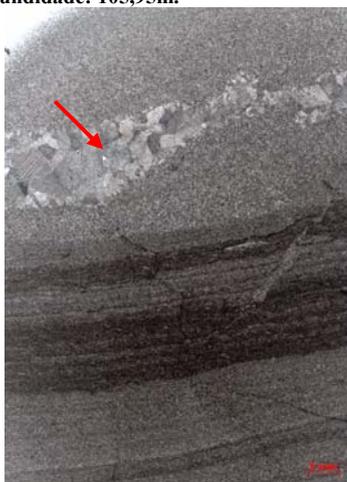


Figura nº125 Seta indicando porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Fácies: calcarenito fino a muito fino peloidal. Vista geral da lâmina. Polarizadores paralelos (P//). Profundidade: 108,33m.



Figura nº126 Detalhe da porosidade vugular associada com fraturas e cimentada por calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,08m.



Figura nº127 Seta indicando cristais de calcita cimentando porosidade secundária. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95.



Figura nº128 Detalhe dos cristais zonados de calcita blocosa cimentando porosidade vugular. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 109,95m.

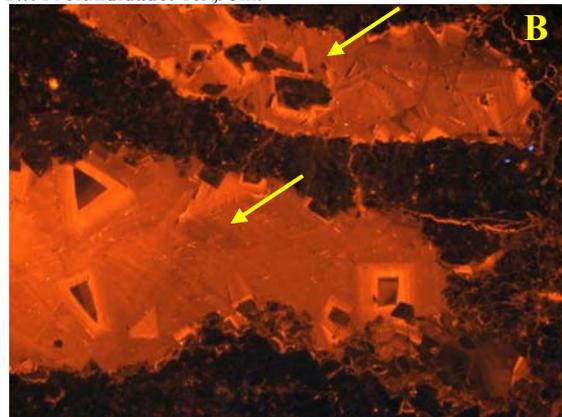
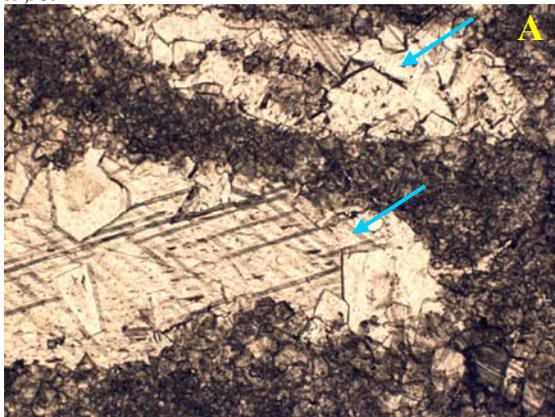


Figura nº129 A - Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Profundidade:109,08m.

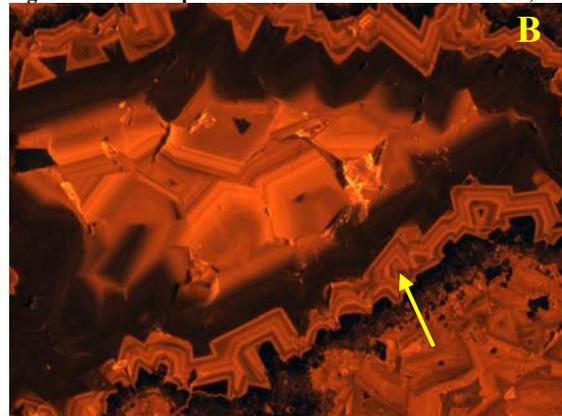
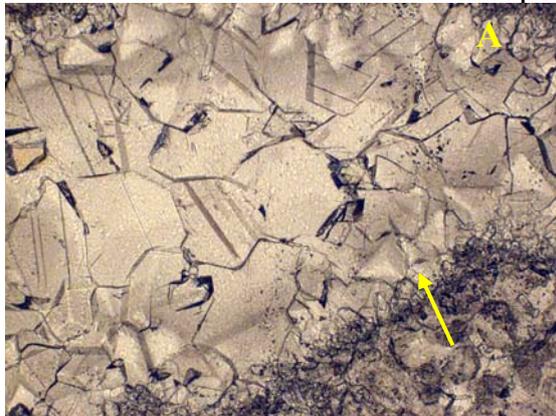


Figura nº130 A - Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Detalhe da porosidade vugular cimentada por calcita blocosa. Notar crescimento dos cristais da borda para o centro do poro. Profundidade:239,53m.

Recristalização

O processo de recristalização pode ser identificado observando-se o contato entre grãos e cimento, pois os cristais de calcita neoformados englobam tanto um quanto o outro. Outra característica é a forma irregular dos cristais, com bordas bastante irregulares. Observa-se que os

cristais de calcita neoformados englobam tanto a rocha como o cimento de calcita em fraturas (Figura 131).



Figura nº131 Detalhe do calcarenito recristalizado. Fotomicrografia, P//. Profundidade 108,33m.



Figura nº132 Seta indicando cristal de calcita neoformado englobando fratura e matriz da rocha. Fotomicrografia, P//. Profundidade 108,33m.

Em catodoluminescência, as amostras do intervalo de 103 a 112 m mostraram grãos recristalizados com baixa luminescência, porém as amostras do intervalo de 234 a 243 m mostraram que houve um segundo processo de recristalização, o qual resultou em cristais de calcita com luminescência maior, sendo possível por vezes observar o crescimento dos cristais a partir da borda em direção ao centro de grãos carbonáticos. Observa-se este segundo evento de recristalização sobrepondo o primeiro, ocorrendo de forma pervasiva na rocha (Figura 136). Este segundo evento fez com que a rocha perdesse um pouco mais suas características originais, sendo que por vezes não se distingue com clareza grãos e cimento.

A franja de cimento, possivelmente de origem marinha composta por calcita baixomagnésiana (mais estável), em geral manteve sua baixa luminescência mesmo com a recristalização.

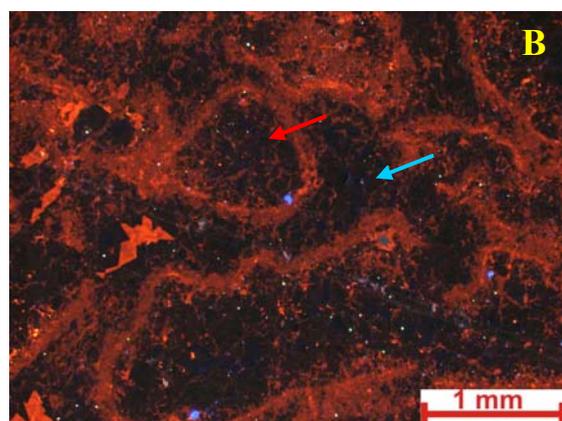
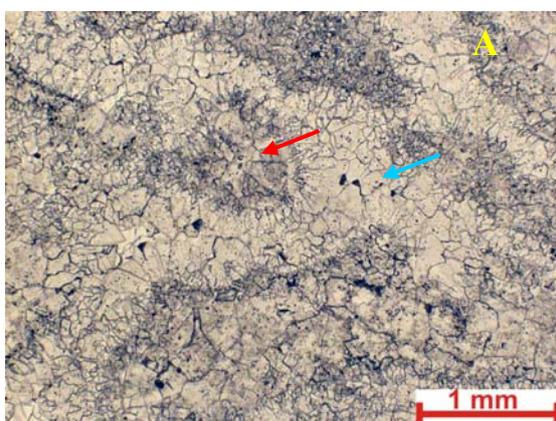


Figura nº133 A - Detalhe do calcarenito recristalizado. Seta vermelha indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando grão carbonático. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta vermelha indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando grão carbonático. Notar baixa luminescência no cimento calcítico do tipo mosaico grosso. Profundidade:111,15m.

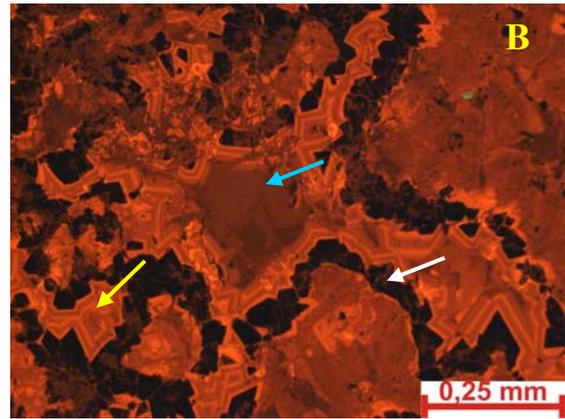
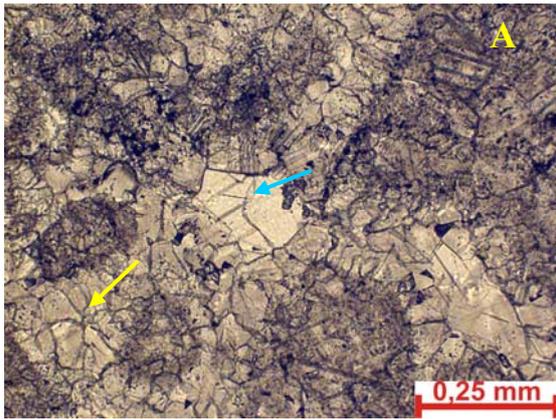


Figura nº134 A - Detalhe do calcarenito recristalizado. Seta amarela indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando cimento de calcita blocosa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Seta branca indicando franja de cimento ao redor do grão, seta amarela indicando cimento calcítico do tipo mosaico grosso e seta azul indicando cimento de calcita blocosa. Pode-se observar zonação nos cristais de calcita do cimento do tipo mosaico. Profundidade:240,21m.

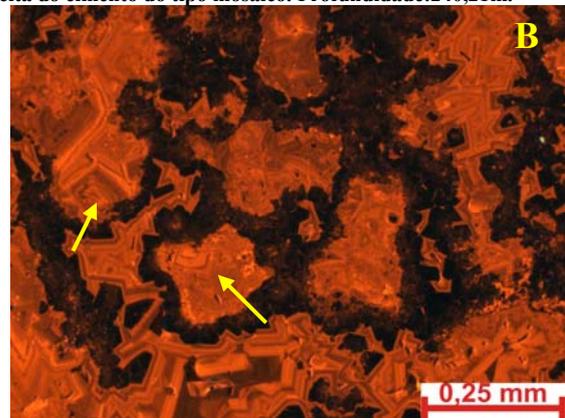
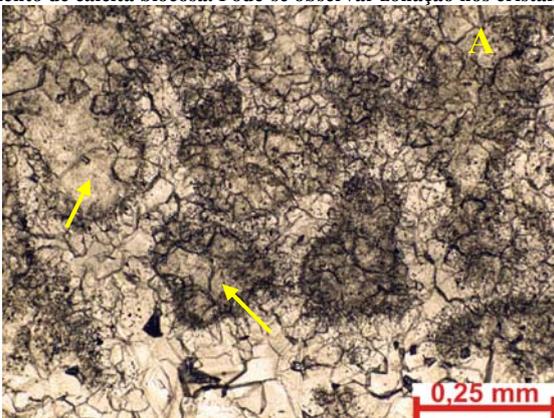


Figura nº135 A - Detalhe do calcarenito recristalizado. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Setas indicando grãos recristalizados, com cristais de calcita crescendo da borda em direção ao centro do grão. Profundidade:239,53m.

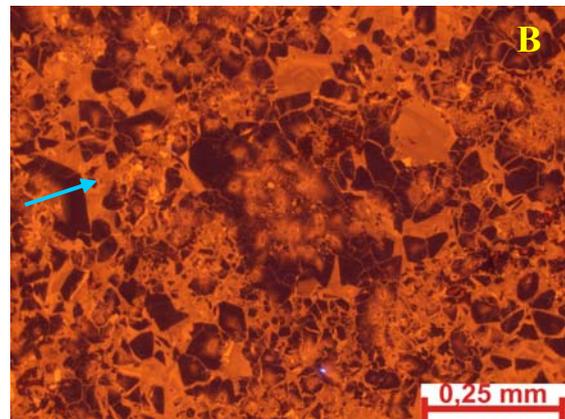


Figura nº136 A - Detalhe do calcarenito intensamente recristalizado. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência. Mesma visada da foto A. Notar segundo processo de recristalização ocorrendo de forma pervasiva, gerando cristais mais luminescentes (seta). Profundidade:236,67m.

Dissolução e fraturamento mesodiagenético tardio

Um evento de dissolução tardio foi reconhecido, principalmente nos níveis de calcarenitos e calcirruditos, os quais por vezes ainda apresentavam alguma porosidade primária preservada. Entretanto, estas fácies já haviam sofrido processo de cimentação anterior e a calcita que compõe o cimento apresenta cristalinidade maior que a dos grãos, esta é mais estável e sofreu menos a ação da dissolução. Logo a dissolução ocorreu preferencialmente nos grãos, gerando porosidade intragranular e móldica.

É bastante comum observar dissolução em planos de estilolitos e fraturas que já estavam parcial a intensamente cimentadas por calcita, e também próximo a eles, ocorrendo porosidade secundária do tipo “channel”, vugular e intercrystalina.

Algumas microfraturas abertas também formaram-se tardiamente, na mesodiagênese, já que cortam estilolitos.

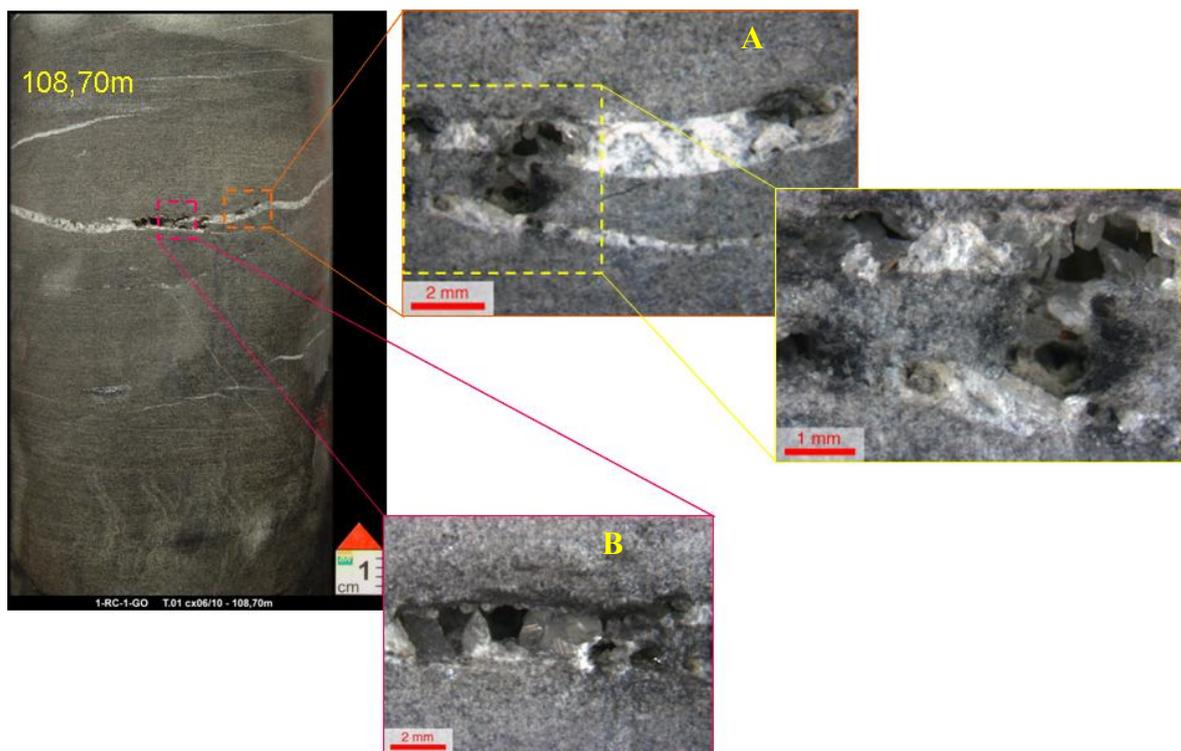


Figura nº137 Detalhe da fratura cimentada por calcita apresentando porosidade original da fratura remanescente (Foto A) e porosidade secundária gerada por processo de dissolução (Foto B), a qual dissolveu parte do cimento de preenchimento da fratura e a matriz da rocha. Formação Lagoa do Jacaré. Profundidade: 108,70 m.



Figura nº138 Detalhe da porosidade secundária dos tipos móllica (seta vermelha), vugular (seta amarela) e intercrystalina. Foto de detalhe obtida em lupa petrográfica. Profundidade: 111,10m.

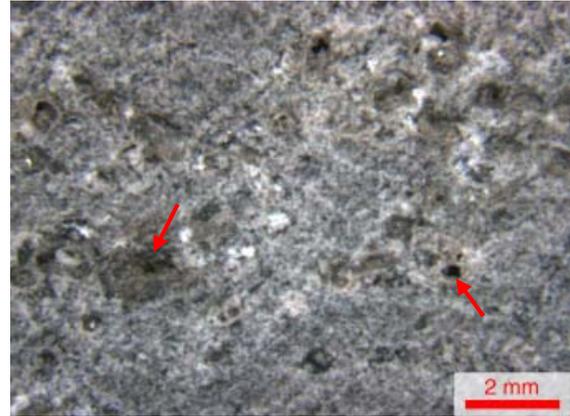


Figura nº139 Detalhe da porosidade secundária dos tipos móllica, vugular e intercrystalina. Foto de detalhe obtida em lupa petrográfica. Profundidade: 111,10m.

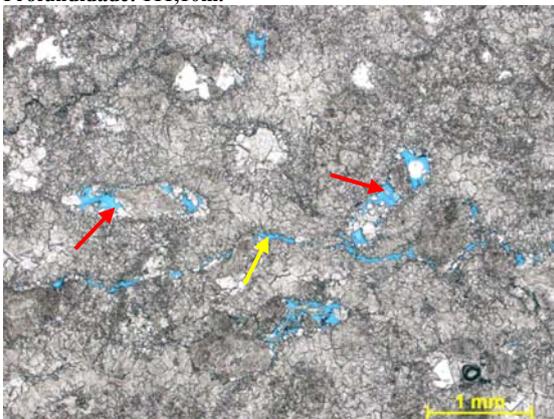


Figura nº140 Detalhe da porosidade secundária (em azul). Seta amarela indicando porosidade do tipo channel e setas vermelhas indicando porosidade móllica parcialmente cimentada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m.



Figura nº141 Seta indicando porosidade secundária ao longo de plano de estilolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,15m.



Figura nº142 Detalhe da fratura aberta cortando estilolitos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 237,76m.



Figura nº143 Setas indicando micro-fraturas abertas ao longo do nível com estilolitos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 236,67m.

Cimentação por dolomita-em-sela, calcita blocosa e quartzo

Após o evento de dissolução durante a mesodiagênese, houve a precipitação de dolomita-em-sela na porosidade secundária gerada, obliterando parcial ou totalmente os poros. Através de análises de catodoluminescência constatou-se que estes cristais de dolomita-em-sela não são zonados, o que indica que não houve mudança significativa na composição do fluido mineralizante durante a cristalização, a qual provavelmente se deu de forma relativamente rápida.

Alguns cristais de dolomita-em-sela apresentam feições de dissolução nas suas bordas, indicando que houve um pequeno processo de corrosão ou dissolução após a sua precipitação. Cristais de quartzo ocorrem localmente, em quantidades muito pequenas, também como cimento em porosidade secundária e em planos de estilólitos.

Como um último evento de cimentação observa-se cimentação por calcita blocosa ou, por vezes, cristais prismáticos de calcita.

Um material opaco está presente na porosidade secundária, ocorrendo entre os cristais de calcita blocosa e dolomita-em-sela. Parte deste material opaco é constituído por pirita. Pelas feições petrográficas observadas assemelha-se a betume residual, o qual foi parcialmente piritizado. Por vezes este material encontra-se na forma de inclusões nas bordas dos cristais de dolomita-em-sela.



Figura nº144 Detalhe da dolomita-em-sela cimentando porosidade secundária. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 239,53m.

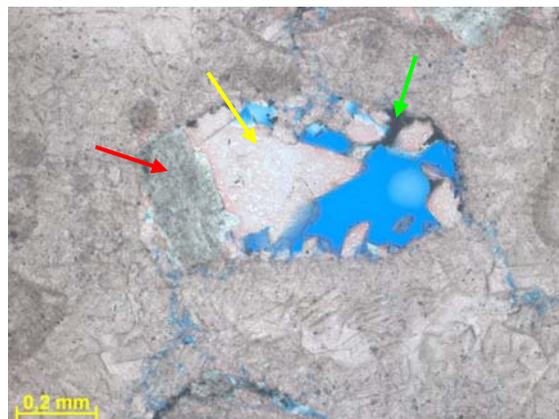


Figura nº145 Seta vermelha indicando dolomita-em-sela, e seta amarela indicando calcita blocosa cimentando porosidade secundária do tipo móldica. Seta verde indica material opaco entre cristais de calcita. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m.

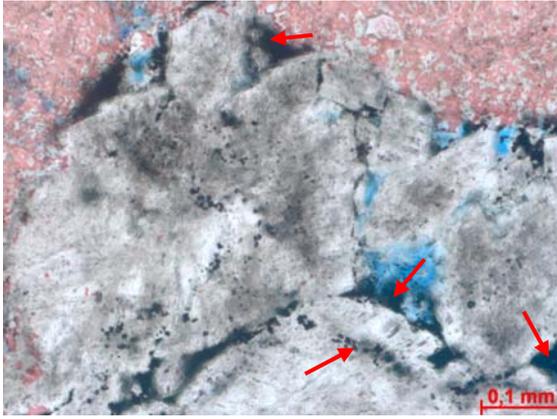


Figura nº146 Setas indicando a presença de material opaco entre os cristais de dolomita-em-sela e também como inclusões nestes. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,05m.

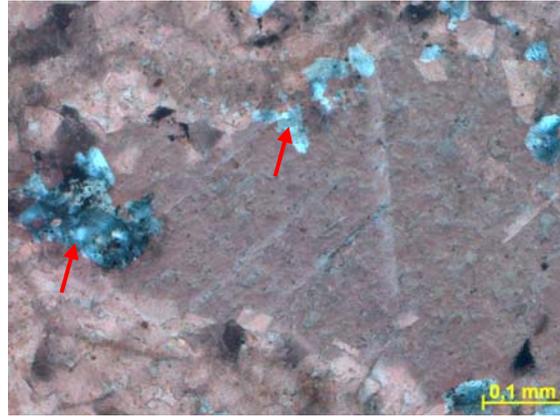
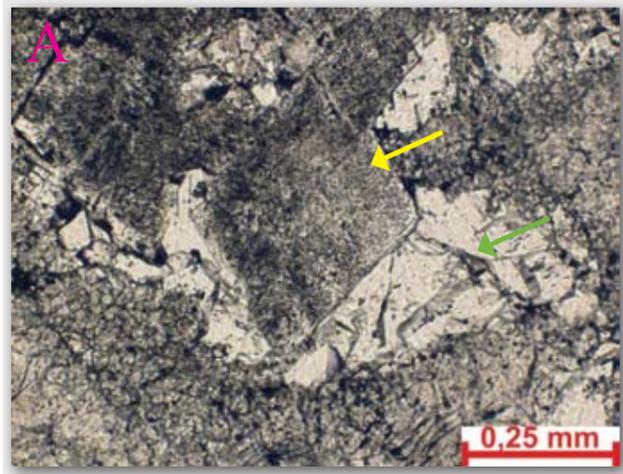


Figura nº147 Setas indicando cristais de quartzo associado com cimento calcítico blocoso. Lâmina tingida por uma solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio, evidenciando em vermelho as porções de composição calcítica. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 240,21m.

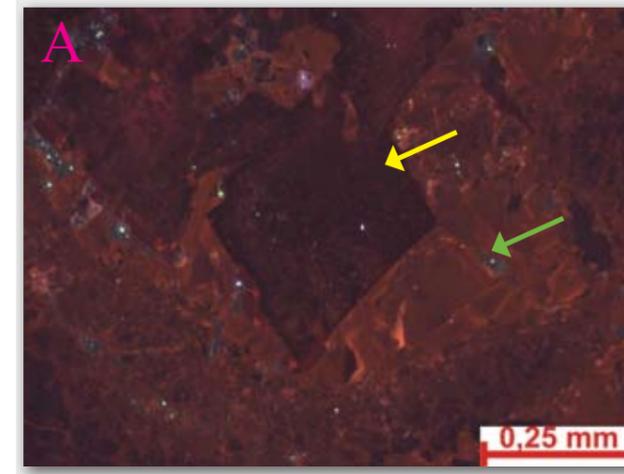
Figura 148: Dolomita-em-sela



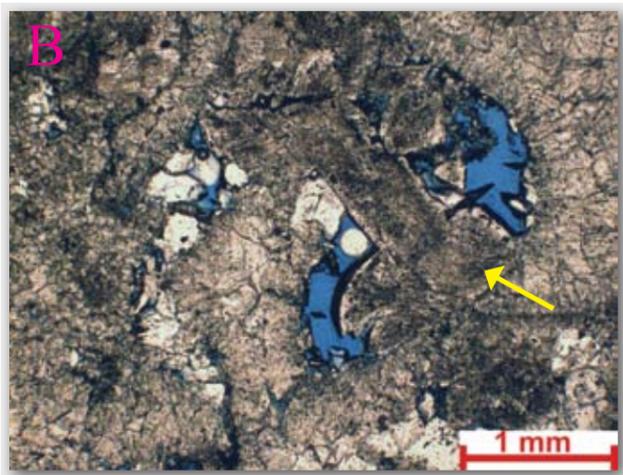
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



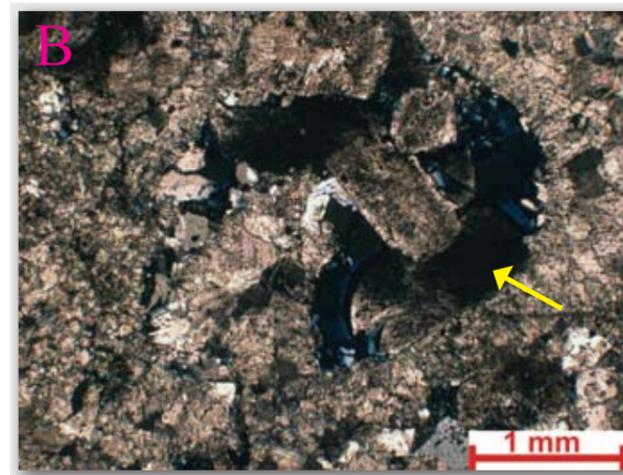
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



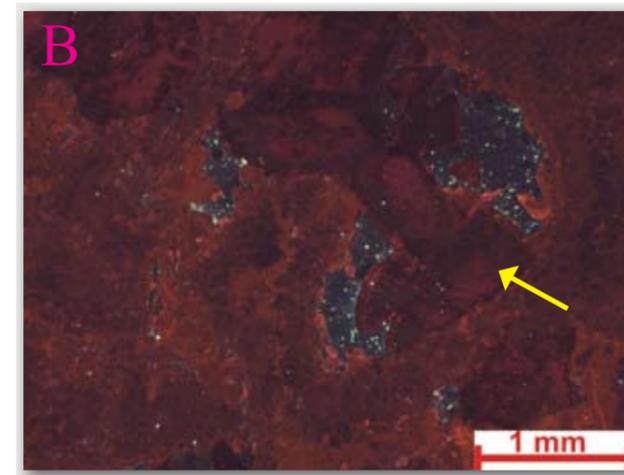
Fotomicrografia de catodoluminescência.



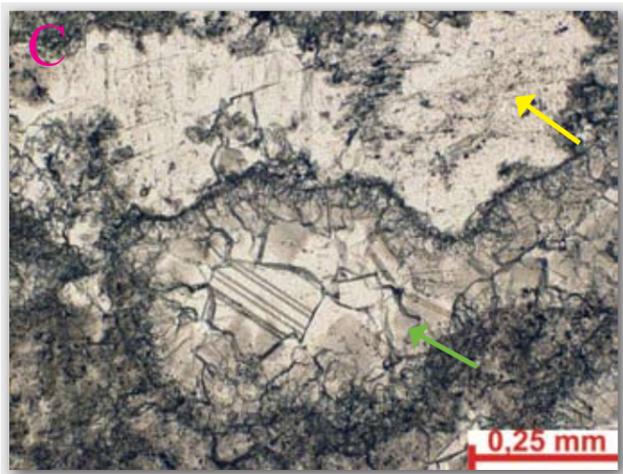
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



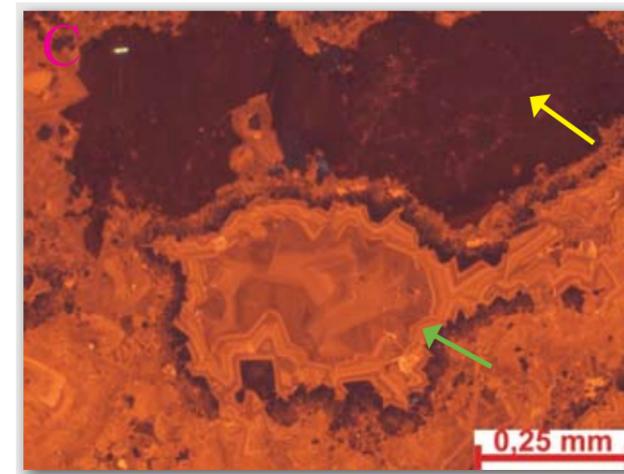
Fotomicrografia de catodoluminescência.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



Fotomicrografia de catodoluminescência.

Fotomicrografias mostrando detalhe de cristais de dolomita-em-sela em lâmina delgada (polarizadores paralelos e cruzados) e em catodoluminescência.

A - Detalhe dos cristais de dolomita-em-sela (seta amarela) e calcita blocosa (seta verde) cimentando porosidade secundária. Profundidade: 111,05m.

B - Seta indicando dolomita-em-sela cimentando parcialmente porosidade secundária. Profundidade: 111,05m.

C - Seta amarela indicando dolomita-em-sela e seta verde indicando calcita blocosa. Profundidade: 239,53m.

Sequência diagenética

Através dos estudos petrográficos pôde-se construir uma sequência de eventos diagenéticos que atuaram nos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré.

Inicialmente estes carbonatos foram submetidos a um processo de cimentação bastante precoce, provavelmente de origem marinha que sustentou o arcabouço da rocha evitando que os grãos sofressem compactação mecânica durante o soterramento. Este cimento ocorre na forma de franja isópaca ao redor dos grãos. Localmente ocorre cimento calcítico delineando cavidades, também marinho.

Posteriormente houve a precipitação de cimento calcítico dos tipo drusa e mosaico grosso, ainda durante a eodiagênese. Este cimento formou-se provavelmente durante o soterramento raso. Como evento diagenético seguinte observou-se a compactação química, com geração de estilolitos subhorizontais e filmes de dissolução.

Dois processos de fraturamento e dissolução atuaram nos carbonatos da Fm. Lagoa do Jacaré, sendo que um deles ocorreu antes do processo de recristalização. O primeiro evento gerou fraturas subhorizontais e subverticais. Fluidos corrosivos geraram então porosidade secundária do tipo vugular, principalmente próximo às fraturas. Tanto as fraturas quanto a porosidade secundária do tipo vugular foram cimentadas por calcita blocosa.

Houve então um intenso processo de recristalização da rocha, sendo que na profundidade de aproximadamente 100 metros ela é vista como uma fase única, porém na profundidade de aproximadamente 250 metros observa-se uma segunda fase de recristalização (observações feitas com auxílio de catodoluminescência).

Um segundo evento de fraturamento e dissolução ocorreu tardiamente nos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, gerando microfraturas abertas, dissolução ao longo de fraturas já cimentadas e dissolução ao longo de estilolitos, além de porosidade secundária dos tipos intercrystalina, móldica e vugular. A porosidade secundária gerada foi então parcialmente cimentada por dolomita-em-sela, calcita blocosa e localmente por quartzo, sendo que entre os cristais do cimento observa-se a presença de material opaco, tratando-se possivelmente de resquício de betume. Este evento de dissolução e posterior cimentação pode estar relacionado a fluidos ascendentes hidrotermais.

Observa-se também cristais de pirita em plano de estilolitos, de forma dispersa na rocha e também como substituição parcial de betume.

A tabela abaixo resume os principais eventos diagenéticos observados nos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, presentes nos testemunhos 1 e 2 do poço 1-RC-1-GO.

Tabela nº 4 Resumo dos principais eventos diagenéticos observados através do estudo petrográfico realizado nos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré presentes nos testemunhos 1 e 2 do poço 1-RC-1-GO.

	Eventos Diagenéticos	Tempo	
		Eodiagênese	Mesodiagênese
Associação Eodiagenética	Franja de cimento calcítico (marinho)		
	Cimento calcítico delineando cavidades (marinho)		
	Cimento calcítico do tipo drusa e mosaico grosso (soterramento raso)		
	Compactação química		
Associação Mesodiagenética	Fratramento		
	Dissolução		
	Cimentação por calcita blocosa		
	Recristalização		
	Pirita framboidal (em estiolitos ou dispersa)		
	Cimentação por dolomita-em-sela		
	Cimentação por quartzo		
	Migração de betume		
	Piritização do betume		

5.4 Dados Isotópicos das Formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas

Foram realizadas análises isotópicas de calcita e dolomita de amostras pontuais coletadas na matriz da rocha e em fraturas, em nove profundidades diferentes, sendo seis amostras do testemunho 1 (Fm. Lagoa do Jacaré – Figuras 149 a 152) e oito amostras do testemunho 4 (Fm. Sete Lagoas – Figuras 153 a 156).

No dolomito da Fm. Sete Lagoas foram coletadas de forma diferenciada amostras da matriz da rocha, do sedimento fino o qual preenche cavidades geradas durante a carstificação e do cimento tardio.

Para as amostras da Fm. Lagoa do Jacaré os dados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para calcita mostram valores que variam de 9,24 a 10,85 (VPDB‰) para $\delta^{13}\text{C}$ e entre -7,94 a -3,72 (VPDB‰) para $\delta^{18}\text{O}$. Cristais de dolomita foram amostrados somente como cimento, sendo que os valores isotópicos variam de 9,22 a 10,85 (VPDB‰) para $\delta^{13}\text{C}$ e entre -7,98 a -4,69 (VPDB‰) para $\delta^{18}\text{O}$.

Para as amostras da Fm. Sete Lagoas os dados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para calcita mostram valores que variam de 1,42 a 4,29 (VPDB‰) para $\delta^{13}\text{C}$ e entre -13,29 a -2,46 (VPDB‰) para $\delta^{18}\text{O}$. Para dolomita os valores variam de 2,56 a 5,25 (VPDB‰) para $\delta^{13}\text{C}$ e entre -12,42 a -1,58 (VPDB‰) para $\delta^{18}\text{O}$.

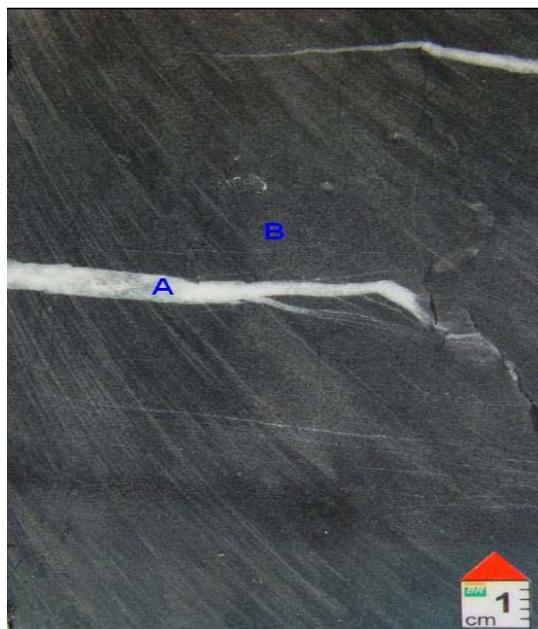


Figura nº149 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. A - Cimento; B - Matriz. Testemunho 1. Profundidade: 105,77 m

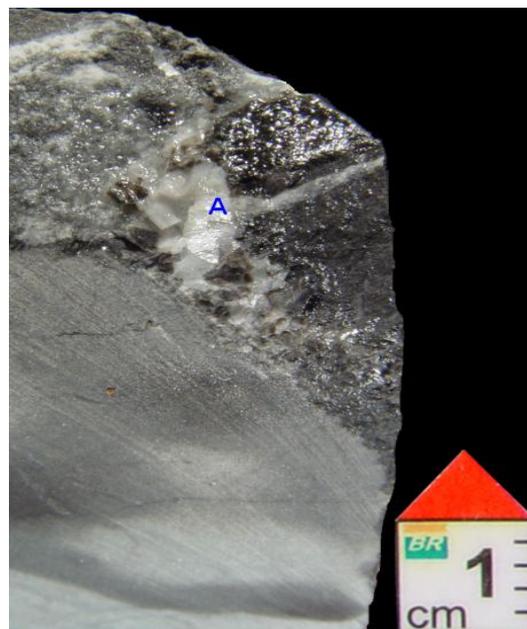


Figura nº150 Foto de detalhe do ponto onde foi coletada amostra para análise isotópica. Testemunho 1. A - Cimento. Profundidade: 105,96 m.



Figura nº151 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. A - Cimento; B - Matriz. Testemunho 1. Profundidade: 106,30 m



Figura nº152 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. A - Cimento; B - Matriz. Testemunho 1. Profundidade: 111,63 m



Figura nº153 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. C - Preenchimento 1(Sedimento); E - Matriz. Testemunho 4. Profundidade: 711,76 m.



Figura nº154 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. C - Preenchimento 1(Sedimento) ; D - Preenchimento 2(Cimento); E - Matriz. Testemunho 4. Profundidade: 712,06 m.

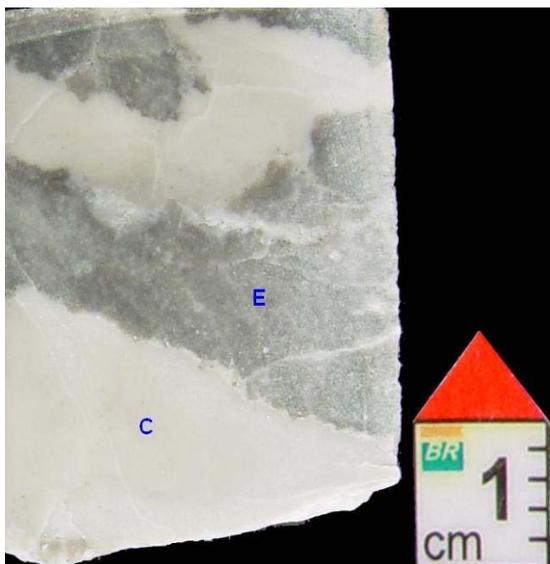


Figura nº155 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. C - Preenchimento 1(Sedimento); E – Matriz. Testemunho 4. Profundidade: 713,12 m

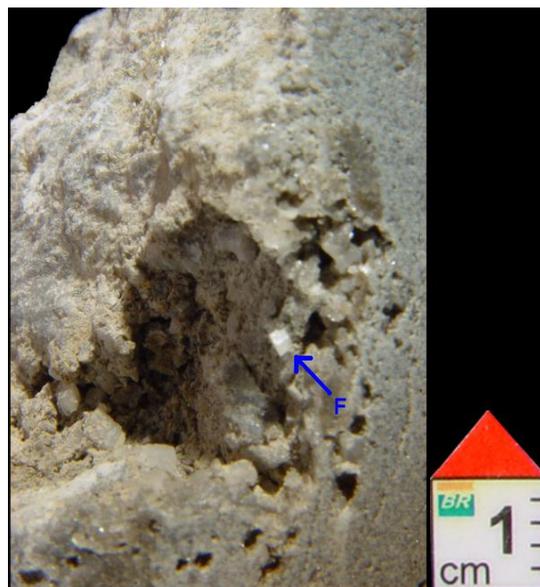


Figura nº156 Foto de detalhe dos pontos onde foram coletadas amostras para análise isotópica. F- Cristais de Fratura. Testemunho 4. Profundidade: 714,33 m.

Colocando estes resultados na forma de gráfico, pode-se observar melhor a diferença dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre os carbonatos das duas formações (Figura 157).

O cimento de fratura presente na Fm. Lagoa do Jacaré mostra em geral valores não muito negativos para o Oxigênio, tratando-se possivelmente de fraturas cimentadas ainda durante a eodiagenese, sob temperaturas mais baixas.

Os valores de Oxigênio mais negativos foram registrados na formação Sete Lagoas, em cristais de calcita e dolomita presentes em fraturas e em vugs. Estas fases de cimentação correspondem já a eventos mesodiagenéticos, possivelmente de relacionados a fluidos mais quentes, de origem hidrotermal.

Outro fato constatado foi a diferença isotópica das dolomitas da matriz da rocha e as dolomitas do sedimento fino que preenche as cavidades, indicando tratar-se de dois eventos de dolomitização distintos. As dolomitas correspondentes ao sedimento fino de preenchimento apresentam valores de $\delta^{18}\text{O}$ mais negativos.

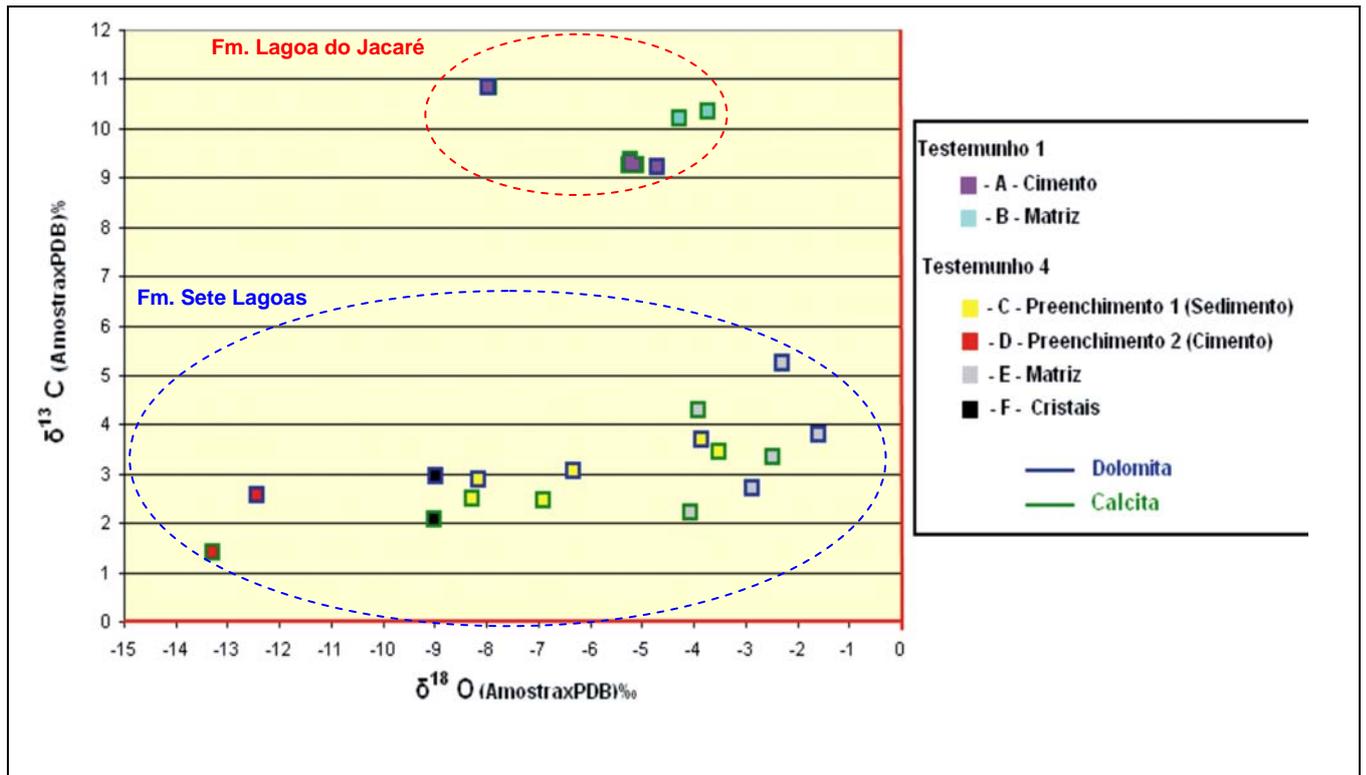


Figura nº157 Gráfico de dispersão mostrando a distribuição dos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras pontuais coletadas nos testemunhos 1 e 4 do poço 1-RC-1-GO. O testemunho 1 corresponde a Fm. Lagoa do Jacaré e o testemunho 4 corresponde a Fm. Sete Lagoas.

6 CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA DAS ROCHAS CARBONÁTICAS AMOSTRADAS NO FURO PFF-57 DA FORMAÇÃO MORRO DO CALCÁRIO (GRUPO VAZANTE), NA REGIÃO DE FAGUNDES, MINAS GERAIS

A região de Vazante-Paracatu, situada na porção noroeste de Minas Gerais, contém o maior distrito zincífero do Brasil. Dentro do contexto geológico, está localizada na parte externa da Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida 1967), na margem oeste do Cráton do São Francisco. É composta por sequências metassedimentares que apresenta aumento da deformação e metamorfismo para oeste (Marini *et al.* 1981, Dardenne 1981). Trata-se de uma faixa de direção aproximada Norte-Sul, compreendendo o Grupo Vazante. Esta faz contato com o Grupo Canastra a oeste e com o Grupo Bambuí a leste.

6.1 Grupo Vazante

As sequências metassedimentares aflorantes na região de Vazante-Paracatu foram inicialmente incorporadas ao Grupo Bambuí (Branco & Costa 1961, Braun 1968, Barbosa 1965) e posteriormente individualizadas como Formação Vazante por Dardenne (1978), e redefinida por Dardenne *et al.* (1998), passando a ter *status* de grupo.

O Grupo Vazante é uma seqüência sedimentar a metassedimentar constituída predominantemente por rochas carbonáticas intercaladas por níveis siliciclásticos, empilhadas da base para o topo como sete formações (Dardenne, 1978, 2000): Retiro, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário, Serra da Lapa (Figuras 158 e 159).

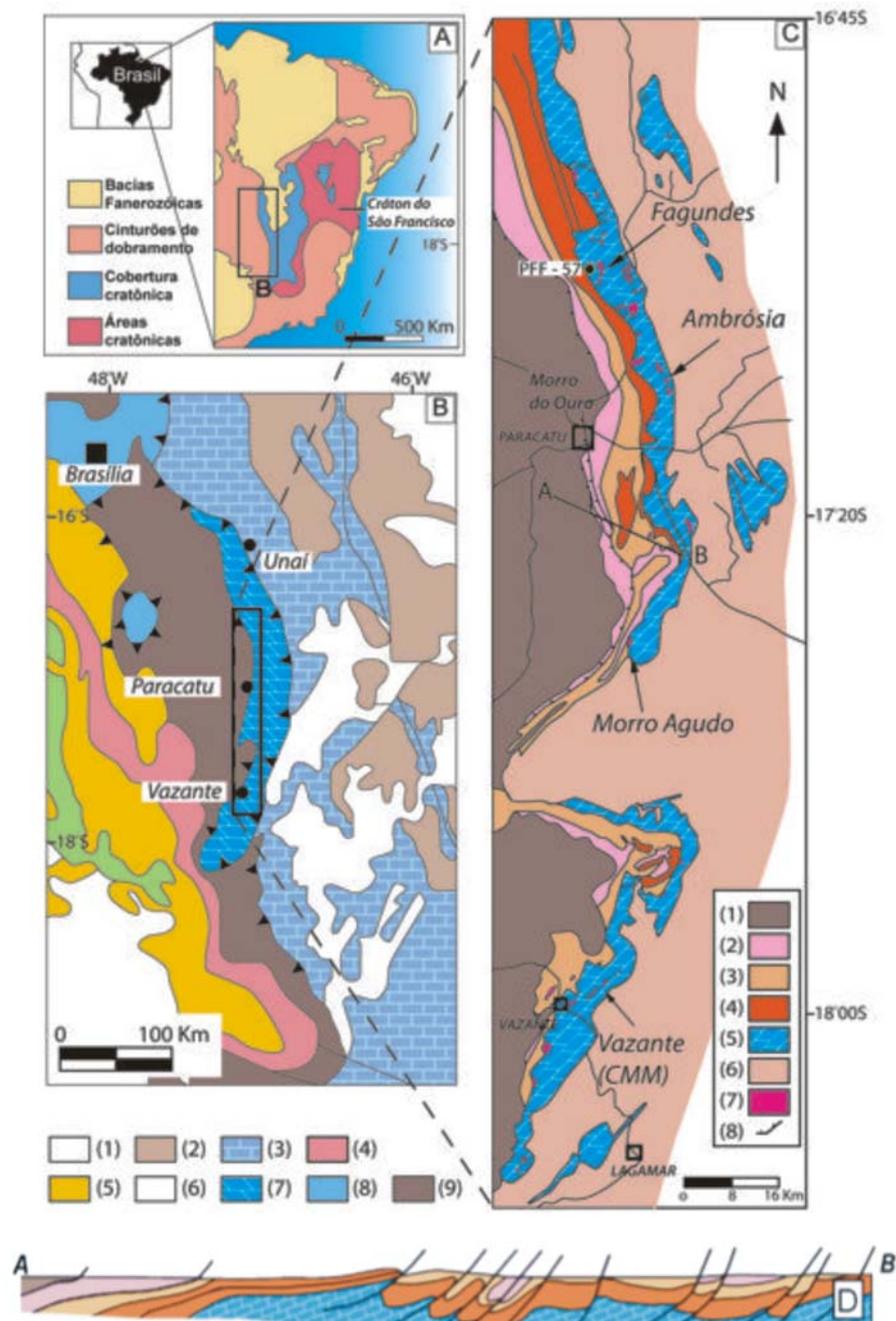
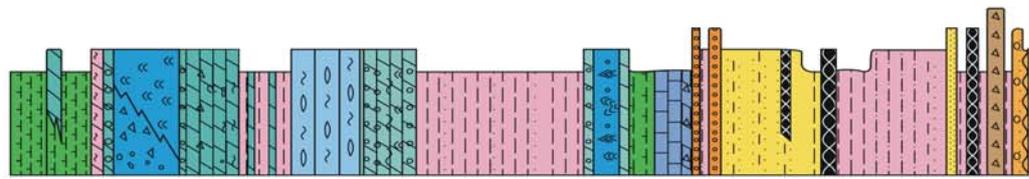


Figura nº158 (A) Mapa de localização do Cinturão de Dobramentos Brasília (CDB) e o Cráton do São Francisco (Dardenne, 2000); (B) Mapa geológico do segmento sul do CDB (Dardenne, 2000): (1) bacias fanerozóicas; (2) Fm. Três Marias (Gr. Bambuí); (3) Subgrupo Paraopeba (Gr. Bambuí); (4) Fm. Ibiá; (5) Gr. Araxá; (6) Granulitos e ortognaisses; (7) Gr. Vazante; (8) Grupo Paranoá; (9) Gr. Canastra; (C) Mapa geológico do Grupo Vazante e a localização dos depósitos de Vazante, Ambrósia e Fagundes e a localização do furo PFF-57 (Votorantim Metais), (1) Fm. Paracatu (Gr. Canastra), (2) Fm. Serra do Landim (Gr. Canastra), (3) Mb. Serra da Lapa, Fm. Serra da Lapa (Gr. Vazante), (4) Mb. Serra do Velosinho, Fm. Lapa (Gr. Vazante), (5) Formações Morro do Calcário e Serra do Poço Verde (Gr. Vazante), (6) Fm. Serra do Garrote (Gr. Vazante), (7) Anomalias de Pb; (D) Seção estratigráfica (cross-section) do Grupo Vazante (Oliveira, 1998).



Membro	Formação	
Serra da Lapa	Lapa	Membro Serra da Lapa: sericita-clorita fitito, metassilito carbonático rítmico, dolomito impuro com laminações microbiais, malamarga com leitos arenosos e dolarenito com níveis silicosos boudinados.
Serra do Velosinho		Membro Serra do Velosinho: folhelhos carbonosos rítmicos.
Pamplona Superior	Morro do Calcário	Corresponde à fácies superior do Membro Pamplona e representa um complexo de recife. É constituída por dolomitos estromatolíticos com laminação microbiana convexa e níveis de dolarenitos finos a grossos, doloruditos e brechas lenticulares constituídas por fragmentos centimétricos de dolomitos estromatolíticos.
Pamplona Médio		É predominantemente dolomítica, sendo dividida em quatro membros:
Pamplona Inferior		Membro Pamplona Médio: dolomitos cinza-claros a rosados com laminações algais, intercalados com níveis de dolarenito, brechas lamelares e estromatólitos colunares, e raras lentes de folhelho preto.
Morro do Pinheiro Superior	Serra do Poço Verde	Membro Pamplona Inferior: folhelhos carbonáticos, ardósia carbonosa com níveis dolomíticos finos com laminações microbiais planas e convolutas.
Morro do Pinheiro Inferior		Membro Morro do Pinheiro Superior: dolomitos cinza-médios a escuros com estruturas olho-de-pássaro e laminações planas e convolutas, provavelmente de origem microbiana. Ocorrem níveis subordinados de dolarenitos, brechas lamelares e folhelhos carbonosos com piritas.
		Membro Morro do Pinheiro Inferior: dolomitos cinza-claros a rosados, com laminações microbiais, e níveis subordinados de dolarenitos, brechas lamelares e lentes de estromatólitos colunares.
	Serra do Garrote	Essa sequência de ardósias, localmente rítmica e carbonosa, com piritas disseminadas e finas intercalações de níveis quartzíticos.
Sumidouro	Lagamar	Representa uma unidade psamo-pelítica composta por metaconglomerados basais, quartzito, metassilito, ardósia, brechas dolomíticas, calcários cinza-escuros e bioherma estromatolítico.
Arrendido		
	Rocinha	Arenitos rítmicos, pelitos, ardósias, metassilito, ardósia com piritas e laminações fosfáticas que gradam para fofarenito.
	Sítio Antônio do Retiro	Quartzito, localmente conglomerático, intercalado com ardósia e corpos de diamictito com matriz pelítica ou fosfática.

Figura nº 159 Coluna litostratigráfica esquemática (Dardenne *et. al.*, 1998, Dardenne, 2000) e descrição sucinta das sete formações que constituem o Grupo Vazante, estudadas por diversos autores, tais como Dardenne (1978), Madalosso & Vale (1978), Campos Neto (1984), Dardenne *et al.* (1997), Rigobello *et al.* (1988) e compiladas em Bettencourt *et al.* (2001).

As seqüências do Grupo Vazante foram metamorfasadas na fácies xisto-verde baixo, devido à tectônica brasiliana, apresentando desenvolvimento de clivagem ardosiana (Rostirolla *et al.* 2001 *apud* Bettencourt *et al.* 2001)

Caracterizada pela deposição em uma bacia afetada por rápida subsidência, com elevada taxa de sedimentação (Dardenne, 1978). O Grupo Vazante tem sido relacionada a diferentes contextos geotectônicos, sendo considerada depósito de margem continental passiva (Campos-Neto 1984, Almeida 1993) ou depósito em bacia de antepaís (Dardenne *et al.* 1998, Dardenne 2000).

O Grupo Vazante representa uma das seqüências metassedimentares do segmento sul da Faixa de Dobramentos Brasília, inserido em um contexto de sistema de *nappes* e empurrões, com vergência para Nordeste, estando afetada por zonas de transcorrência sinistrais com transporte para Sudeste (Dardenne 2000, Dardenne *et al.* 1998). A deposição do Grupo Vazante tem sido relacionada a diferentes contextos geotectônicos, sendo considerada depósito de margem continental passiva (Campos-Neto 1984, Almeida 1993) ou depósito em bacia de antepaís (Dardenne *et al.* 1998, Dardenne 2000). Neste último caso esta seqüência teria sido depositada em uma bacia afetada por rápida subsidência, com elevada taxa de sedimentação.

A posição estratigráfica do Grupo Vazante não é consensual. Para alguns autores, tais como Dardenne (1978) e Da Rocha Araújo *et al.* (1992), a presença de estromatolitos do tipo *Conophyton*, os quais indicam idades relativas de 1650 a 950 Ma (Moeri 1972), seria uma evidência de que esta unidade é mais antiga do que o Grupo Bambuí, no qual não ocorre este tipo de estromatolito. Estudos isotópicos de chumbo em galena dos depósitos da região de Vazante-Paracatu indicam uma idade de 1200 Ma, interpretada como o tempo de separação do chumbo do embasamento ou como a idade da mineralização de Morro Agudo, considerada diagenética (Freitas-Silva & Dardenne 1997).

Idades entre 570 e 750 Ma obtidas com análises isotópicas de chumbo em galena (Misi *et al.* 1997) e idade de 600 Ma obtidas através de datações Rb-Sr em folhelhos do Grupo Vazante (Amaral & Kawashita 1967) podem representar apenas o último fechamento isotópico, durante o evento metamórfico Brasileiro (Bettencourt *et al.* 2001). Misi *et al.* (1997) realizaram estudos isotópicos de Sr, o qual indicou uma idade neoproterozóica para o Grupo Vazante, correlacionável ao Grupo Bambuí. No entanto idades modelo Nd obtidas por Pimentel *et al.* (1999) indicaram uma posição estratigráfica intermediária do Grupo Vazante com relação aos grupos Paranoá e Bambuí.

6.1.1 Mineralizações na região de Vazante-Paracatu

A região de Vazante-Paracatu engloba os depósitos de zinco e chumbo de Vazante, Morro Agudo, Ambrósia e Fagundes, sendo estes associados às sequências metadolomíticas do Grupo Vazante (Dardenne *et al.* 1998). Na porção norte da região o minério é constituído por esfalerita, galena e pirita, porém na região sul (Vazante) a associação é mais complexa, sendo constituída principalmente por willemita, com esfalerita, galena, franklinita e zincita subordinados.

Os depósitos de Vazante têm origem hidrotermal, sincrônica ao desenvolvimento da zona de falha de Vazante durante o evento Brasileiro (Pinho *et al.* 1989, 1990; Pinho 1990, Monteiro 1997), sendo a sequência hospedeira da mineralização o Membro Pamplona Inferior (Figura 159), constituído por intercalações de folhelho e ardósia, metamarga, sericita filito, metadolomitos e lentes de brechas intraformacionais.

Na região de Morro Agudo as mineralizações estão associadas às fácies de *back-reef* do bioherma estromatolítico da Formação Morro do Calcário, aonde predominam brechas dolomíticas intraformacionais (dolorruditos), com clastos angulosos milimétricos a métricos constituídos por dolomitos maciços, laminados ou estromatolíticos em matriz dolomítica, dolarenítica ou silicosa. Estas gradam para brechas dolareníticas, constituídas por fragmentos de dolomitos laminados e maciços em matriz dolarenítica. Acima das brechas ocorrem dolarenitos com estratificações cruzadas planares (Madalosso & Valle 1978), sendo compostos por litoclastos dolomíticos, oolitos, oncolitos, grãos de quartzo e *chert* (Cunha 1999).

A mineralização de Fagundes mostra um contexto semelhante ao depósito de Morro Agudo, tendo como rocha hospedeira os dolomitos com estruturas estromatolíticas caóticas do Membro Pamplona Superior (Fm. Morro do Calcário), próximo ao contato com os folhelhos do Membro Serra do Velosinho (Bettencourt *et al.* 2001).

A mineralização de Ambrósia ocorre predominantemente como filões, associando-se a dolomitos brechados tectonicamente imbricados aos metassedimentos do Membro Pamplona Inferior, na Zona de Falha de Ambrósia (Bettencourt *et al.* 2001).

Estes depósitos de zinco apresentam forte controle estrutural e predominância de estilos tardi-diagenéticos e epigenéticos, bem como evidências de mobilização devido à interação com fluidos hidrotermais tardios relacionados com eventos de deformação, o que induz frequentemente à sobreposição de estilos estruturais diferentes em um mesmo depósito (Monteiro *et al.* 2000, 2001).

6.2 Formação Morro do Calcário

O furo PFF-57 localiza-se a aproximadamente 30 Km de distância à norte da cidade de Paracatu, Minas Gerais (Figura 158). O referido furo possui foi testemunhado até a profundidade de 282,10 metros, sendo que foi disponibilizado para este estudo o intervalo de 3,55 a 126,29 m.

No local do furo afloram brechas carbonáticas dolomíticas (dolorrudito) e dolarenito da Formação Morro do Calcário. Próximo ao local do furo ocorre contato entre carbonatos da Formação Morro do Calcário e pelitos da Formação Serra da Lapa. O contato se dá através de falha de empurrão, sendo comum a ocorrência de intenso processo de silicificação dos carbonatos próximo ao contato. O furo está situado sobre a região de charneira de uma dobra sinclinal maior, ocorrendo dobras anticlinais menores na região (Figura 160). As mineralizações ocorrem como corpos restritos, lenticulares, ao longo da charneira da sinclinal. Na região ocorrem três zonas de falha principais, com direções noroeste e nordeste.

Através do estudo petrográfico do testemunho pôde-se observar que as fácies presentes são dolomitos, e estão relacionados a ambiente marinho com o desenvolvimento de biohermas (estromatolitos colunares). Estas estruturas microbiais não aparecem *in situ* no testemunho, mas sim como fragmentos em dolorruditos. Os dolorruditos são matriz suportados, e sua matriz é composta por micrítica e grãos carbonáticos tamanho areia, ora predominando um ou outro. Níveis de dolarenito ocorrem apenas entre as profundidades de 37,37 e 35,33 m.

Foram então caracterizadas quatro fácies deposicionais, sendo elas: dololuto, dolarenito, dolorrudito (brecha carbonática) e brecha dolomítica de falha. As três primeiras fácies citadas são deposicionais, sendo a brecha dolomítica de falha formada por processo tectônico, observada pontualmente no testemunho.

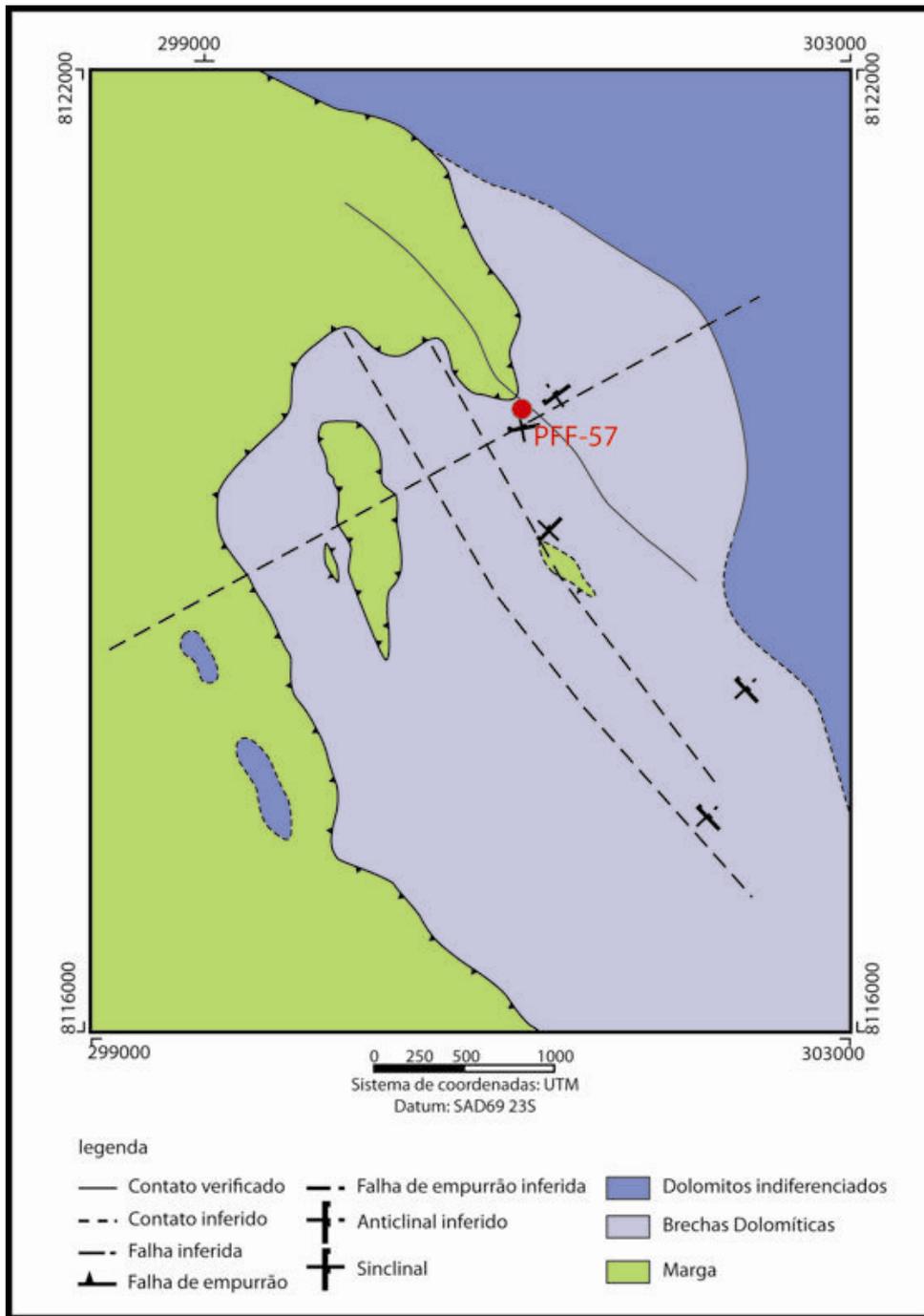


Figura nº160 Mapa geológico da região de Fagundes, MG, com a localização do furo PFF-57 (cedido pela Votorantim Metais). As Brechas dolomíticas pertencem a Formação Morro do Calcário. O contato entre a Fm. Morro do Calcário e a Fm. Serra da Lapa (Margas) se dá através de falha de empurrão.

6.2.1 Fácies de dololutito

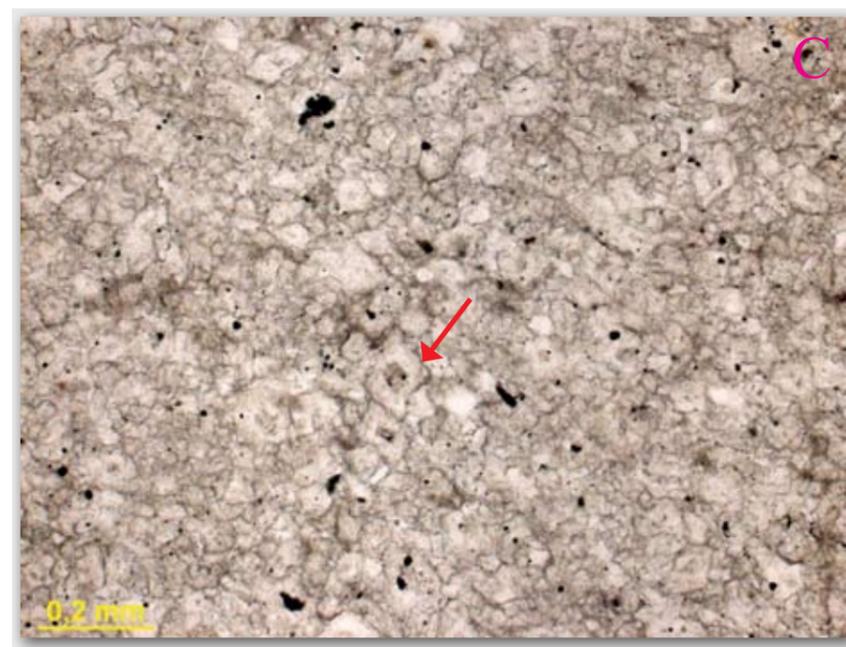
A fácies de dololutito apresenta coloração creme claro a cinza claro, localmente com níveis mais escuros e ocorre com estrutura laminada ou maciça. É comum a presença de finos cristais de pirita dispersos ou concentrados em níveis (concordante com a laminação). Em algumas profundidades a laminação é observada com dificuldade devido à intensa recristalização da rocha. Localmente ocorrem estruturas de escorregamento e também por vezes as camadas apresentam um leve arqueamento, sendo estas feições produto de deformação sin-sedimentar.

Em lâmina petrográfica pode-se observar que o dololutito é constituído por cristais de dolomita anédricos de cristalinidade muito fina a fina, raramente média, por vezes com porções de cristalinidade muito grossa, tratando-se neste caso de cimentação do espaço poroso. É comum a presença de pequena quantidade de grãos subangulosos a angulosos de quartzo e raramente muscovita, de granulação silte a areia muito fina. Localmente ocorrem níveis delgados silicificados, com a presença de quartzo, microquartzo e calcedônia.

Tanto macro como microscopicamente pode-se observar a presença de filmes de dissolução, estilólitos e fraturas fechadas ou cimentadas por dolomita.

Esta fácies aparece com maior abundância na base da seqüência, diminuindo sua ocorrência em direção ao topo.

Figura 161: Dololuto



A - Foto de detalhe do dololuto. Notar que a rocha apresenta laminação e filmes de dissolução paralelos ao acamamento (setas). Profundidade: 107,27m.

B - Fotomicrografia da fácies de dololuto. Notar a presença de filmes de dissolução (seta). Profundidade: 107,24m.

C - Fotomicrografia de detalhe mostrando os cristais romboédricos de dolomita presentes na fácies de dololuto (seta). Profundidade: 107,26m.



Figura nº162 Seta indicando porosidade cimentada na fácies de dololuto. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 11,05m.



Figura nº163 Dololuto laminado com deformação sin-sedimentar (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 26,25m.

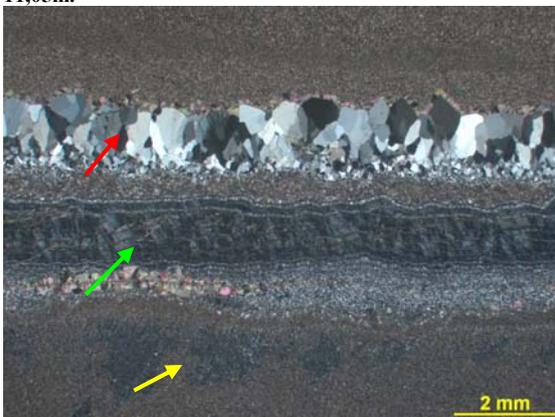


Figura nº164 Detalhe de níveis de silicificação. Seta amarela indicando microquartzo, seta verde indicando calcedônia e seta vermelha indicando quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 75,71m.



Figura nº165 Seta indicando fratura cimentada por dolomita na fácies de dololuto. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 90,70m.

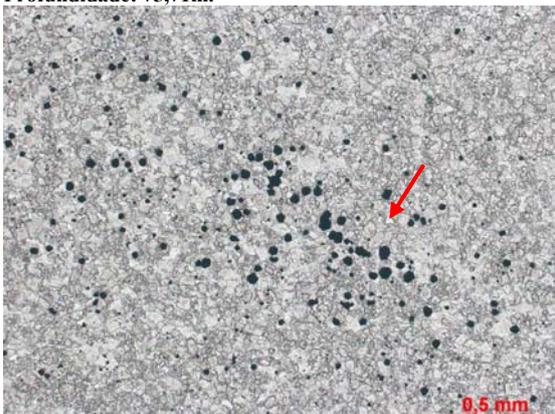


Figura nº166 Finos cristais de pirita ocorrendo de forma dispersa ou concentrada em porções da rocha (seta) . Fotomicrografia, P//. Profundidade: 90,70m

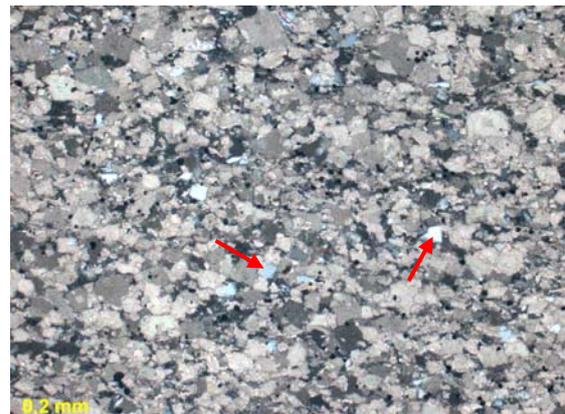


Figura nº167 Setas indicando grãos de quartzo tamanho silte a areia muito fina dispersos na rocha. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 107,24m

6.2.2 Fácies de dolarenito intraclástico

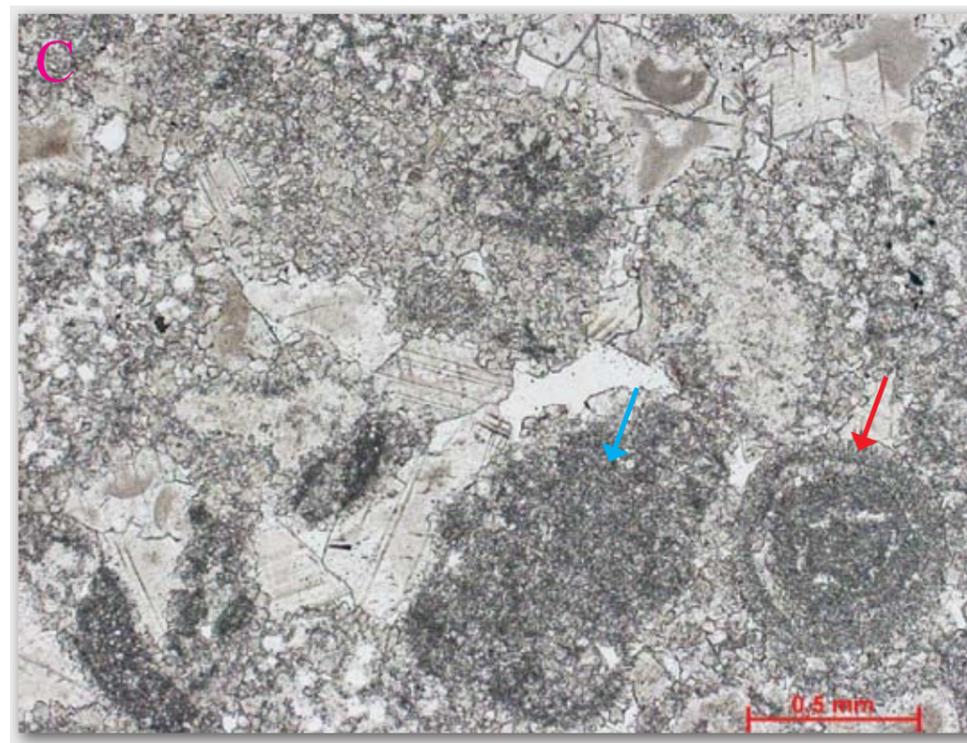
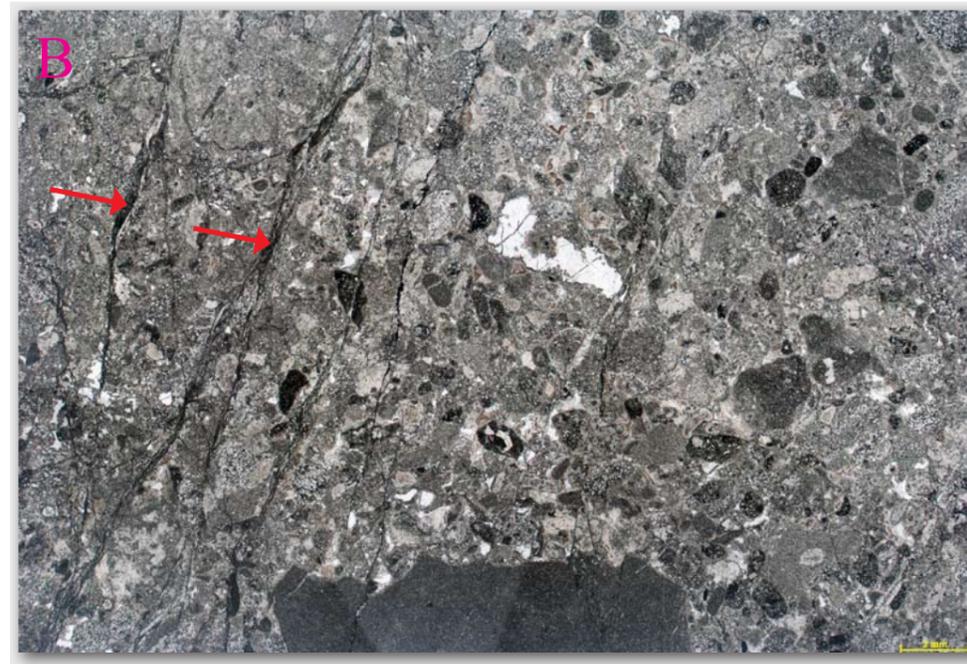
A fácies de dolarenito intraclástico é composta por grãos carbonáticos de coloração creme claro a cinza escuro, arredondados a subangulosos, com granulação variando de areia fina a muito grossa, com alguns grânulos e seixos, moderadamente a mal selecionado. Localmente observa-se granodecrescência para o topo, o que indica tratar-se de um depósito por fluxo gravitacional.

Em lâmina petrográfica observa-se que os principais grãos constituintes do dolarenito são fragmentos intraclásticos carbonáticos e oolitos/oncolitos, podendo ocorrer também fragmentos de siltito e mais raramente de argilito. É comum a ocorrência de grãos parcial a intensamente silicificados. O contato entre os grãos é pontual, planar e flutuante, o que indica baixo grau de compactação.

A rocha encontra-se intensamente cimentada e recristalizada, sendo que localmente pode-se identificar pelo menos duas fases de cimentação carbonática e por vezes cimentação por quartzo. Uma primeira fase de cimentação, provavelmente marinha, resultou na formação de cimento com forma botrioidal, crescendo nas paredes da porosidade intergranular. Posteriormente cresce cimento blocoso sintaxialmente ao cimento botrioidal. Estas duas fases de cimentação, inicialmente calcíticas, encontram-se hoje dolomitizadas. Dolomita e sílica (quartzo e calcedônia) também ocorrem como cimento, neste caso formados já em fase avançada de soterramento.

Observam-se finos cristais de pirita, principalmente associados com o cimento carbonático.

Figura 168: Dolarenito



A - Foto de detalhe do dolarenito. Seta indicando granodecrescência para o topo. Profundidade: 91,17m.

B - Fotomicrografia da fácies de dolarenito. Setas indicando fraturas. Profundidade: 36,16m.

C - Fotomicrografia de detalhe do dolarenito. Seta vermelha indicando grão de oolito/oncolito e seta azul indicando fragmento lítico carbonático. Profundidade: 36,16m.

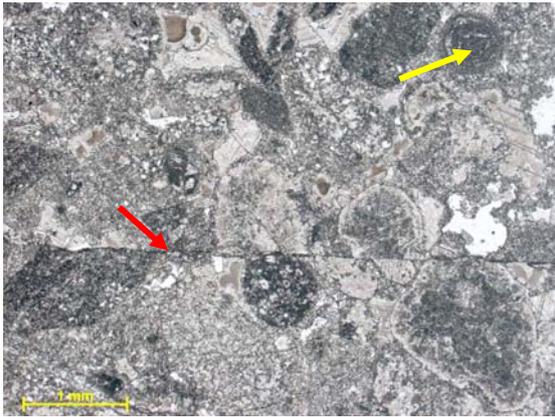


Figura nº169 Detalhe do dolarenito. Seta vermelha indicando microfalha e seta amarela indicando possível oolito/oncolito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 36,16m.

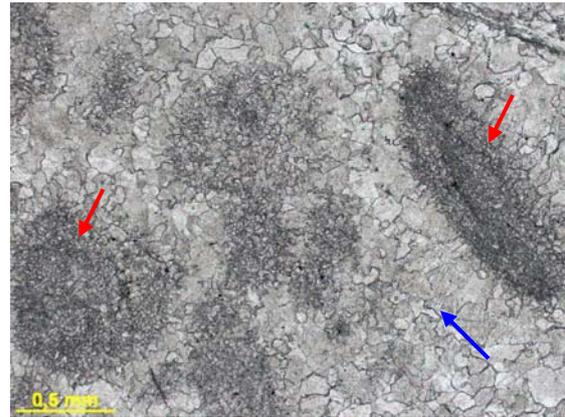


Figura nº170 Detalhe do dolarenito. Setas vermelhas indicando os grãos (dolomita com cristalinidade fina) e seta azul indicando cimento dolomítico. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 56,75m.



Figura nº171 Seta indicando cimento dolomítico com forma botrioidal e cor mais escura. Cristais límpidos de dolomita crescem posteriormente como sobrecrecimento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 36,16m.

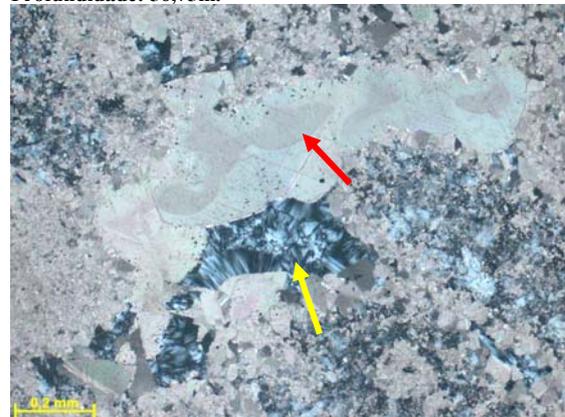


Figura nº172 Seta indicando cimento dolomítico com forma botrioidal e cor mais escura. Cristais límpidos de dolomita crescem posteriormente como sobrecrecimento, e seta amarela indicando cimentação por calcedônia. Mesma visada da figura 170. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,16m.

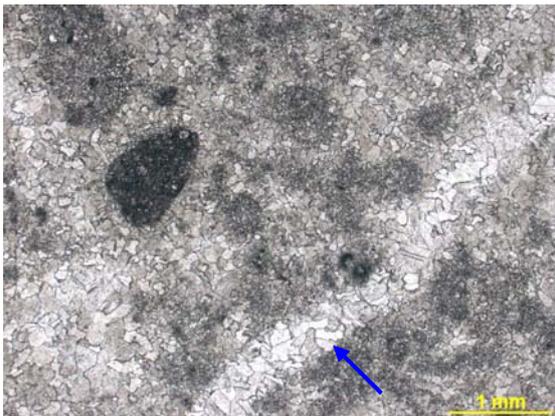


Figura nº173 Dolarenito com fratura cimentada por dolomita (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 56,75m.

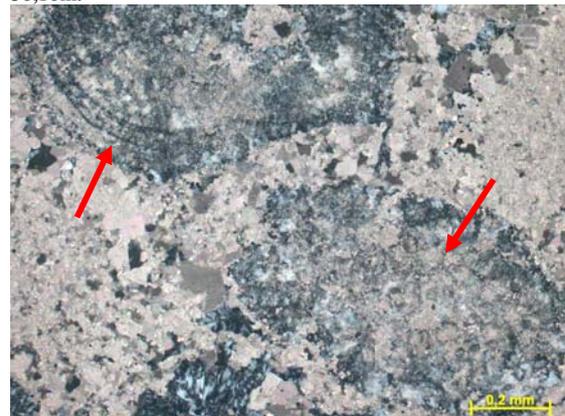


Figura nº174 Detalhe dos grãos carbonáticos parcialmente silicificados, podendo-se ainda observar formas concêntricas, correspondendo à estrutura interna de oolito/oncolito. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,16m.

6.2.3 Fácies de dolorrudito intraclástico (brecha carbonática)

O dolorrudito intraclástico, de coloração cinza claro a cinza médio, é composto por intraclastos carbonáticos, cuja granulação varia de areia média a matacão. Os intraclastos são angulosos a subangulosos e representam variadas litologias, tendo sido identificados matações e blocos de dololuto com porosidade fenestral, clastos decimétricos compostos por colunas estromatolíticas, e fragmentos centimétricos de dololuto maciço ou laminado. Observa-se em lâmina delgada a presença de raros intraclastos de arenito muito fino e silexito.

A grande variação granulométrica, além da presença de clastos angulosos, por vezes métricos, indicam que esta fácies corresponde a brecha carbonática, formada em posição instável da plataforma. Porém o termo dolorrudito é adotado na literatura referente a região, enquanto o termo brecha é reservado para feições hidrotermais e tectônicas.

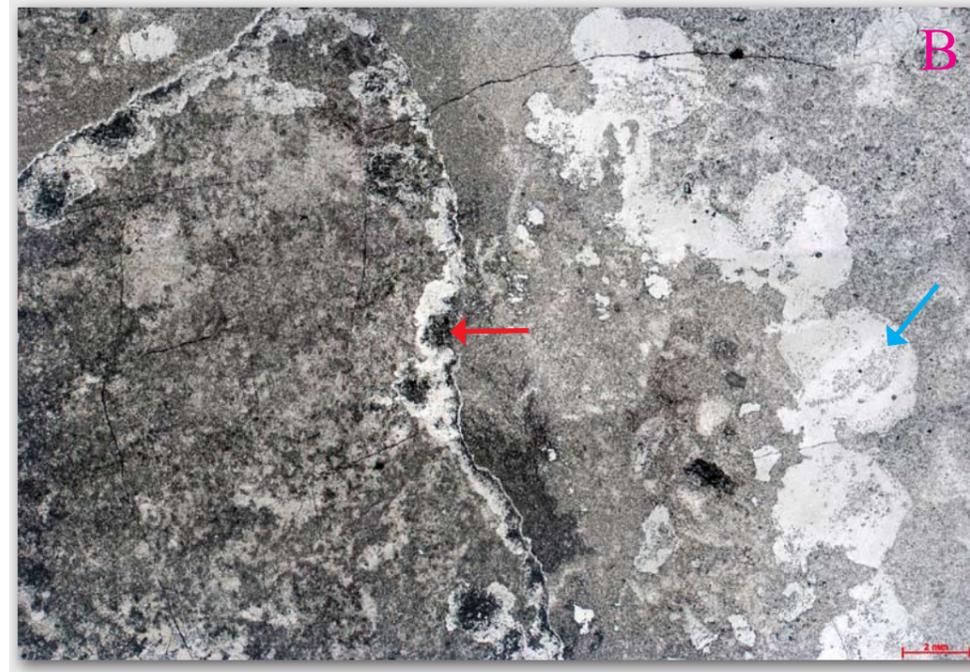
O dolorrudito possui matriz predominantemente micrítica, porém no intervalo de 28,58m a 40,80m, próximo às fácies de calcarenito e intercalado com as fácies de dololuto, a matriz é tamanho areia. Raramente observa-se a matriz com aspecto peloidal e localmente grãos de quartzo tamanho silte ocorrem dispersos na matriz.

Alguns fragmentos carbonáticos apresentam silicificação nas bordas ou por vezes no interior do fragmento. A rocha encontra-se cimentada, tendo sido reconhecida pelo menos três fases de cimentação carbonática distintas, e localmente ocorrendo cimentação por sílica (quartzo e calcedônia). Como primeira fase de cimentação, provavelmente marinha, ocorre cimento fibro-radial e botrioidal, crescendo nas paredes da porosidade intergranular em direção ao centro do poro. Posteriormente foi precipitado cimento do tipo drusa, com cristais menores próximo aos grãos e cristais maiores no centro dos poros. Estas fases de cimentação originalmente calcíticas e/ou aragoníticas foram posteriormente dolomitizadas. Dolomita e sílica (quartzo e calcedônia) também ocorrem como cimento, porém neste caso formados já em fase avançada de soterramento.

Observam-se também manchas de silicificação, por vezes com formas arredondadas. Cristais finos de pirita são comuns, estando associados com a silicificação ou dispersos na rocha.

A fácies de dolorrudito é a litologia predominante no poço PFF-57, presente desde a base até o topo, com níveis de até 14 metros de espessura.

Figura 175: Dolorrudito

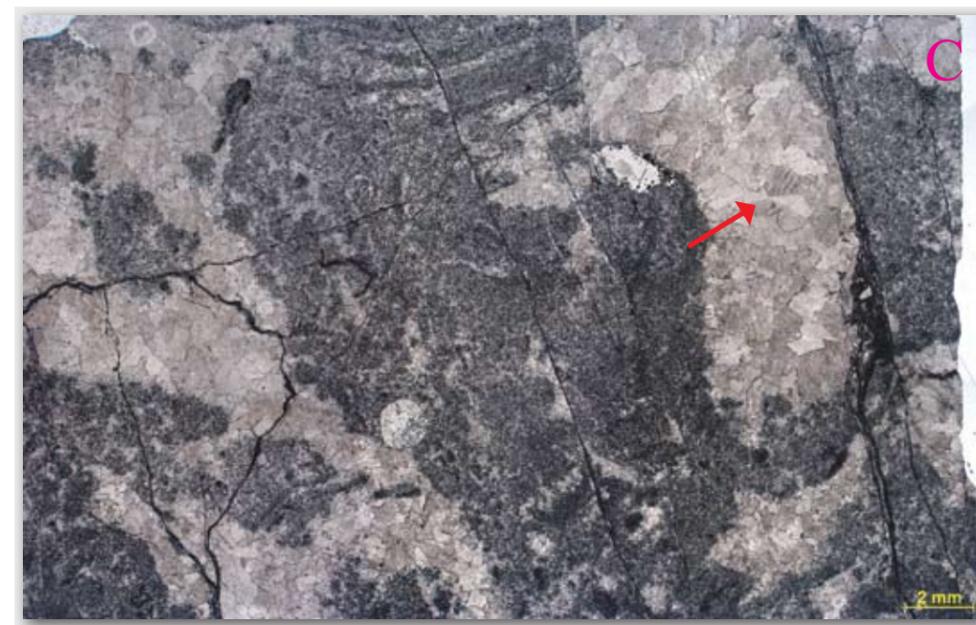
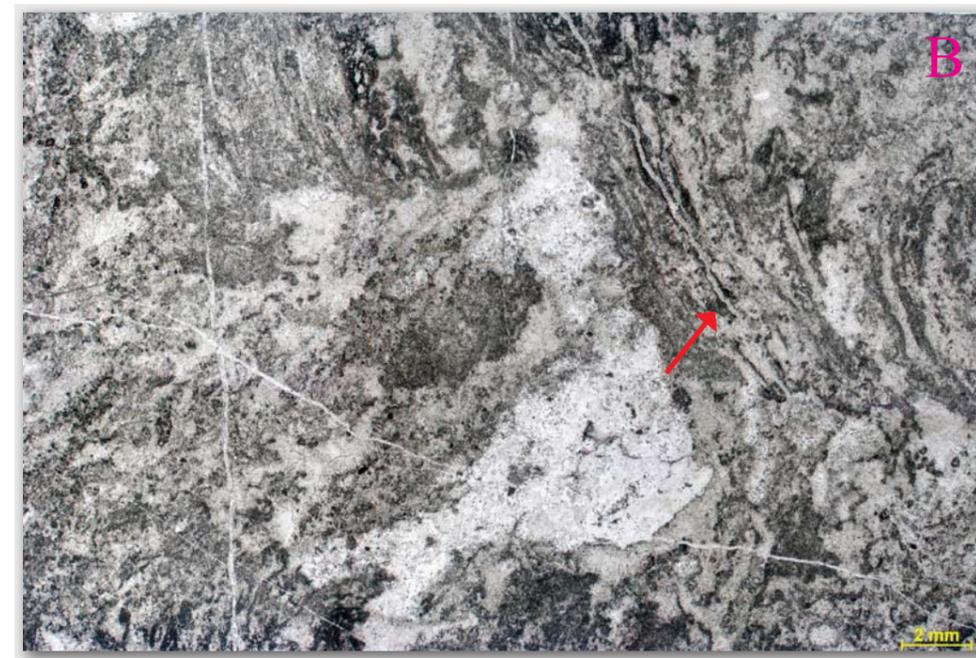


A - Foto de detalhe de dolorrudito. Notar mau selecionamento dos grãos. Seta indicando fragmento intraclástico com porosidade fenestral cimentada. Profundidade: 18,57m.

B - Fotomicrografia do dolorrudito. Seta vermelha indicando fragmento lítico carbonático com bordas silicificadas. Seta azul indicando silicificação com formas arredondadas. Profundidade: 17,08m.

C - Fotomicrografia do dolorrudito. Setas indicando fragmentos líticos carbonáticos. Profundidade: 25,18m.

Figura 176: Dolorrudito



A - Foto de detalhe do dolorrudito. Parte superior da foto corresponde a fragmento intraclástico de carbonato microbial estromatolítico (seta). Profundidade: 121,20m.

B - Fotomicrografia de fragmento intraclástico de carbonato microbial estromatolítico pertencente ao dolorrudito. Notar laminações internas do estromatolito (seta). Profundidade: 85,02m.

C - Fotomicrografia do dolorrudito. Seta indicando cimento dolomítico. Profundidade: 76,67m.

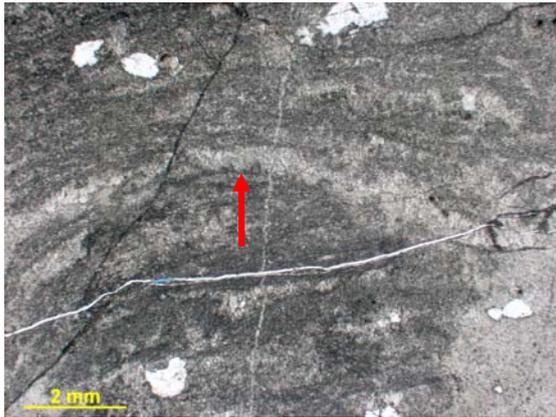


Figura nº177 Detalhe do fragmento lítico com estrutura interna arqueada (possivelmente estrutura estromatolítica). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 14,60m.

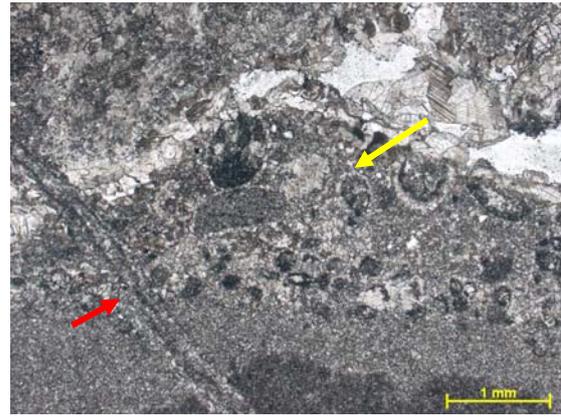


Figura nº178 Seta amarela indicando fragmento de calcarenito e seta vermelha indicando fratura. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 36,67m.

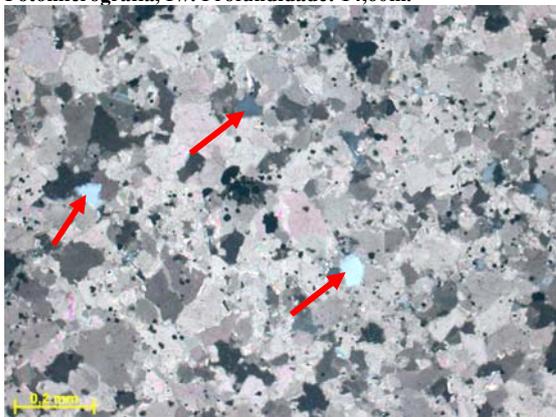


Figura nº179 Setas indicando grãos de quartzo tamanho silte dispersos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 25,18m.



Figura nº180 Seta vermelha indicando dolomita fibro-radial crescendo em direção ao centro da porosidade e seta azul indicando cristais regulares de dolomita obliterando totalmente o espaço poroso. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 39,75m.

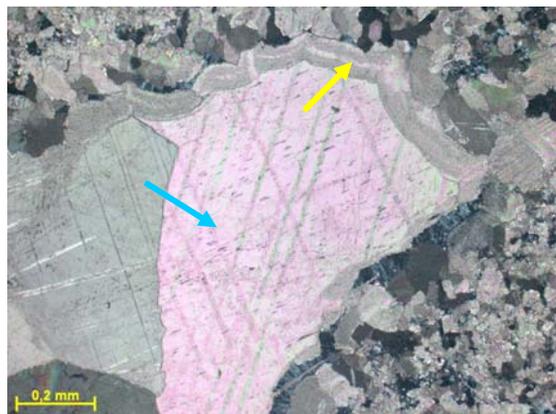


Figura nº181 Seta amarela indicando cimento com aspecto micrítico e forma botrioidal nas bordas do poro e seta azul indicando cristal de dolomita de cristalinidade muito grossa obliterando o poro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 37,80m.



Figura nº182 Seta indicando cimentação por sílica (calcedônia nas bordas e quartzo no centro) e dolomita. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 25,18m.

Alguns fragmentos que compõem o dolorrudito apresentam estrutura fenestral e seu tamanho pode chegar a matacão (na profundidade de 13 m ocorre fragmento intraclástico carbonático com 70 cm de tamanho). A estrutura fenestral ocorre como manchas brancas, cimentadas por dolomita

(cristalinidade mais grossa), tratando-se possivelmente de porosidade primária ou secundária (porosidade primária alargada) da rocha, já completamente obliterada. Nota-se também uma textura grumosa e intenso processo de estilolitização. Localmente apresenta textura geopetal (observada na profundidade de 106,73m), indicando neste caso tratar-se de porosidade primária, a qual foi parcialmente preenchida por sedimentos carbonáticos finos e posteriormente cimentada. A estrutura geopetal é típica de diagênese em zona meteórica vadosa.



Figura nº183 Dolomito com porosidade fenestral cimentada por cristais de dolomita mais grossos (setas) – fragmento dentro da brecha carbonática (dolorrudito). Profundidade 13,60m, cx 04.

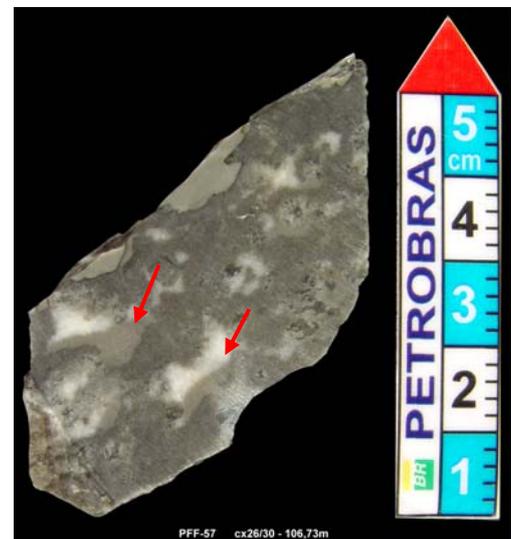


Figura nº184 Dolomito com estrutura fenestral e textura geopetal (setas) – fragmento dentro da brecha carbonática (dolorrudito). Profundidade 106,73m, cx 26.

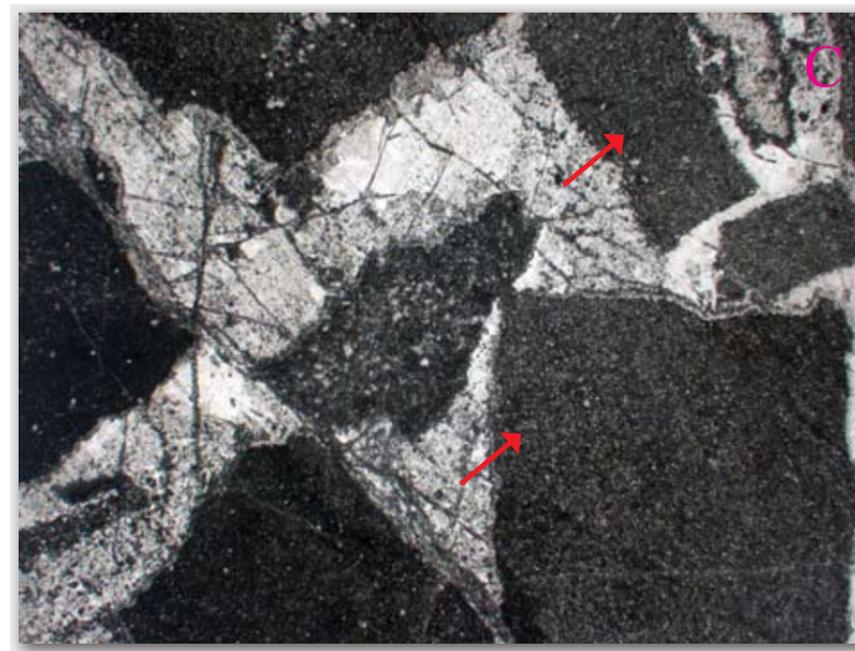
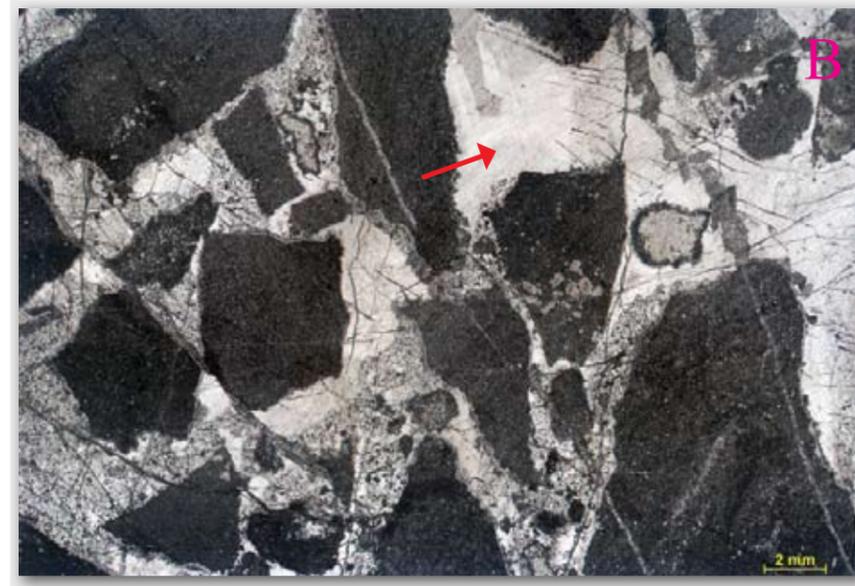
6.2.4 Fácies de brecha dolomítica de falha

A fácies de brecha dolomítica de falha, de coloração cinza médio a cinza escuro, é produto da fragmentação da rocha pela ação de falhas e fraturas, apresentando entre os clastos cimento silicoso (quartzo e calcedônia) e dolomítico. Os clastos apresentam tamanho variando de seixo a bloco, com formas angulosas.

O cimento dolomítico ocorre numa fase anterior à sílica. Localmente foram reconhecidas pelo menos quatro fases de crescimento no cimento de sílica, aonde a primeira fase é composta por microquartzo, a segunda por calcedônia, a terceira é novamente microquartzo e a quarta é composta por quartzo.

Observa-se uma delgada borda de alteração nos clastos devido à interação com os fluidos mineralizantes. É comum a presença de cristais cúbicos de pirita dispersos na rocha.

Figura 185: Brecha dolomítica de falha



A - Foto de detalhe de brecha dolomítica de falha. Seta indicando fragmentos de rocha na brecha. Profundidade: 9,25m.

B - Fotomicrografia de brecha dolomítica de falha cimentada por sílica (seta). Profundidade: 9,25m.

C - Fotomicrografia mostrando detalhe da brecha carbonática dolomítica de falha. Notar fragmentos angulos (setas). Profundidade: 9,25m.

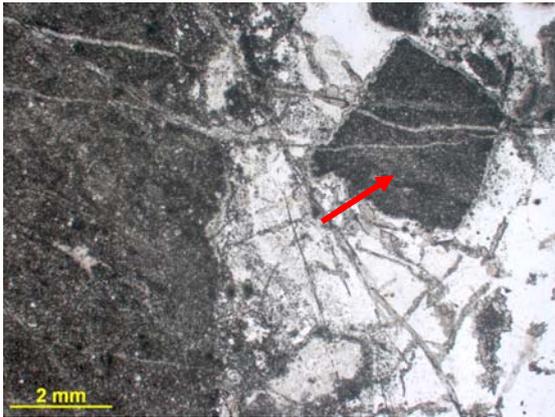


Figura nº186 Seta indicando fragmento carbonático em meio à porção silicificada, cortado por fraturas. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 8,75m.



Figura nº187 Detalhe da cimentação por sílica (calcedônia) entre os fragmentos carbonáticos. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 8,75m.

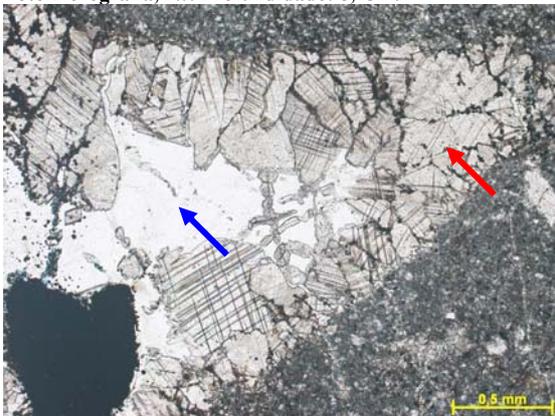


Figura nº188 Detalhe do espaço intergranular cimentado por dolomita (seta vermelha) e sílica (seta azul). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 8,75m.



Figura nº189 Detalhe do cimento de sílica apresentando várias fases de crescimento. Seta vermelha indicando microquartzo (primeira fase), seta amarela indicando calcedônia (segunda fase), seta verde indicando microquartzo (terceira fase) e seta azul indicando quartzo (última fase de cimentação). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 9,25m.

6.2.5 Empilhamento de fácies e condições deposicionais – Formação Morro do Calcário

O intervalo amostrado no furo PFF-57 contemplou apenas rochas da Formação Morro do Calcário, Grupo Vazante. O predomínio de brecha carbonática muito mal selecionada (dolorrudito intraclástico), com fragmentos que variam o tamanho de grânulo a matacão, apresentando matriz micrítica ou calcarenítica, intercalado com deposição de lama carbonática, ou localmente, com fluxo de areia carbonática, indica uma posição instável na plataforma, possivelmente no talude. Fluxos gravitacionais se intercalam com deposição em condições mais calmas, com a presença de lama carbonática.

A grande quantidade de fragmentos de estromatolitos e areia carbonática indica uma posição próxima a recife microbial (biohermas estromatolíticas) e a ambientes de alta energia. Observando a Formação Morro do Calcário em afloramento, pode-se observar a presença de biohermas de estromatolitos colunares próximo a dolorruditos e dolarenitos com intraclastos de estromatolitos. Foi possível notar feições que indicam uma alta instabilidade do substrato durante o crescimento dos estromatolitos, sendo comum a presença de colunas estromatolíticas que mudam abruptamente sua direção de crescimento (Figura 193). Observou-se também o crescimento de estromatolitos em matações (intraclastos de dolarenito) transportados para o ambiente microbial (Figura 194).

Figura 190:
Empilhamento de fácies

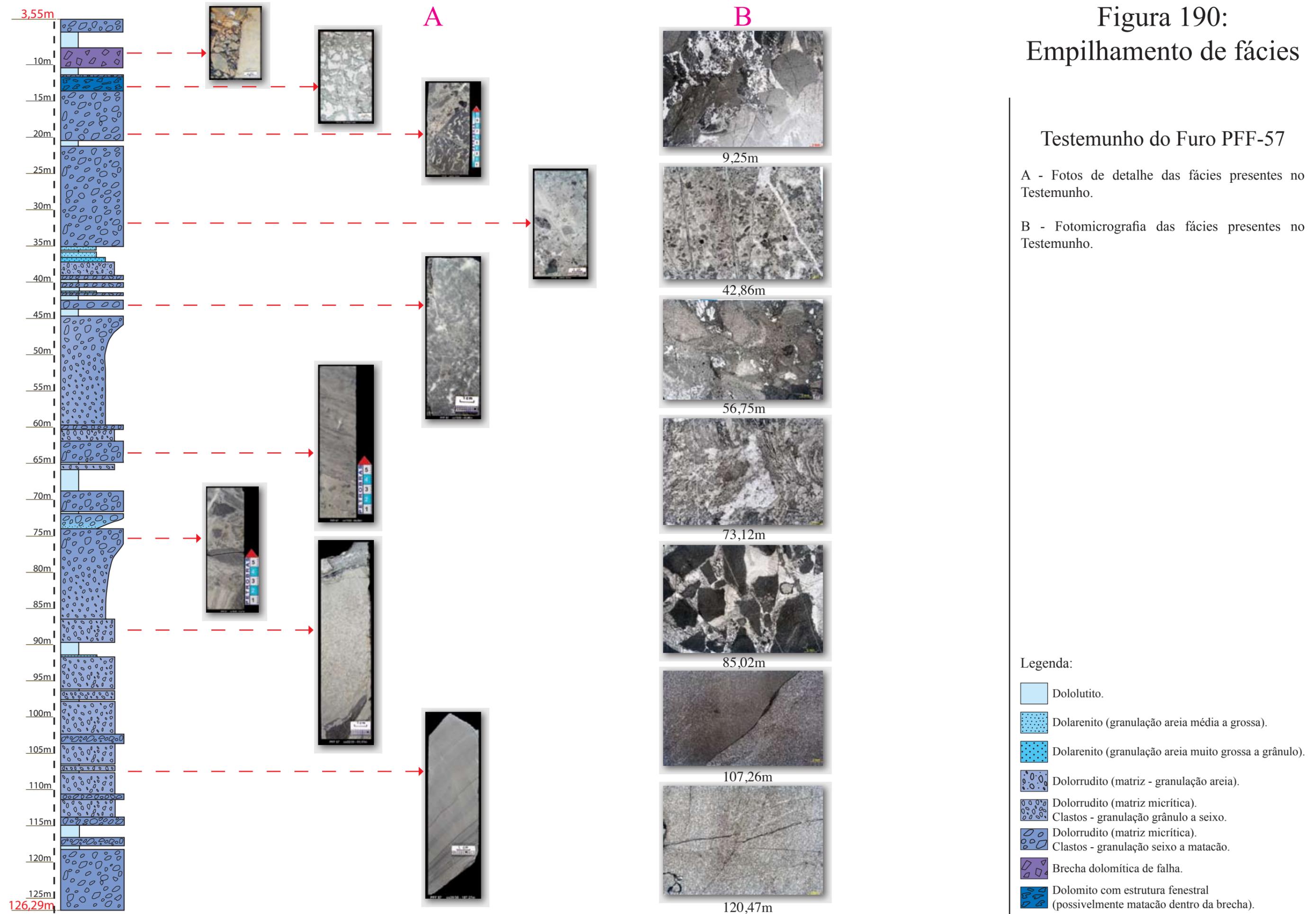




Figura nº191 Bioherma de estromatolitos colunares. Formação Morro do Calcário. Pedreira Poções, Fagundes.



Figura nº192 Dolorrudito muito mal selecionado, com blocos e matacões (setas). Pôde-se observar que alguns matacões são fragmentos de biohermas de estromatolitos colunares. Formação Morro do Calcário. Pedreira Poções, Fagundes.



Figura nº193 Detalhe de estromatolito colunar. Notar que sua direção de crescimento muda completamente, indicando movimentação do substrato. Formação Morro do Calcário. Pedreira Poções, Fagundes.



Figura nº194 Setas indicando o crescimento de estromatolitos ao redor de bloco de dolarenito, indicando que durante a deposição havia movimentação de blocos rolados. Formação Morro do Calcário. Pedreira Poções, Fagundes.

Os carbonatos da Formação Morro do Calcário formaram-se possivelmente em um contexto deposicional de águas rasas, aonde biohermas de estromatolitos colunares e bancos calcareníticos se desenvolveram. O substrato nesta época era bastante instável, tendo em vista tratar-se de um depósito em bacia de *foreland* (Guimarães 1993, Alkmim & Martins-Neto 2001), aonde o tectonismo era muito ativo.

6.2.6 Eventos diagenéticos na Formação Morro do Calcário

Cimentação eodiagenética

Apesar do intenso processo de dolomitização que atuou nos carbonatos da Formação Morro do Calcário, pôde-se identificar a presença de cimentação eodiagenética, possivelmente marinha.

Um cimento fibro-radial ocorre nas fácies de dolorrudito, o qual cresce a partir das bordas dos grãos em direção ao centro do espaço intergranular. Ora o cimento preenche totalmente o espaço intergranular, ora ainda resta espaço poroso, o qual é posteriormente cimentado. Em catodoluminescência observa-se que este cimento apresenta baixa luminescência, semelhante a da matriz da rocha.

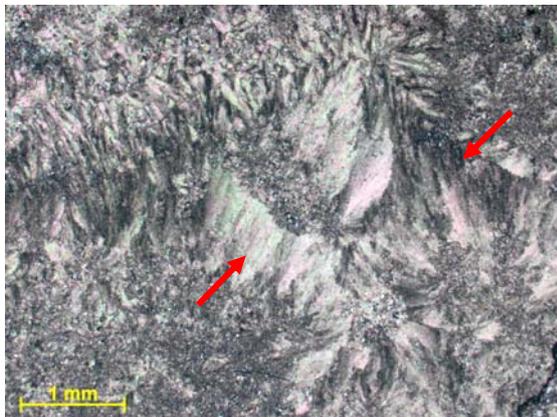


Figura nº195 Detalhe da dolomita fibro-radial, tratando-se provavelmente de cimentação calcítica marinha dolomitizada. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 39,75m.



Figura nº196 Seta vermelha indicando dolomita fibro-radial crescendo em direção ao centro da porosidade e seta azul indicando cristais equantes de dolomita obliterando o espaço poroso. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 39,75m.

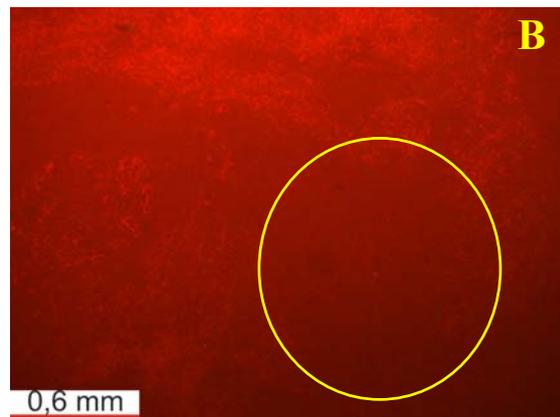
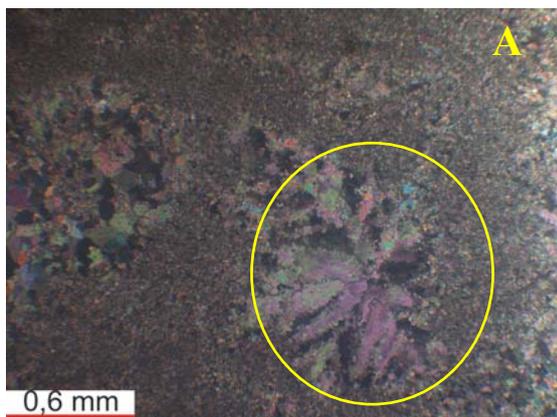


Figura nº197 A - Círculo mostrando dolomita fibro-radial. Fotomicrografia, PX. B - Imagem de catodoluminescência correspondendo à foto A. Pode-se notar que a luminescência da dolomita fibro-radial é baixa, semelhante à da matriz da rocha. Profundidade: 85,02m

Outro tipo de cimento precoce, também marinho, foi observado na fácies de dolarenito. Este apresenta forma botrioidal, com um núcleo mais escuro, apresentando textura micrítica. Posteriormente ocorre crescimento de cristais mais límpidos, blocosos, neste caso formados após o soterramento. O cimento botrioidal encontra-se atualmente dolomitizado, mas sua provável composição original é calcítica.

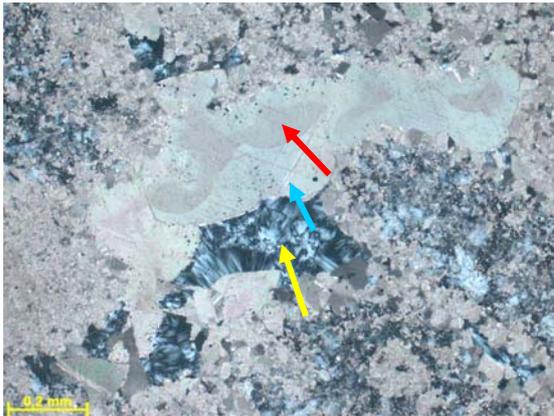


Figura nº198 Seta vermelha indicando cimento dolomítico com forma botrioidal, seta azul indicando cimento dolomítico blocoso e seta amarela indicando cimentação por calcedônia. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,16m

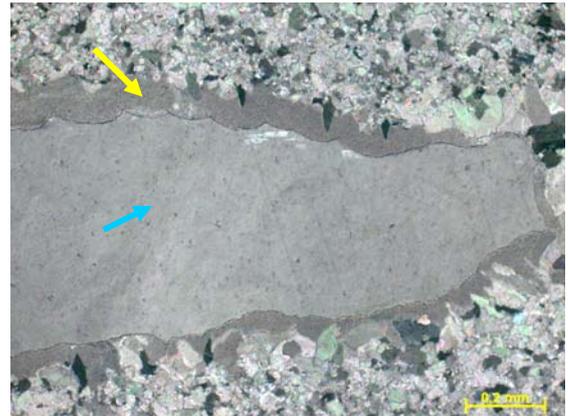


Figura nº199 Seta amarela indicando cimento botrioidal com textura micrítica crescendo nas bordas do poro e seta azul indicando cristal de dolomita de cristalinidade muito grossa obliterando o poro. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 37,80m.

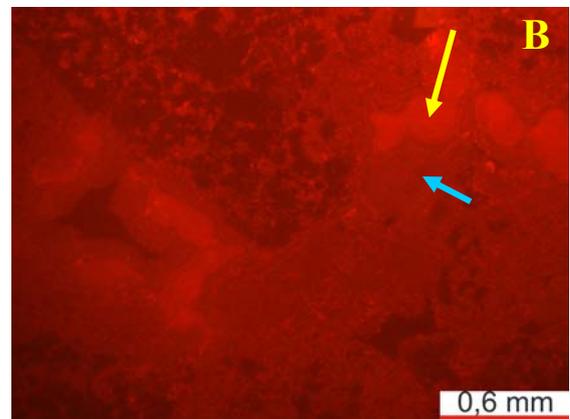
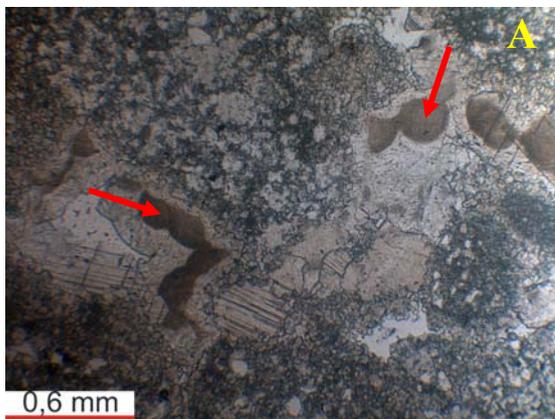


Figura nº200 A – Detalhe do cimento botrioidal com núcleo micrítico e sobre crescimento de cimento de dolomita com cristais límpidos e de cristalinidade grossa. Fotomicrografia, P//. B - Imagem de catodoluminescência correspondendo à foto A. Nota-se que o núcleo do cimento botrioidal (seta amarela) apresenta luminescência maior que as bordas (seta azul), indicando tratar-se de fases diferentes de cimentação. Fotomicrografia de catodoluminescência, profundidade: 38,92m.

Dolomitização

As fácies carbonáticas da Fm. Morro do Calcário presentes no furo PFF-57 encontram-se dolomitizadas. A dolomita foi caracterizada através de análises de petrografia e difração de raios-x.

As análises por difração de raios-x mostraram que a fase carbonática que compõe a matriz da rocha é 100% dolomítica (Figura 201). Uma particularidade observada foi a presença de magnesita associada somente às dolomitas de fraturas (Figura 202).

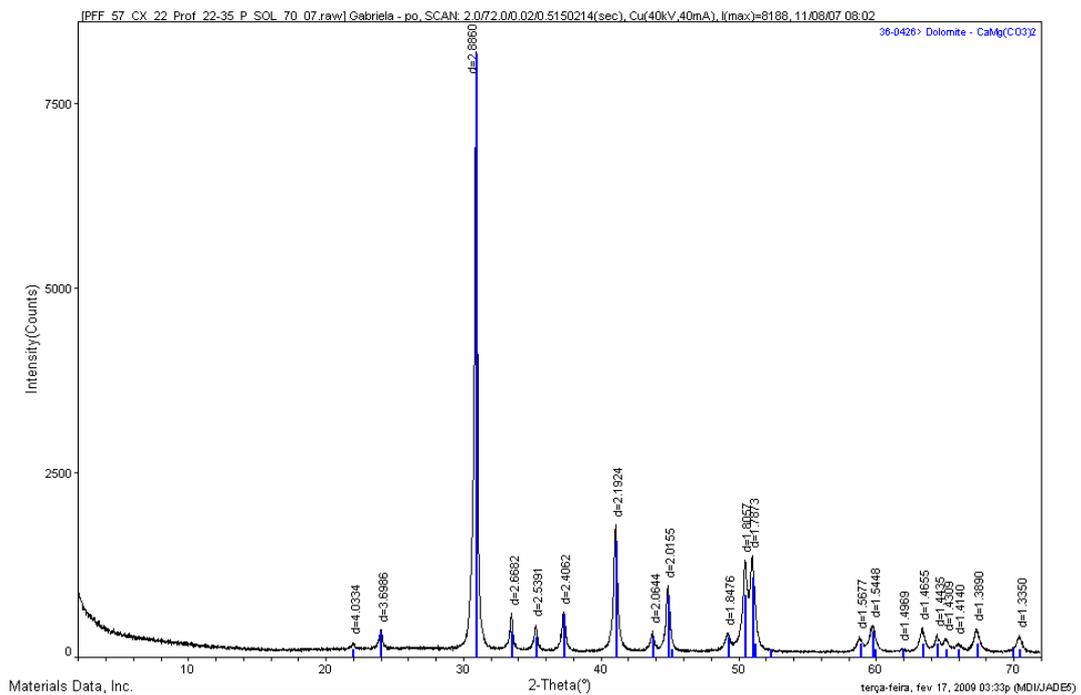


Figura nº201 Difractograma mostrando a composição da amostra como 100% dolomítica. Profundidade: 22,53m.

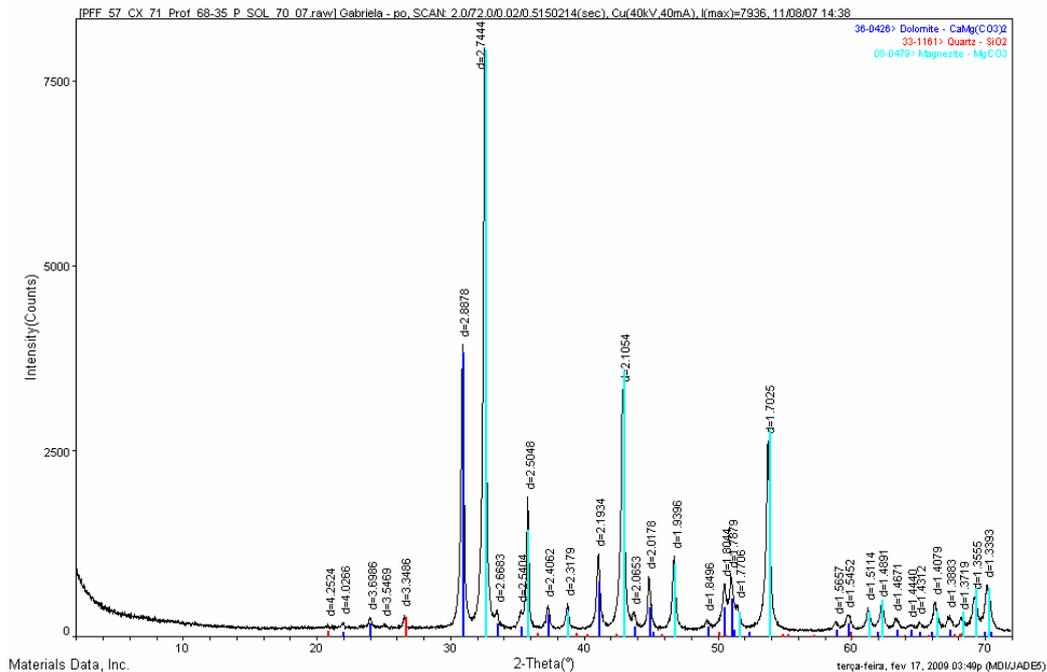


Figura nº202 Análise feita em material de preenchimento de fratura. Difractograma mostrando a presença de magnesita (azul claro), dolomita (azul escuro) e pequena quantidade de quartzo (vermelho). Profundidade: 68,35m.

Em lâmina petrográfica pode-se observar que os cristais de dolomita apresentam formas e tamanhos diferentes dependendo da sua gênese, ou seja, se a dolomita foi formada como substituição da rocha ou se está cimentando porosidade ou fratura.

Dolomita de substituição

Os cristais de dolomita originados pela substituição da rocha original são anédricos, com bordas muito irregulares (dolomita xenotópica). Como em geral dolomitas de substituição são hipidiotópicas e idiotópicas, a dolomita de substituição neste caso pode ter sofrido processo de recristalização, conferindo a esta a forma xenotópica.

A cristalinidade varia de muito fina a muito grossa, sendo esta variação relacionada diretamente com a textura original do grão ou do cimento substituído.

Observam-se fraturas cimentadas, aonde os cristais de dolomita também são xenotópicos. Neste caso a fratura e o cimento são anteriores à dolomitização ou de recristalização da dolomita.

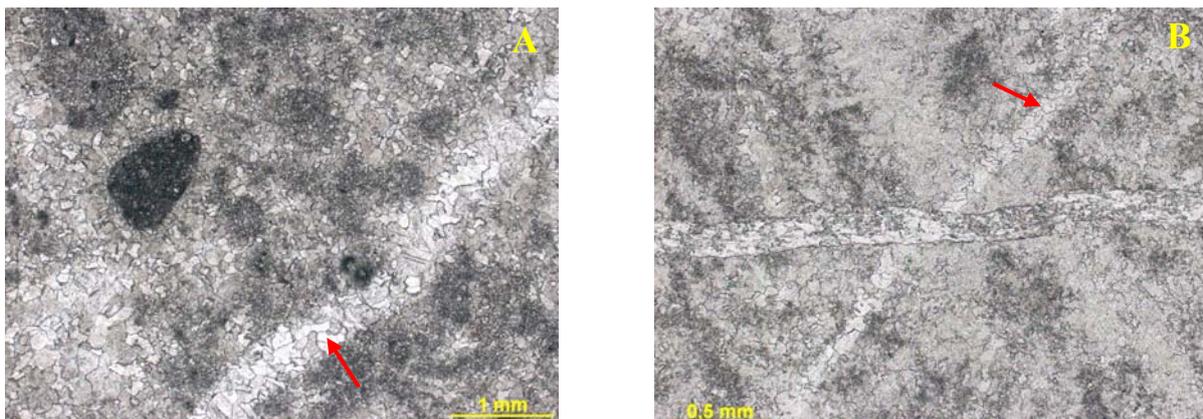


Figura nº203 Setas indicando fraturas cimentadas por dolomita xenotópica, indicando houve dolomitização ou recristalização após a cimentação. Fotomicrografias, P//. A) Profundidade: 56,75m. B) Profundidade: 85,02m.

Através de análises de catodoluminescência pode-se observar que a dolomita de substituição apresenta-se bastante homogênea, não sendo observada zonação. Geralmente a dolomita que substitui os grãos, bem como aquela que está substituindo o material intergranular, mostram luminescência baixa, semelhante. Os cristais de quartzo que ocorrem associados não apresentam luminescência.

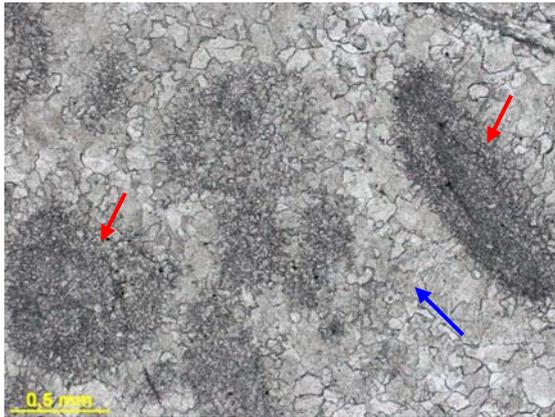


Figura nº204 Detalhe de dolarenito mostrando a diferença de cristalinidade da dolomita. Setas vermelhas indicando dolomita com cristalinidade fina, a qual está substituindo os grãos, e seta azul indicando dolomita mais grossa, a qual está substituindo o cimento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 56,75m.

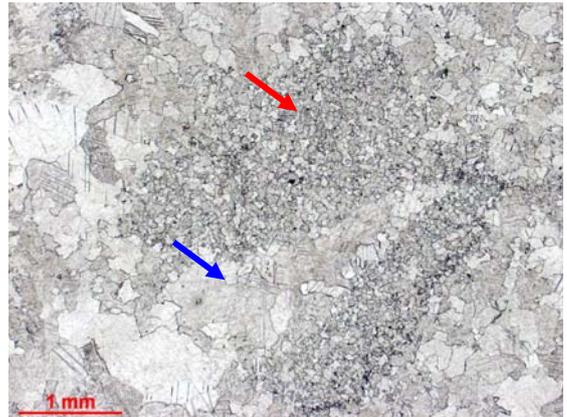


Figura nº205 Detalhe de brecha carbonática mostrando a diferença de cristalinidade da dolomita. Seta vermelha indicando dolomita com cristalinidade fina, a qual está substituindo os grãos, e seta azul indicando dolomita mais grossa, a qual está substituindo o cimento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 71,90m

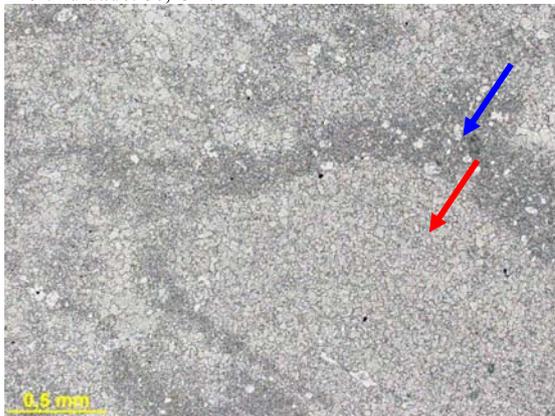


Figura nº206 Detalhe da brecha carbonática mostrando a diferença de cristalinidade da dolomita. Seta vermelha indicando dolomita com cristalinidade fina, a qual está substituindo os grãos, e seta azul indicando dolomita mais fina, a qual está substituindo a matriz. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 111,47m

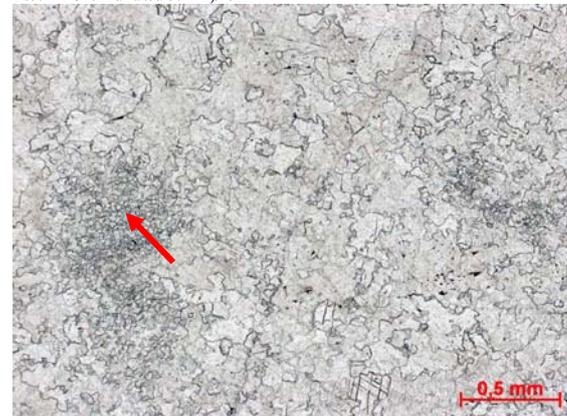


Figura nº207 Detalhe dos cristais de dolomita com bordas irregulares. Seta indicando porção com cristais mais finos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 38,92m.

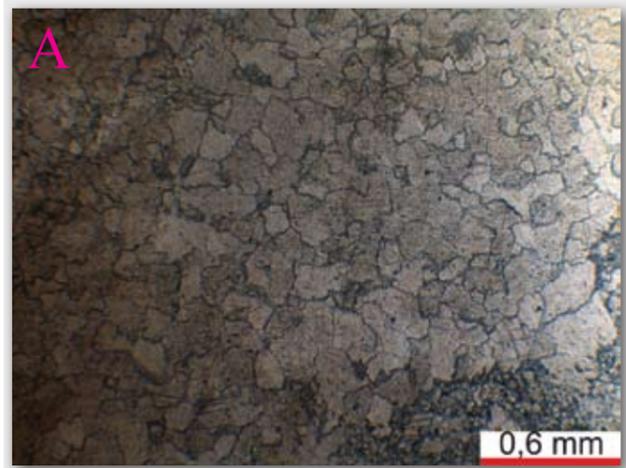


Figura nº208 Detalhe de dolomita fina a muito fina em dololuto. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 91,20m.

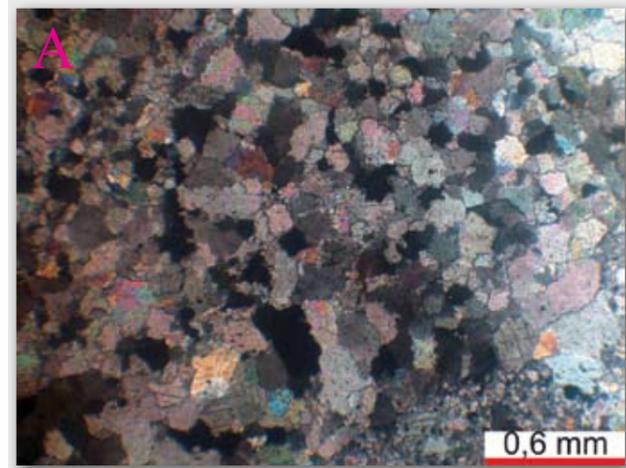


Figura nº209 Seta indicando delgado nível de granulação mais grossa, onde a dolomita também apresenta cristalinidade um pouco mais grossa. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 96,38m.

Figura 210: Dolomita de substituição



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



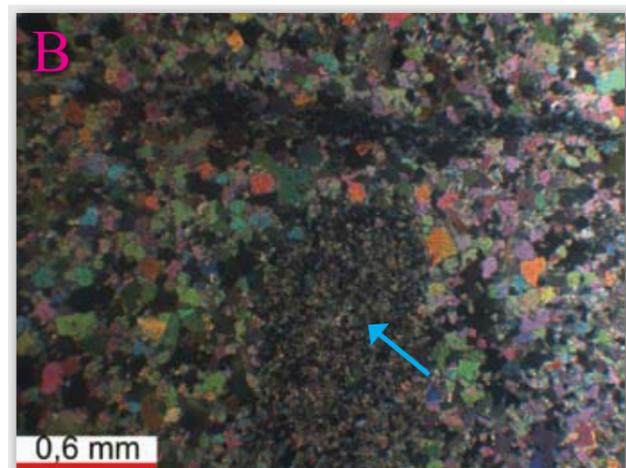
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



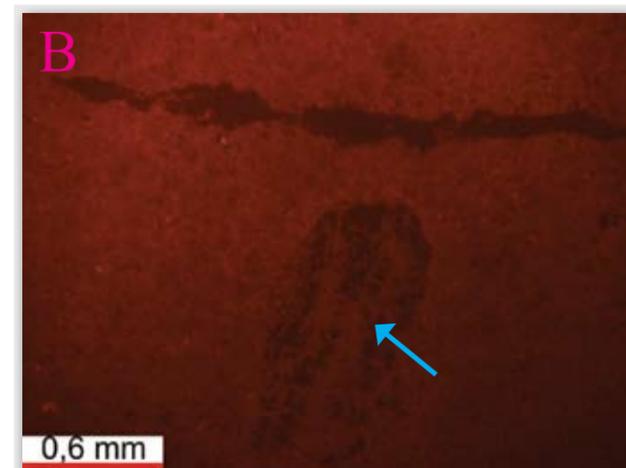
Fotomicrografia de catodoluminescência.



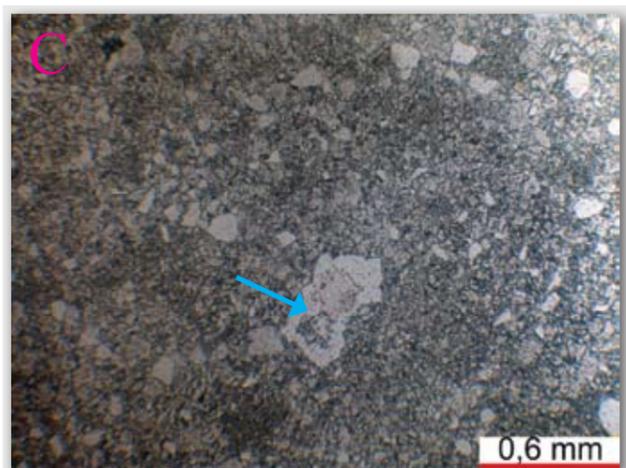
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



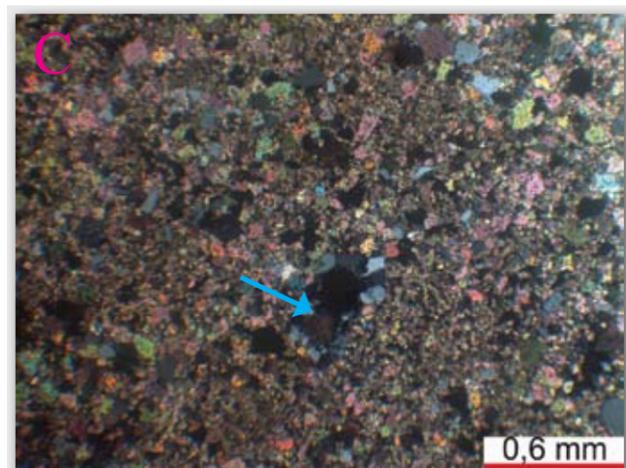
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



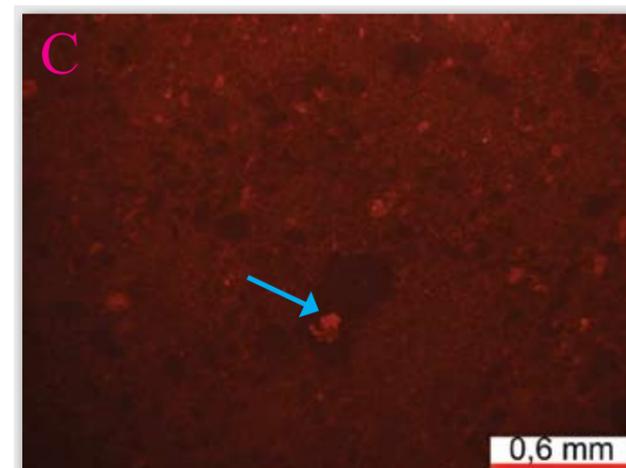
Fotomicrografia de catodoluminescência.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



Fotomicrografia de catodoluminescência.

Fotomicrografias mostrando a dolomita de substituição em lâmina delgada (polarizadores paralelos e cruzados) e em catodoluminescência.

A - Notar cristais de dolomita sem zonação, com luminescência homogênea. Profundidade: 25,18m.

B - Cristais de dolomita com luminescência homogênea. As porções com luminescência baixa ou ausente correspondem à sílica (setas). Profundidade: 80,30m.

C - Cristais de dolomita com luminescência homogênea. As porções com luminescência baixa ou ausente correspondem à sílica. Setas indicando cristais de dolomita com luminescência mais alta associados com sílica. Profundidade: 96,38m.

Dolomita de cimentação

Ocorre preenchendo cavidades pré-existentes, ou seja, os cristais crescem de forma a ocupar parcial ou totalmente poros e fraturas. A dolomita de cimentação apresenta cristalinidade maior e formas mais regulares (hipidiotópica a idiotópica), por vezes com hábito romboédrico e por vezes extinção levemente ondulante. Esta dolomita corresponde em parte à cimentação mesodiagenética, e em parte à cimentação durante evento de hidrotermalismo. Neste último caso a dolomita geralmente ocorre associada à sílica e apresenta cristalinidade muito grossa a extremamente grossa.

Através de análises de catodoluminescência pode-se observar que a dolomita de cimentação apresenta-se zonada. Em geral apresenta luminescência maior que a da matriz da rocha, porém algumas zonas de crescimento possuem baixa luminescência. Nas dolomitas que preenchem as fraturas são observadas pelo menos duas fases de cristalização, sendo que na primeira os cristais de dolomita apresentam baixa luminescência e na segunda, a qual cimenta completamente a fratura, a luminescência é maior. Através da catodoluminescência pôde-se constatar também que houve um processo de corrosão de parte do cimento em fratura, com posterior cimentação de dolomita (Figura 215).

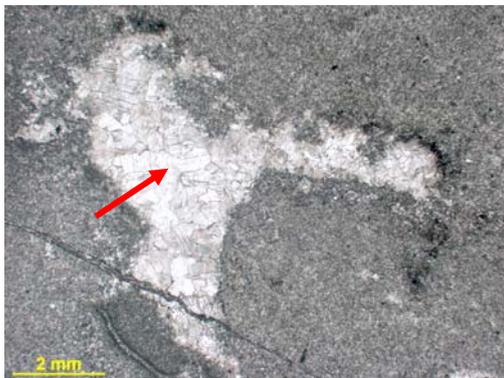


Figura nº211 Seta indicando porção da rocha aonde os cristais de dolomita apresentam cristalinidade grossa a muito grossa, tratando-se de cimentação mesodiagenética. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 11,05m.

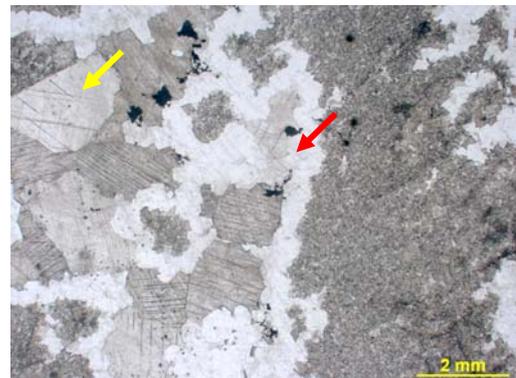


Figura nº212 Seta vermelha indicando sílica e seta amarela indicando cristais de dolomita muito grossos a extremamente grossos, tratando-se de cimentação durante hidrotermalismo. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 12,93m.



Figura nº213 Detalhe da cimentação por dolomita (cristais mais grossos). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 25,18m.

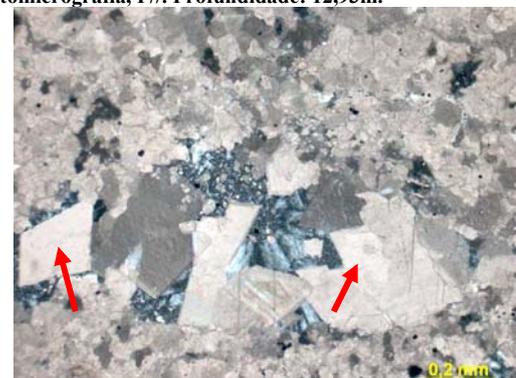
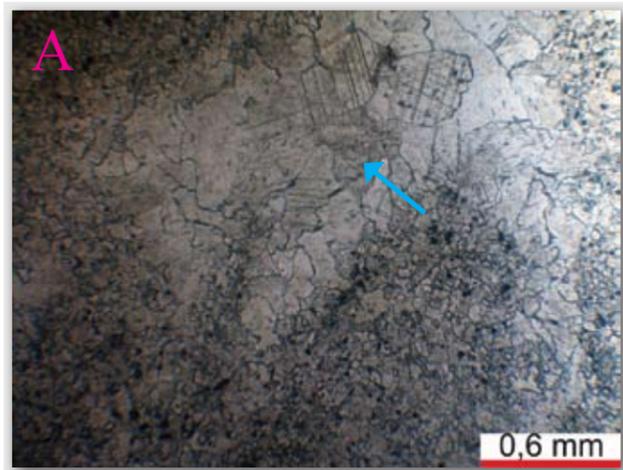
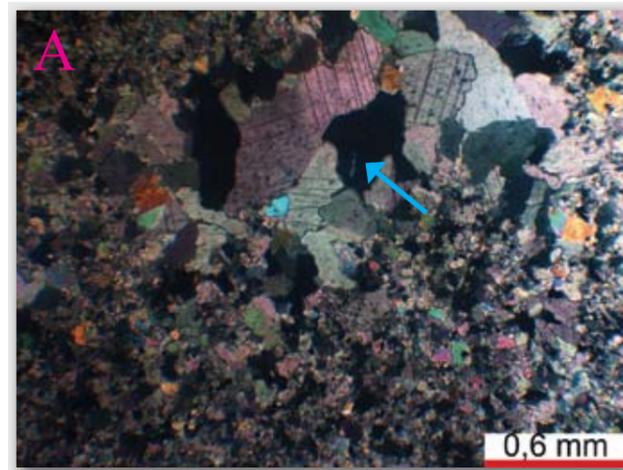


Figura nº214 Setas indicando cristais de dolomita romboédricos ocorrendo como cimento. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 73,12m.

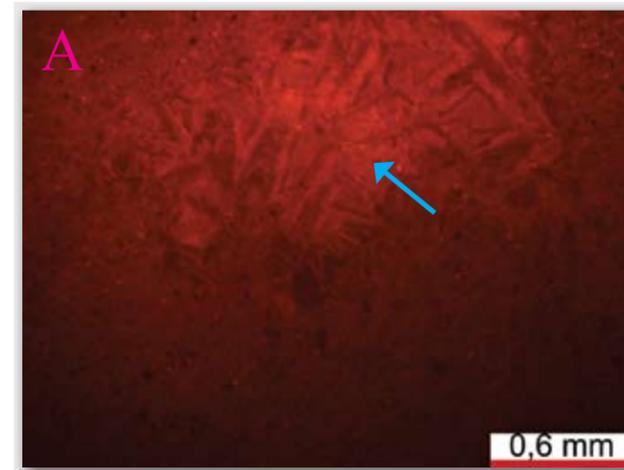
Figura 215: Dolomita de cimentação



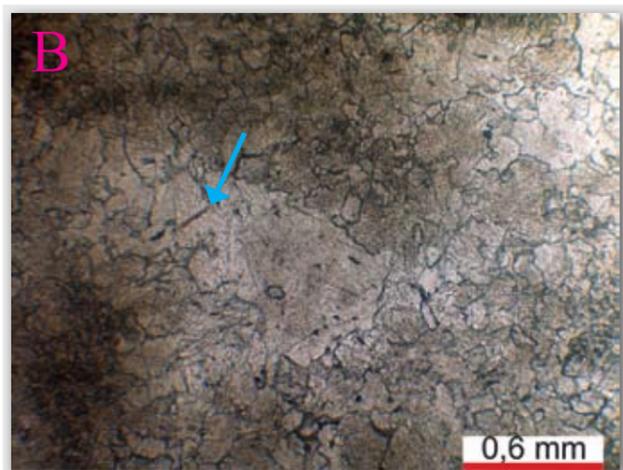
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



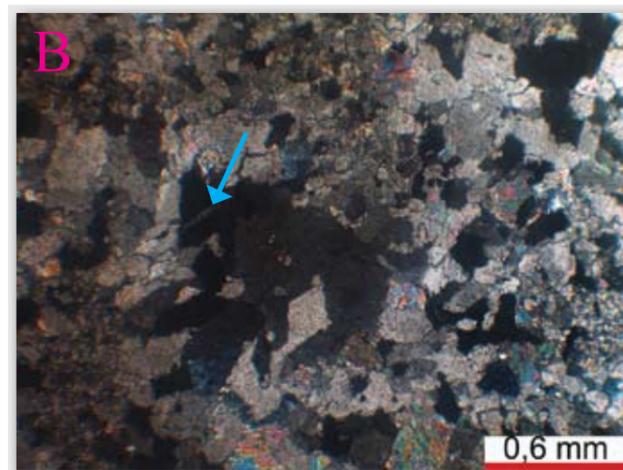
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



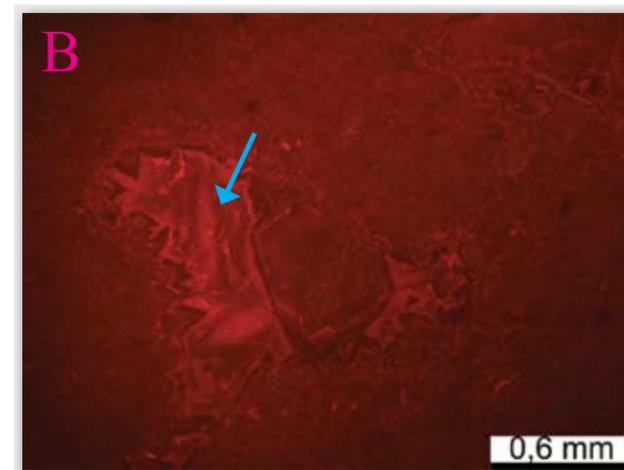
Fotomicrografia de catodoluminescência.



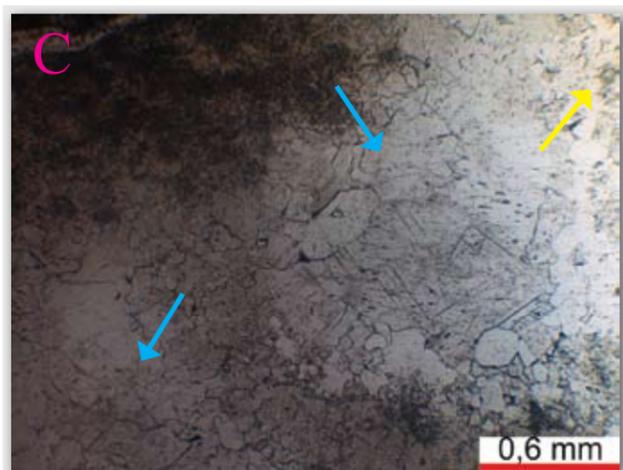
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



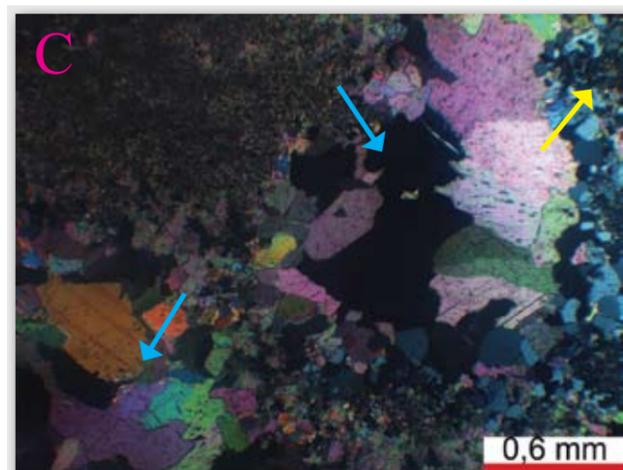
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



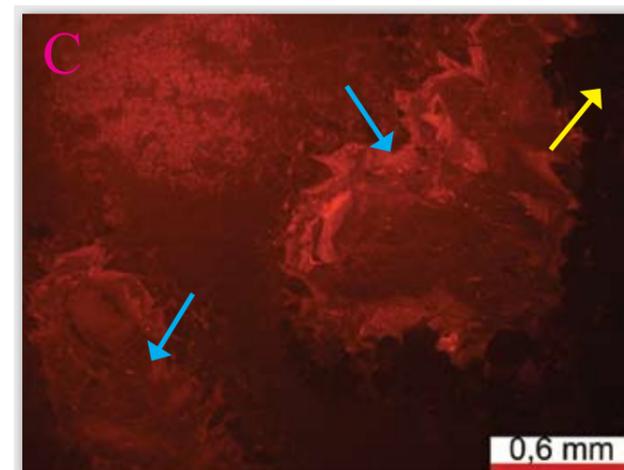
Fotomicrografia de catodoluminescência.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



Fotomicrografia de catodoluminescência.

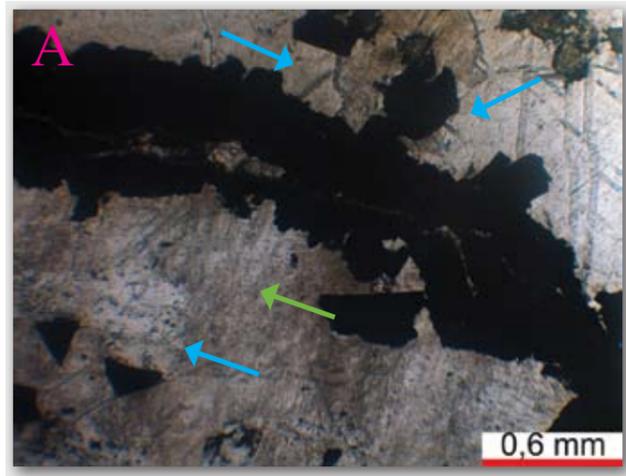
Fotomicrografias mostrando a dolomita de cimentação em lâmina delgada (polarizadores paralelos e cruzados) e em catodoluminescência.

A - Setas indicando cristais de dolomita cimentando porosidade secundária. Notar que os cristais são zonados e crescem a partir da borda do poro. O cimento de dolomita apresenta luminescência maior que a da rocha dolomítica. Profundidade: 25,18m.

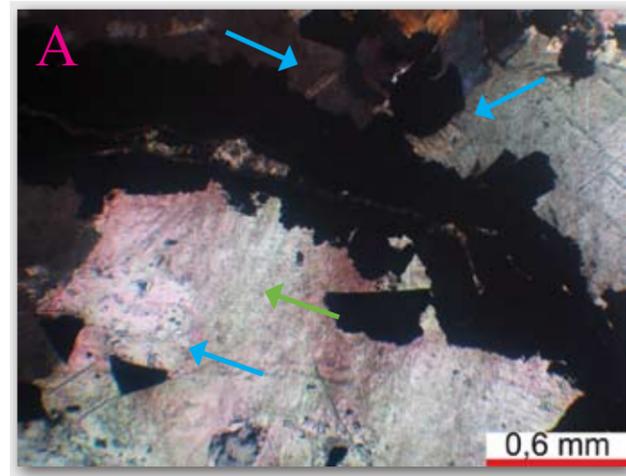
B - Setas indicando cristais de dolomita cimentando porosidade secundária. Os cristais são zonados, crescendo a partir da borda do poro. As primeiras fases de crescimento do cimento dolomítico mostram luminescência semelhante à da rocha, e as últimas fases mostram luminescência maior. Profundidade: 56,75m.

C - Setas azuis indicando cristais de dolomita cimentando porosidade secundária. Pode-se observar alguns cristais crescendo a partir da borda do poro em direção ao centro. A porção não-luminescente da imagem corresponde à sílica (seta amarela). Profundidade: 85,02m.

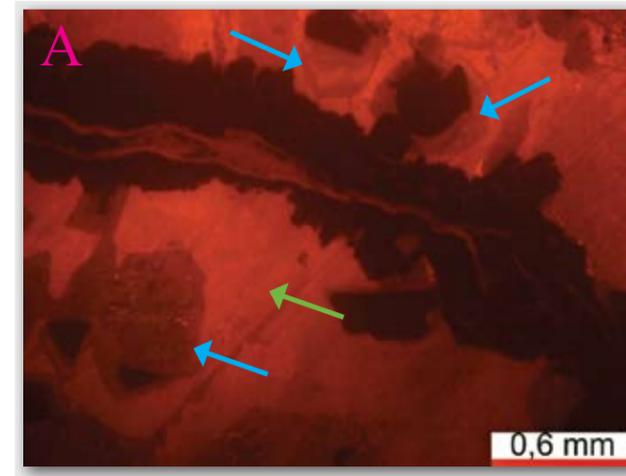
Figura 216: Dolomita de cimentação de fratura



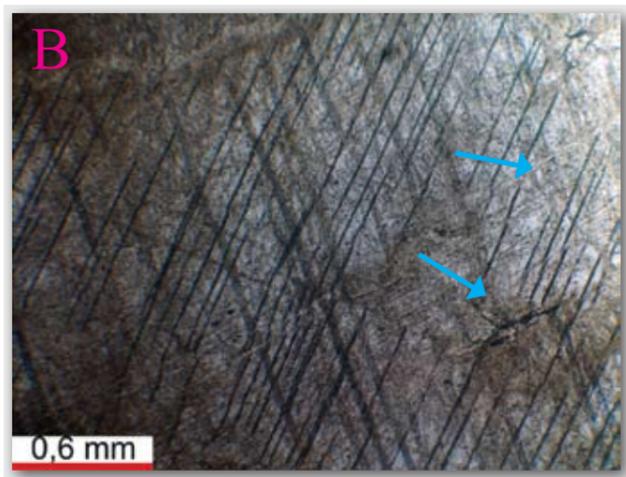
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



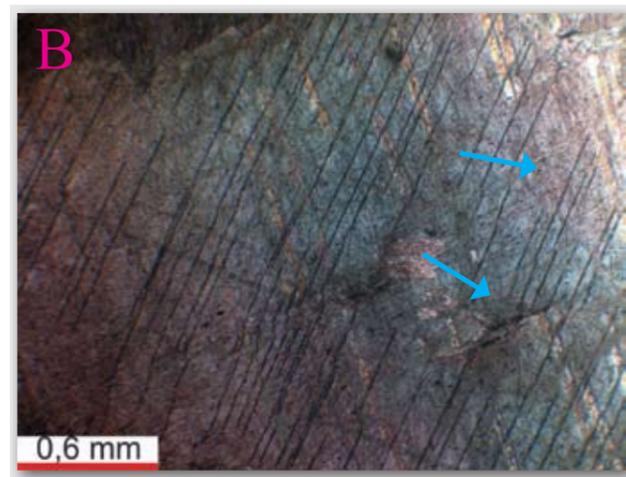
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



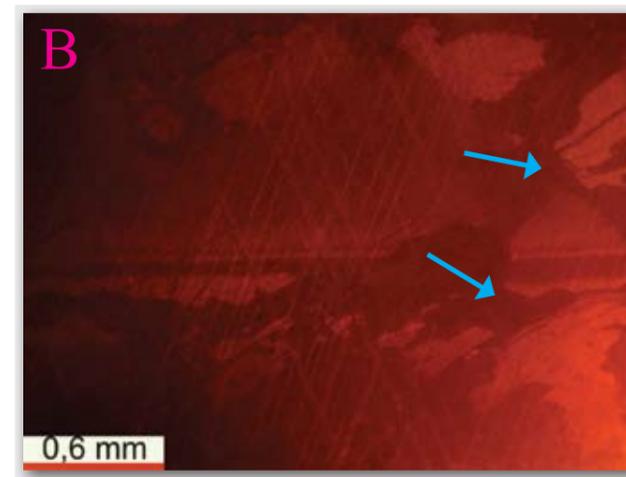
Fotomicrografia de catodoluminescência.



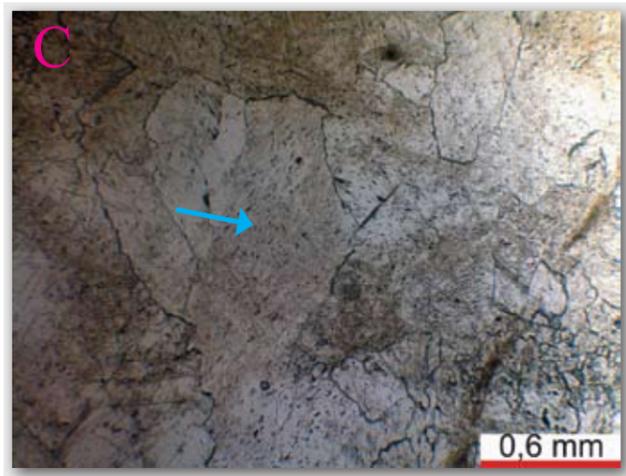
Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



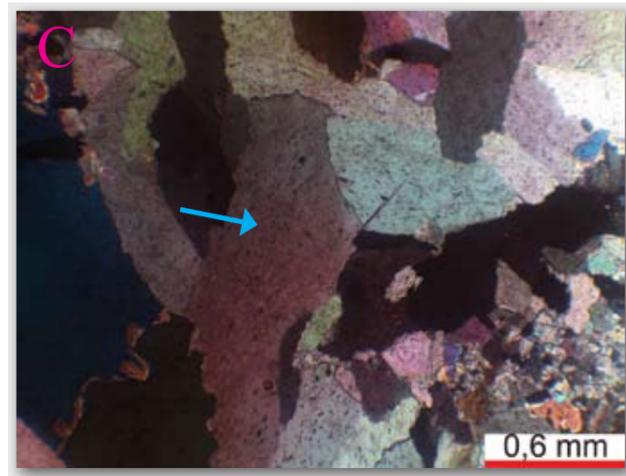
Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



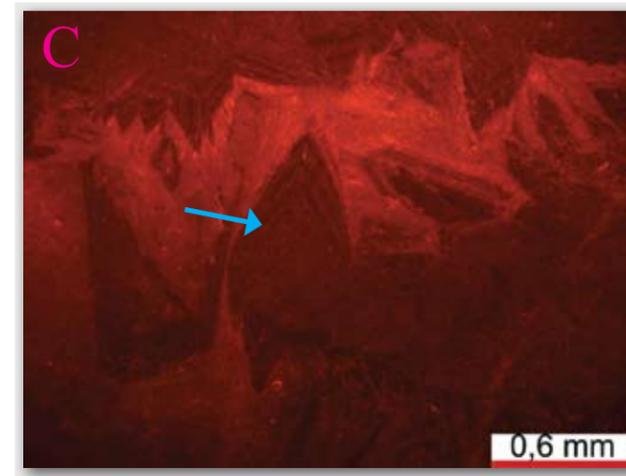
Fotomicrografia de catodoluminescência.



Fotomicrografia com polarizadores paralelos.



Fotomicrografia com polarizadores cruzados.



Fotomicrografia de catodoluminescência.

Fotomicrografias mostrando a dolomita de cimentação de fratura em lâmina delgada (polarizadores paralelos e cruzados) e em catodoluminescência.

A - Setas azuis indicando primeira fase de crescimento da dolomita ao redor de cristais de esfalerita. Seta verde indicando última fase de crescimento da dolomita apresentando luminescência maior. Profundidade: 43,90m.

B - Setas indicando aspecto de corrosão no cristal de dolomita e posterior cristalização de uma segunda fase de dolomita, neste caso com menor luminescência. Profundidade: 51,25m.

C - Setas indicando cristal de dolomita zonado, com várias linhas de crescimento. Notar que ocorre uma última fase de cimentação por dolomita, a qual apresenta luminescência maior. Profundidade: 81,74m.

Silicificação

Assim como a dolomita, a sílica ocorre substituindo porções da rocha ou como cimento em poros e fraturas.

Sílica de substituição

Ocorre como “manchas” na rocha, substituindo tanto grãos como matriz ou cimento. Muitas vezes estas manchas apresentam contornos arredondados. É comum observar bordas ou porções de grãos carbonáticos silicificados. A sílica presente é constituída principalmente por microquartzo e quartzo com bordas irregulares.

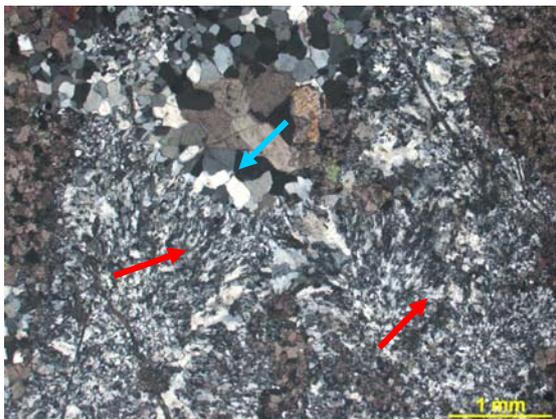


Figura nº217 Setas vermelhas indicando silicificação parcial da rocha. Seta azul indicando cimento de sílica (quartzo). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 44,02m.



Figura nº218 Detalhe dos cristais de quartzo que ocorrem substituindo parcialmente a rocha. Notar a forma irregular dos cristais. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 44,02m.



Figura nº219 Detalhe da silicificação parcial da rocha na forma de “mancha”, com bordas arredondadas. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 60,38m.



Figura nº220 Silicificação parcial da rocha – microquartzo e quartzo com bordas irregulares. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 109,22m.



Figura n°221 Detalhe da silicificação parcial da rocha na forma de “manchas” arredondadas (seta). Fotomicrografia, P//. Profundidade: 17,08m.



Figura n°222 Detalhe da silicificação parcial da rocha na forma de “manchas” (seta). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 15,28m.

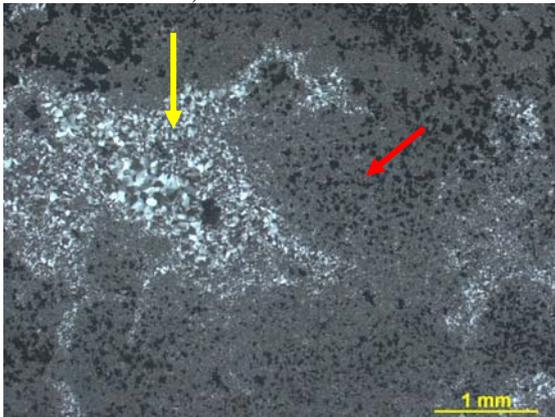


Figura n°223 Detalhe da silicificação intensa da rocha. Notar diferença na cristalinidade do quartzo que substitui a matriz da rocha (microquartzo – seta vermelha) ou o cimento (quartzo com bordas irregulares – seta amarela). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 87,73m.

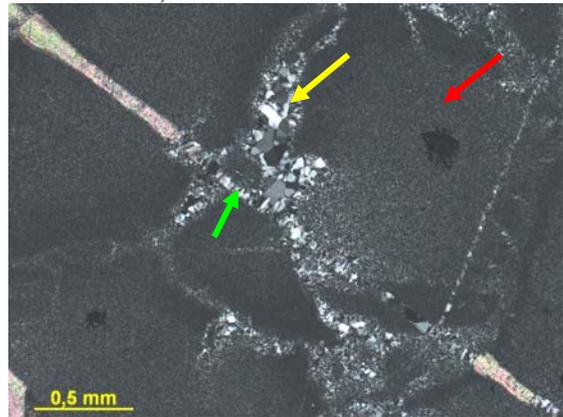


Figura n°224 Detalhe da silicificação intensa da rocha. Notar diferença na cristalinidade do quartzo que substitui a matriz da rocha (microquartzo – seta vermelha) ou o cimento (quartzo com bordas irregulares – seta amarela). Notar quartzo substituindo preenchimento da fratura (seta verde). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 98,48m

Sílica de cimentação

Ocorre preenchendo poros ou fraturas, sendo constituída por cristais de quartzo límpidos e com bordas regulares, calcedônia e raramente como quartzo microcristalino. É comum observar nos grãos de quartzo de cristalinidade maior a presença de inclusões fluidas.



Figura nº225 Detalhe dos cristais de quartzo que ocorrem como cimento (seta). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 12,93m.



Figura nº226 Seta indicando quartzo cimentando fratura. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 36,67m



Figura nº227 Detalhe de várias fases de cimentação de sílica. Seta amarela indicando níveis de calcedônia e seta vermelha indicando quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 44,02m.

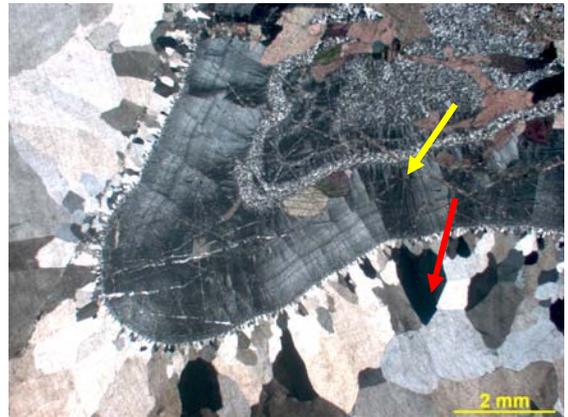


Figura nº228 Detalhe de diferentes fases de cimentação por sílica. Seta amarela indicando níveis de calcedônia e seta vermelha indicando quartzo. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 51,25m.

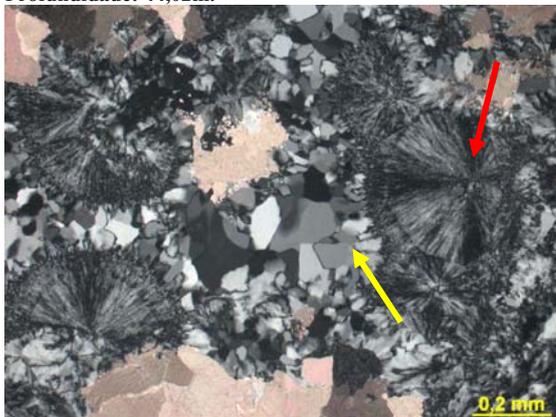
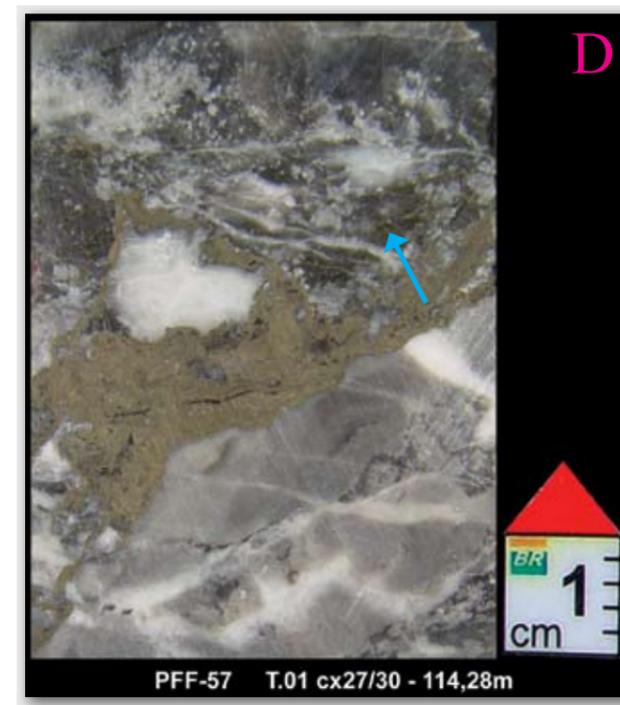
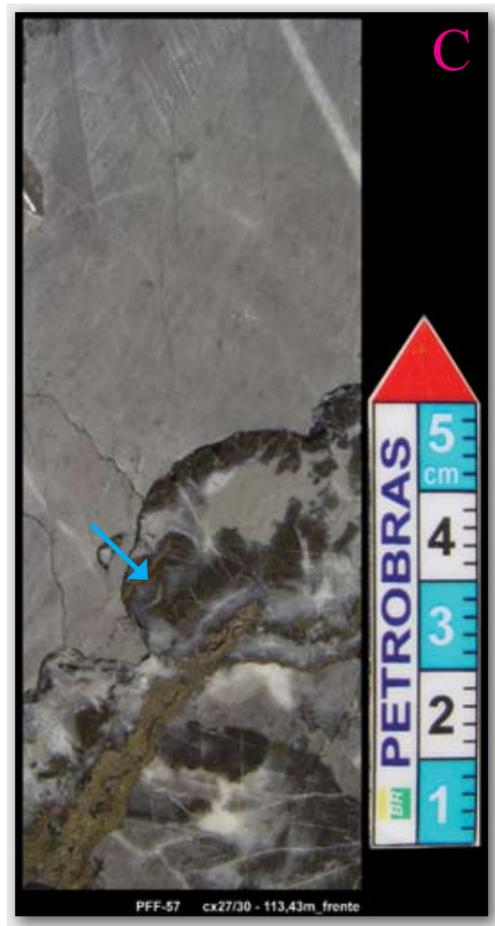
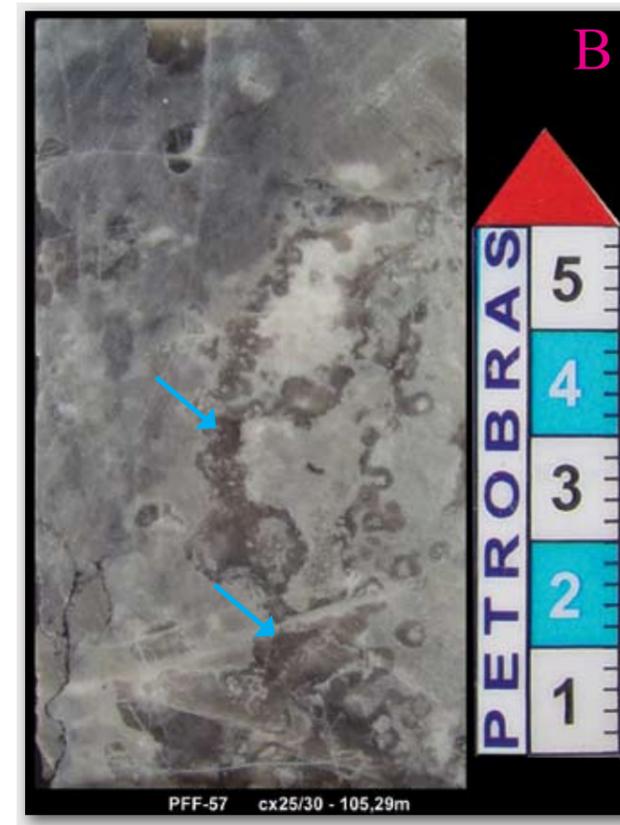
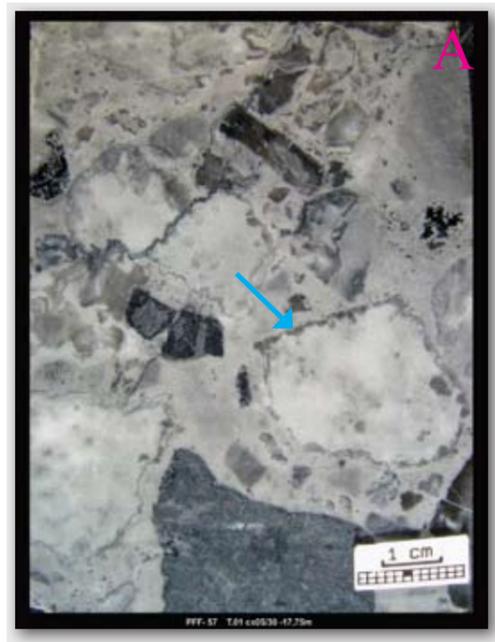


Figura nº229 Detalhe dos cristais de calcedônia (seta vermelha) e quartzo (seta amarela) que ocorrem como cimento. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 80,30m.



Figura nº230 Seta amarela indicando cristal de quartzo que ocorre como cimento, mostrando-se rico em inclusões fluidas (seta vermelha). Fotomicrografia, PX. Profundidade: 109,22m.

Figura 231: Silicificação



A - Foto de detalhe mostrando silicificação na borda dos grãos intraclásticos (seta). Profundidade: 17,75m.

B - Foto de detalhe mostrando manchas de silicificação, geralmente apresentando contornos arredondados (setas). Profundidade: 105,29m.

C - Foto de detalhe mostrando porção da rocha com silicificação associada à mineralização de pirita e esfalerita (seta). Profundidade: 113,43m.

D - Foto de detalhe mostrando silicificação associada à mineralização de pirita e esfalerita (seta). Profundidade: 114,28m.

Compactação

Não se observa em lâmina delgada contatos suturados ou planares entre os grãos, o que indica que houve uma cimentação bastante precoce que segurou o arcabouço da rocha, impedindo assim que houvesse compactação mecânica dos grãos.

O que se observa de forma bastante evidente é a compactação química, através de estilólitos e filmes de dissolução. Estão presentes estilólitos horizontais, inclinados e verticais, indicando que além da compactação houve intenso processo tectônico atuando nestas rochas, com diferentes direções de compressão.

Nos planos dos estilólitos verticais e inclinados observa-se frequentemente a presença de pirita e silicificação, mostrando que houve concentração de matéria orgânica, bem como percolação de fluidos através destes planos.

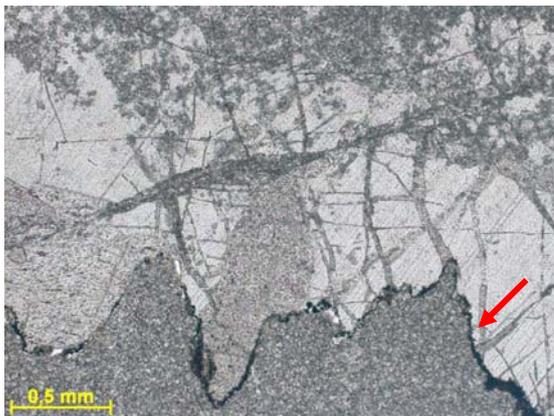


Figura nº232 Seta indicando estilólito no contato entre porção silicificada da rocha e matriz dolomítica. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 40,00m.



Figura nº233 Seta indicando estilólito. Notar que ele é posterior ao processo de fraturamento. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 39,75m.

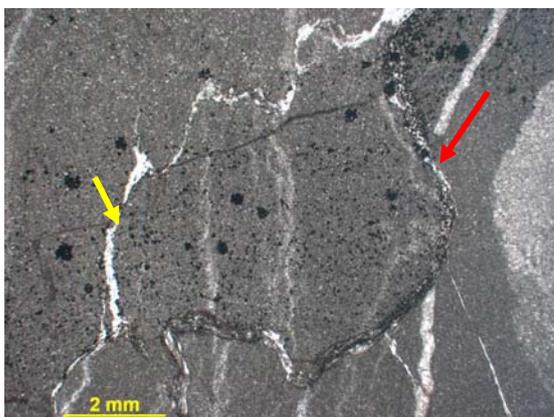
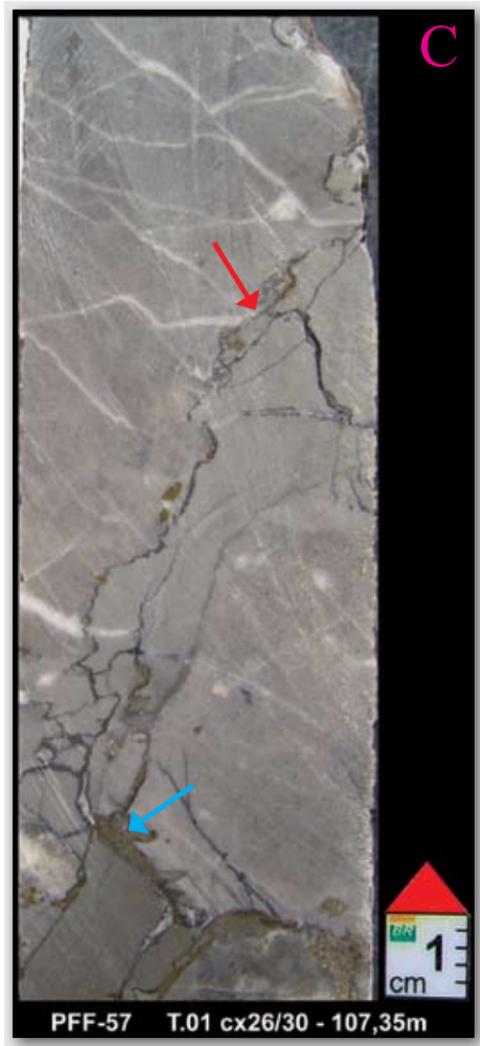
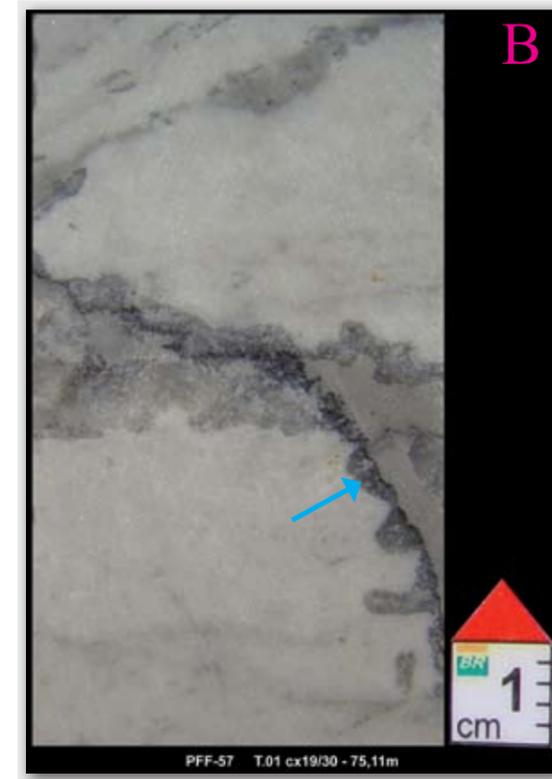


Figura nº234 Seta vermelha indicando estilólito cortado por fratura cimentada por dolomita. Notar a presença de pirita (mineral opaco – seta amarela) associada com o estilólito. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 114,90m.



Figura nº235 Setas indicando planos de estilólitos com concentração de cristais de pirita. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 39,75m.

Figura 236: Estilolitos



A - Foto de detalhe do estilolito (setas). Profundidade: 67,52m.

B - Foto de detalhe do estilolito com silificação ao longo do mesmo. Profundidade: 75,11m.

C - Foto de detalhe do estilolito (seta vermelha) cortando fraturas cimentadas por dolomita. Notar mineralização de pirita e esfalerita ao longo do estilolito (seta azul). Profundidade: 107,35m.

D - Foto de detalhe do estilolito com silificação e mineralização de pirita e esfalerita associados (seta). Profundidade: 60,58m.

Deformação e cisalhamento

Além do fraturamento, o qual é observado macro e microscopicamente, pode-se observar em escala de lâmina delgada outras feições resultantes do intenso processo de deformação sofrido pela rocha. É comum a presença de planos de cisalhamento, aonde os cristais de dolomita adquirem forma alongada, orientada segundo a direção deste plano.

Localmente observa-se deformação nos cristais de dolomita, como deslocamento de planos de clivagem e leve arqueamento ou deformação do cristal. Em alguns casos o cristal de dolomita apresenta a formação de subcristais, devido ao intenso *stress* que atuou sobre o cristal.

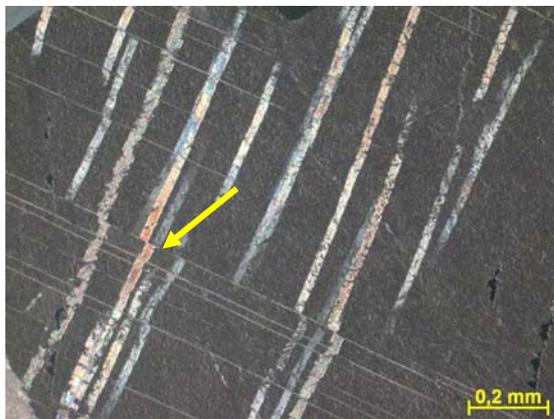


Figura nº237 Seta indicando planos de clivagem da dolomita deslocados. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 40,00m

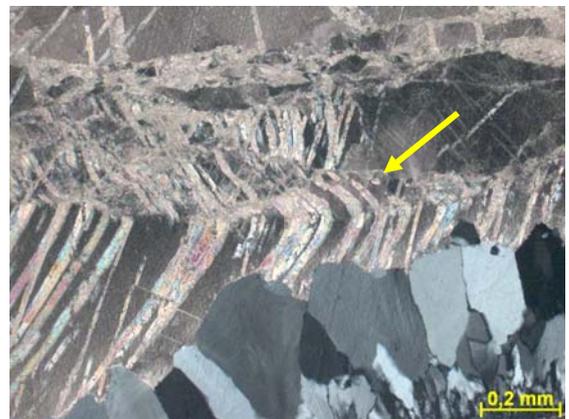


Figura nº238 Seta indicando planos de clivagem da dolomita deformados. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 40,00m



Figura nº239 Cristais de dolomita apresentando o início da formação de subcristais. Seta indicando resquíio da antiga clivagem do cristal. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 30,70m.



Figura nº240 Seta vermelha indicando cimento dolomítico com cristais de pirita nas bordas e seta amarela indicando zona de cisalhamento com cristais de dolomita alongados. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 41,92m.



Figura nº241 Detalhe de plano de cisalhamento cortando cristais de dolomita com formas irregulares e extinção ondulante. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 42,90m



Figura nº242 Plano de cisalhamento (seta) cortando fratura cimentada por dolomita. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 85,02m.

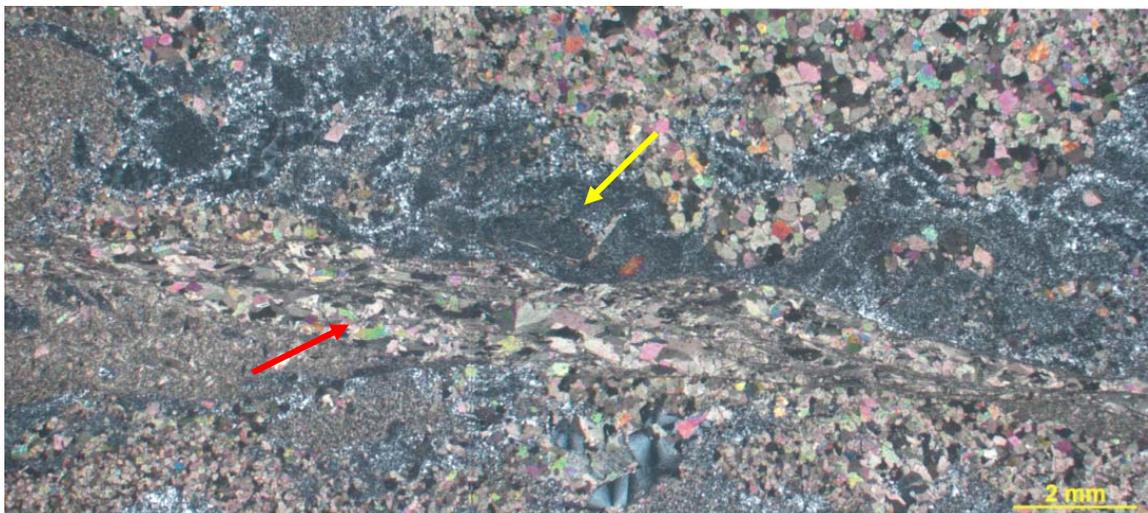


Figura nº243 Seta vermelha indicando zona de cisalhamento e seta amarela indicando silicificação associada. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 121,82m.

Dissolução

Analisando o testemunho do furo PFF-57 e afloramentos da Formação Morro do Calcário na região de Fagundes e Morro Agudo, pôde-se observar de forma mais evidente a ocorrência de evento de dissolução tardio, pós-estilolitização, associado ou não com a formação de brecha hidrotermal. Porém é possível que a porosidade fenestral observada em fragmentos intraclásticos no dolorrudito estejam relacionadas à eventos de dissolução meteórica, sendo que localmente observou-se textura geopetal, o que indica que esta porosidade é primária.

A porosidade secundária tardia observada é gerada próxima à planos de estilolitos ou fraturas (no caso das brechas), indicando que houve percolação de fluidos corrosivos através destes planos. A porosidade gerada foi posteriormente cimentada por dolomita e/ou sílica.

Em afloramento de dolarenitos da Formação Morro do Calcário na região de Morro Agudo há presença de “bolsões” de brechas hidrotermais, além de estilolitos com zona de dissolução associada. A porosidade gerada no processo de brechação está cimentada por dolomita, sendo que localmente a dolomita não preencheu completamente os poros, e este espaço poroso encontra-se preenchido por betume. Nos planos dos estilolitos ocorre também betume, o que mostra que estes atuaram como conduto também para a migração do hidrocarboneto. Análises químicas mostraram que este betume é composto basicamente por carbono, com índice de hidrogênio muito baixo, indicando que este foi submetido a altas temperaturas, sofrendo craqueamento.

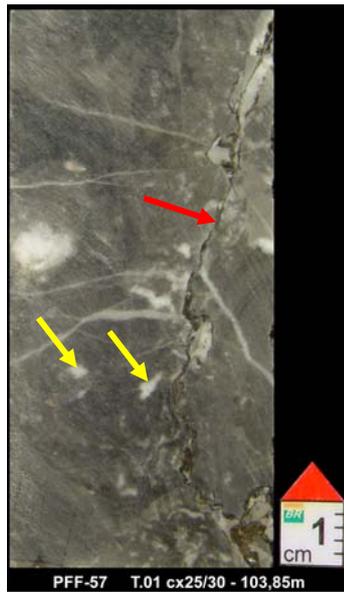


Figura nº244 Setas amarelas indicando porções cimentadas por dolomita próximas a plano de estilolito (seta vermelha). Foto de detalhe. Profundidade: 103,85m.



Figura nº245 Seta indicando porções cimentadas por dolomita próximas a plano de estilolito. Foto de detalhe. Profundidade: 109,29m.

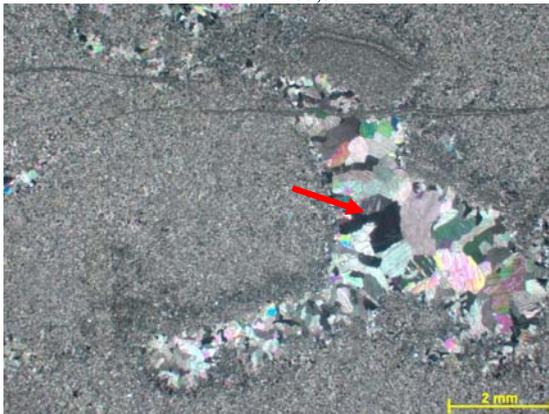


Figura nº246 Seta indicando porção da rocha aonde os cristais de dolomita apresentam cristalinidade muito grossa, tratando-se possivelmente de porosidade cimentada. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 11,05m.

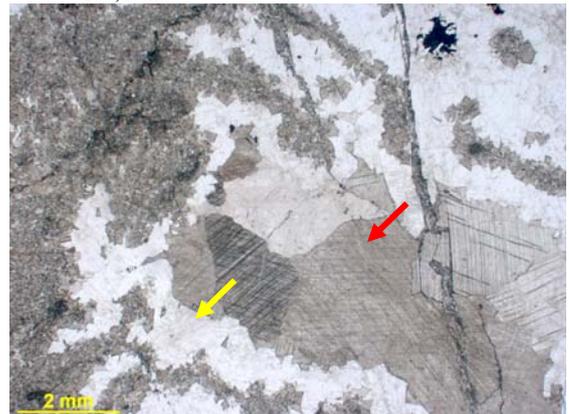


Figura nº247 Seta vermelha indicando sílica e seta amarela indicando cristais de dolomita muito grossos. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 12,93m.



Figura nº248 Seta indicando cimentação por sílica. Os cristais crescem da borda em direção ao centro do poro. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 42,86m.

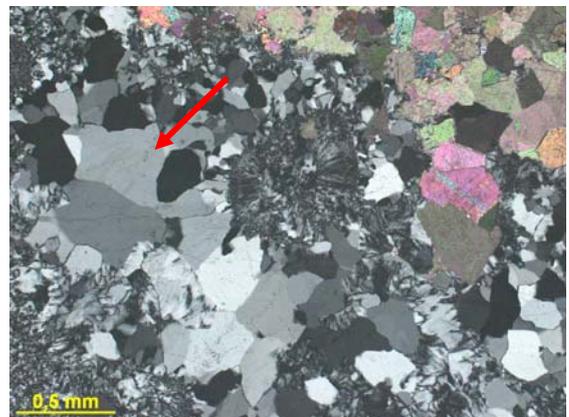


Figura nº249 Detalhe do cimento de quartzo (seta). Notar que no centro do poro os cristais são maiores. Fotomicrografia, PX. Profundidade: 80,30m.

Figura 250: Dissolução tardia e migração de hidrocarbonetos

Afloramento na região de Bento Carmelo, MG.

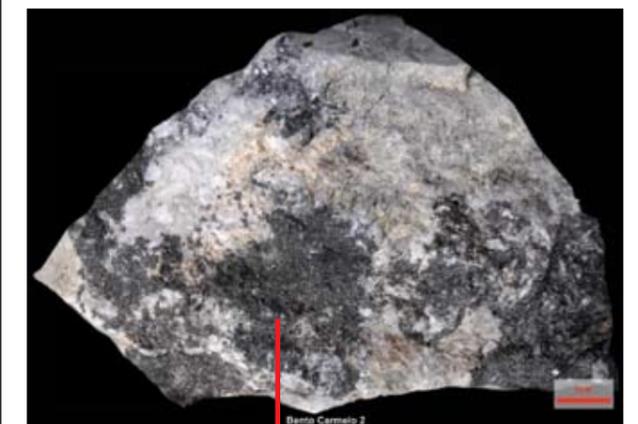
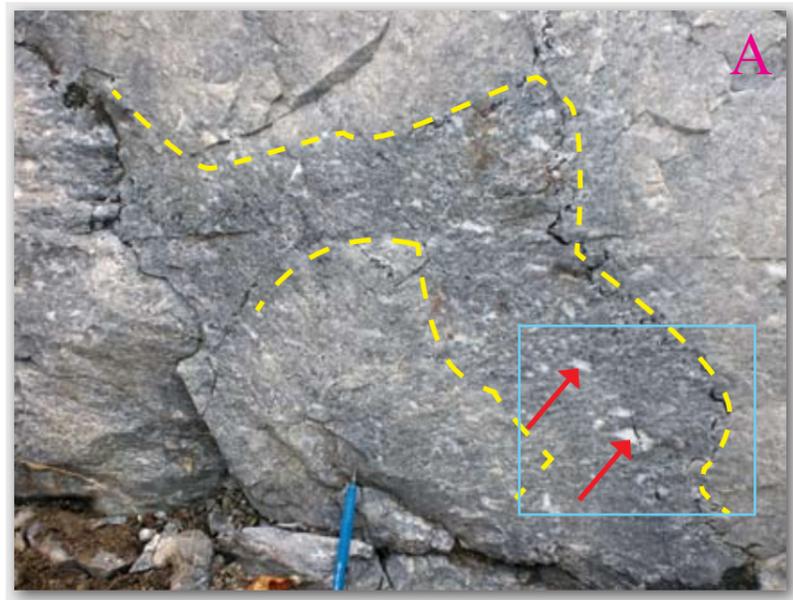
A - Foto de afloramento mostrando estilólitos com zona de dissolução próxima ao mesmos (demarcada em amarelo), e porosidade secundária cimentada por dolomita (setas).

B - Foto de detalhe do afloramento mostrando estilólito com manchas de betume ao longo do mesmo (seta).

C - Foto de detalhe do afloramento mostrando porosidade secundária parcialmente cimentada por dolomita (seta azul), apresentando manchas de betume, próximo do estilólito (seta vermelha).

D - Foto de detalhe do afloramento mostrando porosidade secundária parcialmente cimentada por dolomita e manchada por betume (seta).

E - Seta indicando porosidade secundária preenchida por betume.



Análise geoquímica:
Índice de Hidrogênio = 0,04
Índice de Oxigênio = 3

Falhas, Fraturas e mineralizações associadas – diagênese e hidrotermalismo

Observando as fraturas presentes no testemunho do furo PFF-57 foi possível dividir este em três zonas distintas, aonde em cada uma delas as fraturas apresentam diferenciação na composição mineralógica do seu preenchimento (Figura 263).

A zona superior, mais próxima da superfície, mostra a presença de fraturas preenchidas apenas por dolomita, geralmente horizontalizadas e subhorizontalizadas. Na zona imediatamente abaixo, além das fraturas preenchidas por dolomita, ocorrem também fraturas preenchidas por sílica na borda e dolomita no centro. Na zona mais profunda ocorrem também fraturas preenchidas por dolomita, sílica (quartzo e calcedônia) e uma associação de esfalerita (ZnS), pirita (FeS₂) e galena (PbS). Localmente observou-se a presença de magnesita (MgCO₃). Estas fraturas apresentam-se subverticalizadas a subhorizontalizadas. As duas últimas zonas citadas são as mais afetadas pelo hidrotermalismo.

Observa-se também grande quantidade de fraturas e microfaturas fechadas, as quais não apresentam cimentação. Localmente estas ocorrem de forma mais intensa, tendo sido geradas após a dolomitização.



Figura nº251 Detalhe da rocha intensamente fraturada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 48,75m.



Figura nº252 Detalhe da rocha intensamente fraturada. Fotomicrografia, P//. Profundidade: 49,14m.

Algumas fraturas subverticalizadas a verticalizadas não cimentadas apresentam dissolução devido à percolação de água meteórica, principalmente nos primeiros metros do topo do testemunho.

As fraturas delgadas, preenchidas apenas por dolomita, formaram-se em processo de fraturamento precoce, possivelmente anterior à dolomitização. Este fato foi evidenciado em lâmina petrográfica, aonde a dolomita que ocorre como cimento na fratura é xenotópica, sendo cortadas por

fraturas e falhas posteriores. Poderiam ser fraturas cimentadas por calcita, as quais foram dolomitizadas, ou se foram cimentadas por dolomita esta sofreu recristalização.

Falhas também estão presentes, sendo que estas formaram-se posteriormente ao fraturamento que contém as mineralizações de Pb e Zn e ao processo de silicificação.



Figura nº253 Detalhe da fratura preenchida por quartzo (Qtz - seta verde) e dolomita (Dol). Profundidade 103,25m.

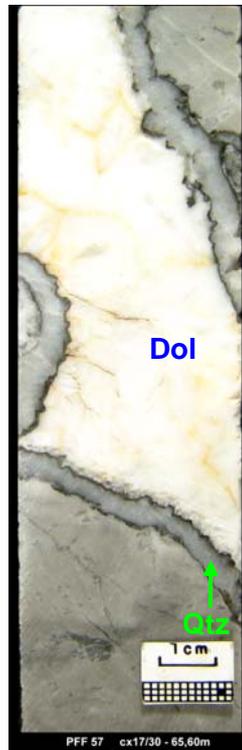


Figura nº254 Detalhe da fratura preenchida por quartzo (Qtz - seta verde) e dolomita (Dol). Profundidade 65,60m.

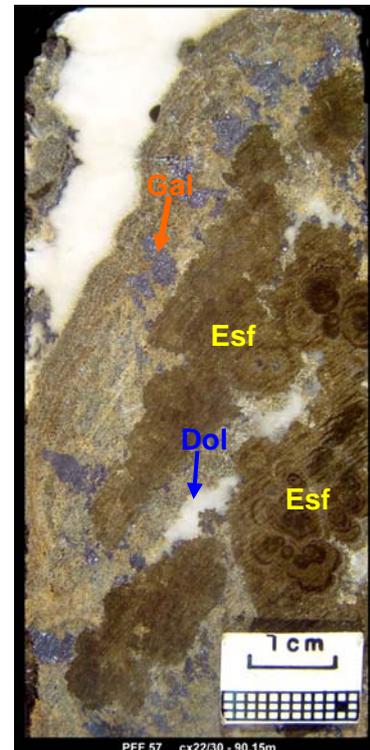


Figura nº255 Detalhe das mineralizações de esfalerita (Esf), galena (Gal - seta laranja) e dolomita (Dol - seta azul) em fratura. Profundidade 90,15m.



Figura nº256 Detalhe da cimentação na fratura. Da borda para o centro ocorre sílica (calcedônia - Cld e posteriormente quartzo - Qtz), esfalerita - Sph e por último dolomita - Dol. A - Fotomicrografia, P//. B - Fotomicrografia, PX (mesma visada da foto A), Profundidade: 51,25m.

Analisando os minerais opacos através de luz refletida é possível observar a zonação da mineralização, aonde cristais de pirita ocorrem na borda, posteriormente ocorrendo esfalerita.

Observa-se então a ocorrência de processo de microfraturamento dos cristais de esfalerita, e por vezes de pirita, sendo que as microfraturas encontram-se cimentadas por dolomita e galena.

A presença de cristais de pirita com formas arredondadas (Figura 261) sugere que em sua origem estes cristais teriam sido frambóides de marcassita, posteriormente recristalizados para pirita.

Os cristais de esfalerita apresentam reflexões internas variando de branco a amarelo, significando que sua composição é próxima de ZnS, ou seja, que a estrutura cristalina contém baixo teor de Ferro.

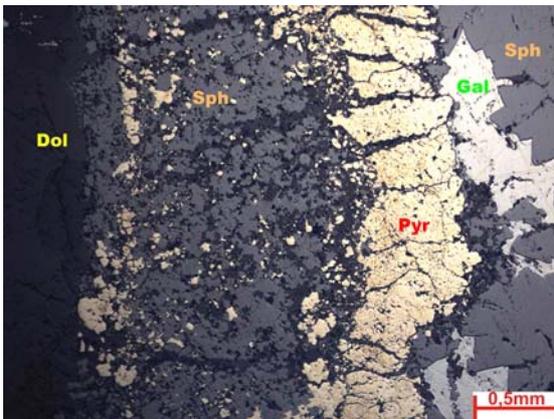


Figura nº257 Zonação na borda da fratura. Na esquerda da foto está a parede da fratura, aonde a matriz da rocha apresenta composição dolomítica. Da esquerda para a direita pode-se observar a passagem de nível com esfalerita e pirita, nível de pirita e depois esfalerita com galena. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 89,95m.

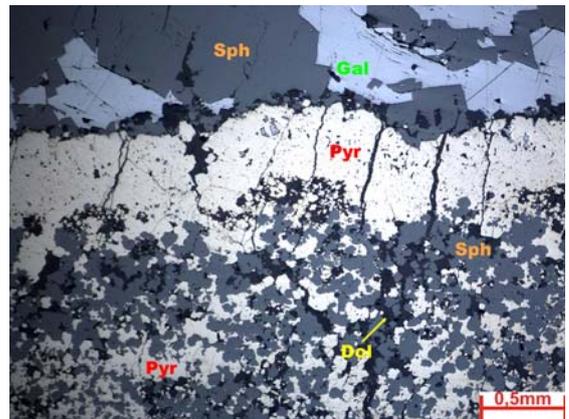


Figura nº258 Detalhe da zonação da mineralização na fratura, aonde na porção inferior da foto ocorre nível com associação de pirita e esfalerita, posteriormente ocorre nível de pirita e acima deste ocorre associação de esfalerita e galena. Notar que a mineralização está microfraturada, com dolomita cimentando. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 89,95m.

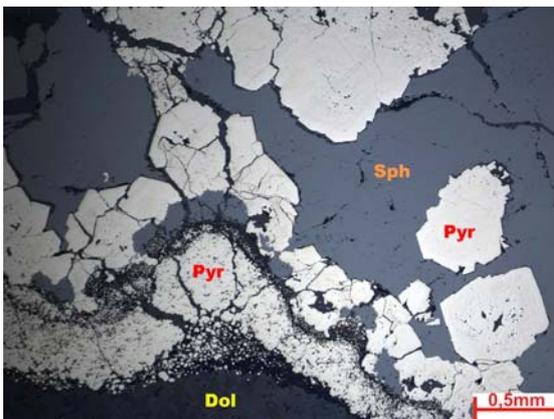


Figura nº259 Detalhe da borda da fratura com mineralização de pirita e posteriormente esfalerita e pirita. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 101,61m.

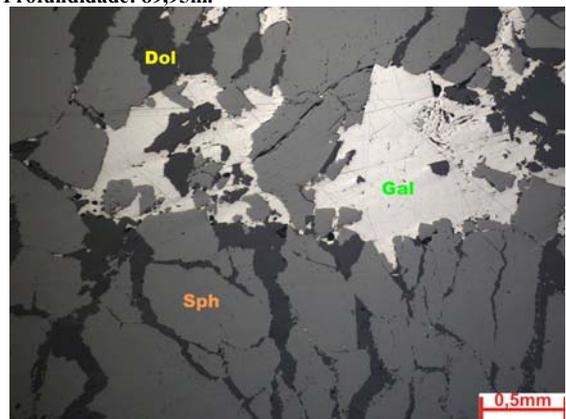


Figura nº260 Detalhe da esfalerita microfraturada com dolomita e galena cimentado as microfraturas. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 100,71m.

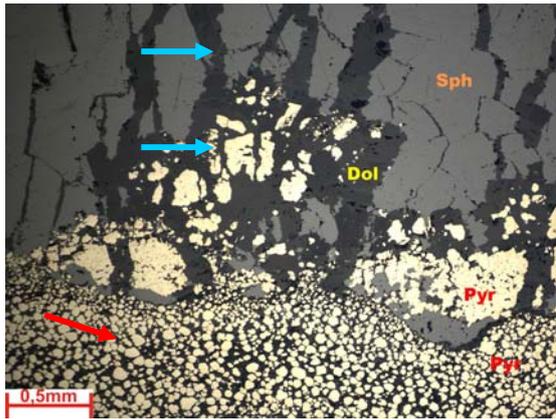


Figura nº261 Seta vermelha indicando nível com cristais de pirita com formas arredondadas. Setas azuis indicando microfraturas na esfalerita e em cristais de pirita associados a esta, com dolomita cimentando. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 100,71m.

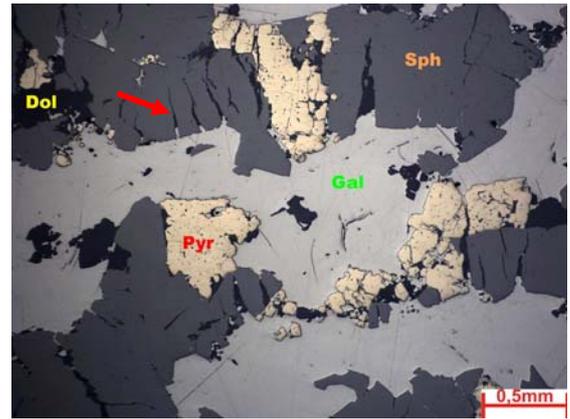
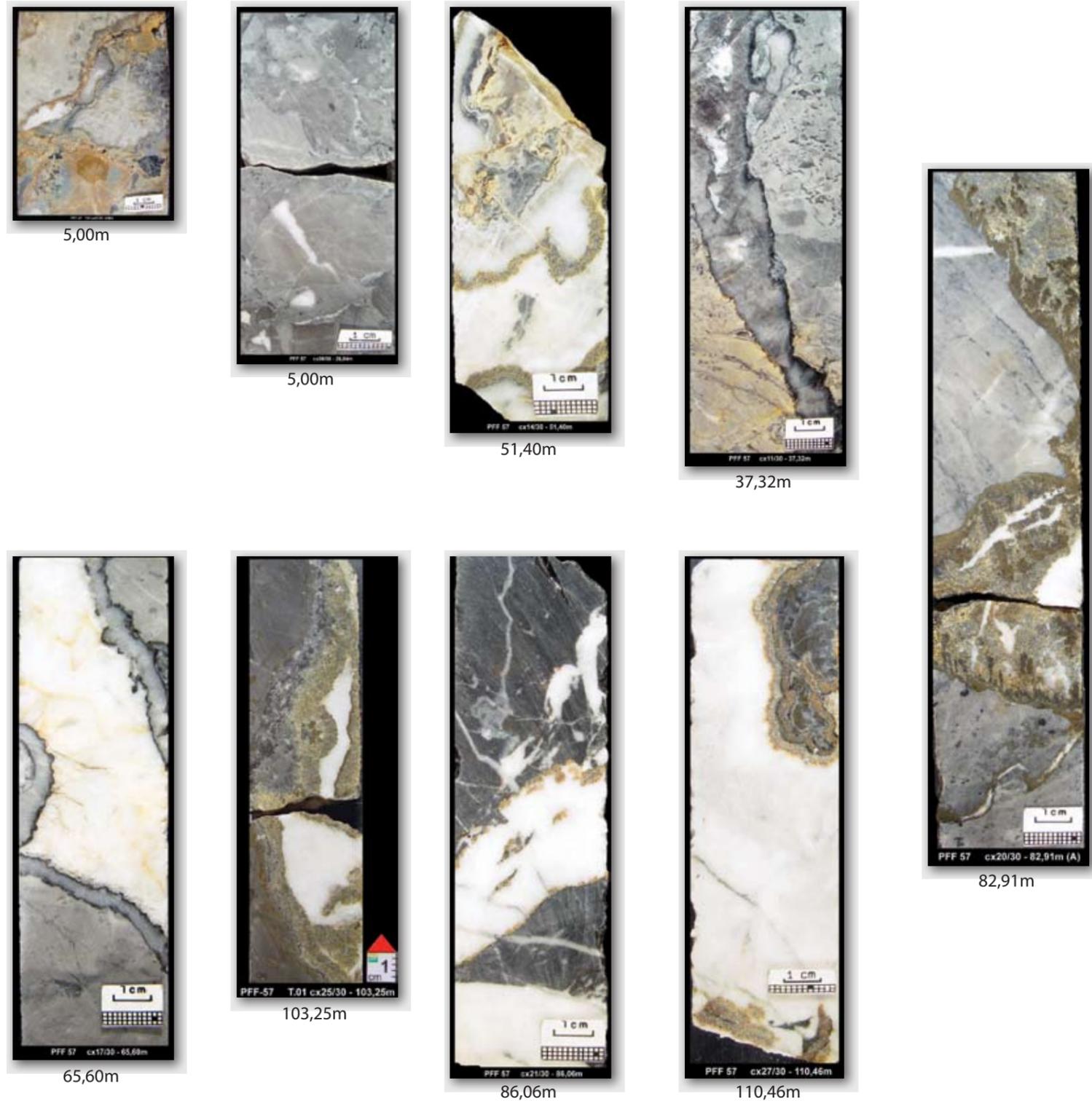
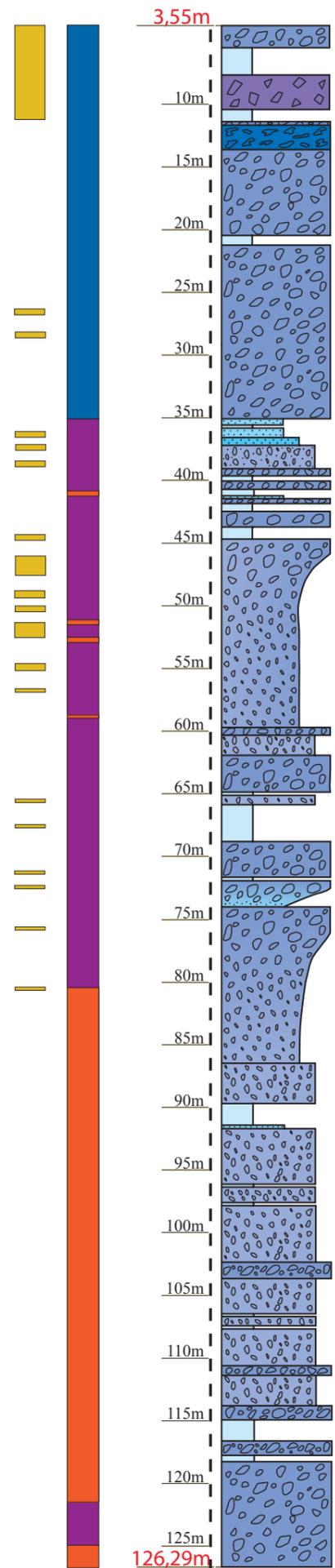


Figura nº262 Seta indicando microfraturas na esfalerita. Notar galena cimentando pequena parte da fratura e dolomita cimentando o restante. Fotomicrografia, luz refletida. Profundidade: 89,95m.

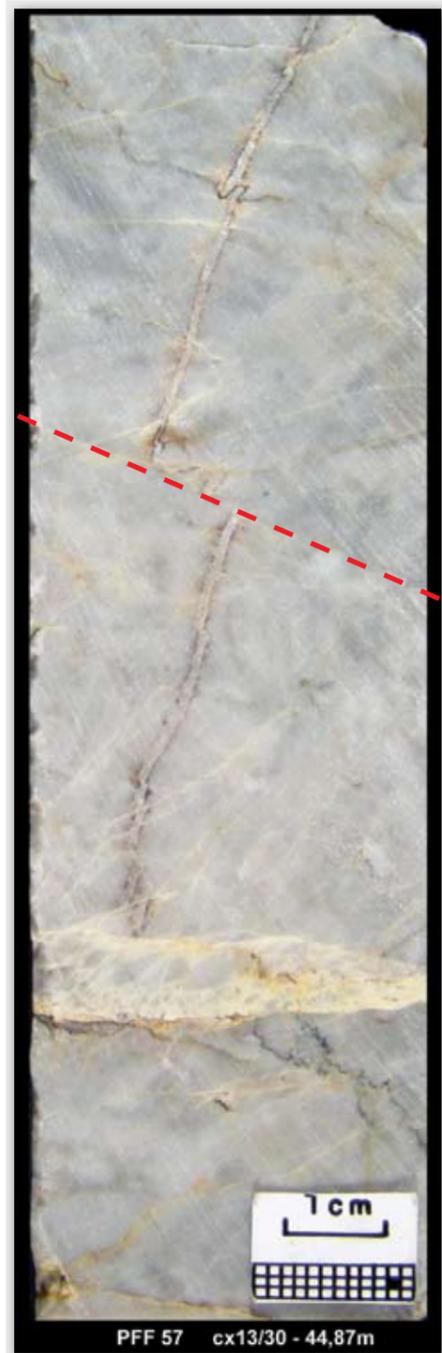
Figura 263: Fraturas e mineralizações Presentes no Furo PFF - 57

A direita da coluna litológica, fotos e detalhe das fraturas cimentadas.



- Legenda:**
- Fraturas com ação de intemperismo (alteração mineral e dissolução)
 - Fraturas cimentadas por dolomita.
 - Fraturas cimentadas por sílica, dolomita.
 - Fraturas cimentadas por sílica, dolomita, pirita, esfalerita e galena.
 - Dololutito.
 - Dolarenito (granulação areia média a grossa).
 - Dolarenito (granulação areia muito grossa a grânulo).
 - Dolorrudito (matriz - granulação areia).
 - Dolorrudito (matriz micrítica).
 - Clastos - granulação grânulo a seixo.
 - Dolorrudito (matriz micrítica).
 - Clastos - granulação seixo a matacão.
 - Brecha dolomítica de falha.
 - Dolomito com estrutura fenestral (possivelmente matacão dentro da brecha).

Figura 264: Falhas



Profundidade: 44,87m



Profundidade:58,75m



Profundidade: 87,00m

Fotos de detalhe mostrando a presença de falhas (plano das falhas destacado em vermelho). Pode-se observar que estas falhas ocorreram após as mineralizações de sílica, pirita, esfalerita e galena.

Sequência de eventos diagenéticos

Através dos estudos petrográficos pode-se construir uma sequência de eventos diagenéticos que atuaram nos carbonatos da Formação Morro do Calcário.

Inicialmente estes carbonatos foram submetidos a um processo de cimentação bastante precoce, provavelmente uma cimentação marinha, a qual sustentou o arcabouço da rocha evitando que os grãos sofressem compactação mecânica durante o soterramento. Este cimento ocorre localmente com hábito fibro-radial e botrioidal, crescendo a partir da borda dos poros em direção ao centro. Posteriormente ocorre a precipitação de cimento dolomítico equante, o qual provavelmente tinha composição inicial calcítica, tendo se formado durante o soterramento raso, ainda na eodiagênese.

Observam-se fraturas cimentadas, as quais foram posteriormente dolomitizadas. Este processo de fraturamento ocorreu, portanto, antes da dolomitização.

A dolomitização atuou de forma intensa e pervasiva em toda a Formação Morro do Calcário. Aparentemente este processo teve início na eodiagênese, se estendendo até a mesodiagênese (com possíveis processos de recristalização associados), preservando ou não a textura original da rocha.

É comum a presença de estilólitos, estando estes relacionados ao evento de soterramento e também à esforços tectônicos.

As rochas carbonáticas da Fm. Morro do Calcário foram submetidas a mais de um processo de fraturamento e falhamento, sendo o último relacionado a processos hidrotermais.

Brechas carbonáticas e fraturas com mineralizações de sulfetos são produto do evento hidrotermal. As brechas ocorrem na forma de bolsões, sendo que neste caso a rocha foi fraturada/brechada e cimentada principalmente por dolomita e localmente sílica (Figura 265).

Um evento de dissolução foi observado próximo à estilólitos, mostrando que estes atuaram como caminhos para fluidos corrosivos. A presença de pirobetume em estilólitos e em porosidade vugular na Formação Morro do Calcário, por vezes dentro de brechas hidrotermais, indica que houve migração de hidrocarbonetos através de porosidade secundária durante evento hidrotermal. Análises químicas do betume mostraram que este foi submetido a altas temperaturas, já em estágio avançado do evento hidrotermal.



Figura nº265 Detalhe da brecha hidrotermal a qual ocorre na forma de bolsões em dolarenito da Formação Morro do Calcário. Bento Carmelo, MG.

No testemunho do furo PFF-57 é comum a ocorrência de fraturas cimentadas por dolomita, sílica, esfalerita, pirita, galena e localmente magnetita. Esta assembléia mineralógica está associada a processos hidrotermais que ocorreram nas rochas desta formação.

Após as mineralizações de Pb e Zn ainda ocorrem fraturas e falhas, mostrando que o tectonismo ainda foi bastante ativo após o evento de hidrotermalismo.

A tabela abaixo resume os principais eventos diagenéticos observados nos carbonatos da Formação Morro do Calcário presentes no testemunho do furo PFF-57.

Tabela nº 5 Resumo dos principais eventos diagenéticos observados através do estudo petrográfico realizado nos carbonatos da Formação Morro do Calcário presentes no testemunho do furo PFF-57

Eventos Diagenéticos		Tempo	
		Eodiagênese	Mesodiagênese
Associação Eodiagenética	Cimento dolomítico fibro-radial e cimento dolomítico botrioidal (marinho, provavelmente calcítico ou aragonítico, o qual foi posteriormente dolomitizado)	●	
	Cimento dolomítico equante (soterramento raso, possivelmente calcítico, o qual foi posteriormente dolomitizado)	●	
Associação Mesodiagenética	Dolomitização (intenso processo, gerando dolomita xenotópica)		●
	Compactação química por soterramento (estilolitos e filmes de dissolução)		●
	Fraturamento		●
	Silicificação (substituição de porções da rocha por quartzo e microquartzo)		●
	Pirita framboidal (em planos de estilolitos ou dispersas)		●
	Dissolução		●
	Cimento dolomítico equante e blocoso		●
	Cimento de sílica (quartzo e calcedônia)		●
	Migração de betume		●
	Dolomita		●
Associação Epigenética	Sílica (quartzo e calcedônia)		●
	Pirita		●
	Esfalerita		●
	Galena		●

6.2.7 Análises Isotópicas – Formação Morro do Calcário

Foram realizadas análises isotópicas nas dolomitas de rocha total (14 amostras) e dolomitas de fraturas (20 amostras).

Para as dolomitas de rocha total os dados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mostram valores que variam de 1,37 a 0,13 (VPDB‰) para $\delta^{13}\text{C}$ e entre -4,08 a -12,87 (VPDB‰) para $\delta^{18}\text{O}$. Estes valores de $\delta^{18}\text{O}$ indicam que estas dolomitas se formaram em temperaturas elevadas, já no estágio de mesodiagênese.

Para as dolomitas de fraturas os dados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mostram valores que variam de 0,30 a -1,38 (VPDB‰) para $\delta^{13}\text{C}$ e entre -9,36 a -17,77 (VPDB‰) para $\delta^{18}\text{O}$. Os valores bastante negativos para $\delta^{18}\text{O}$ indicam altas temperaturas durante a cristalização das dolomitas, as quais ocorrem associadas com as mineralizações de Pb e Zn, confirmando o processo de hidrotermalismo.

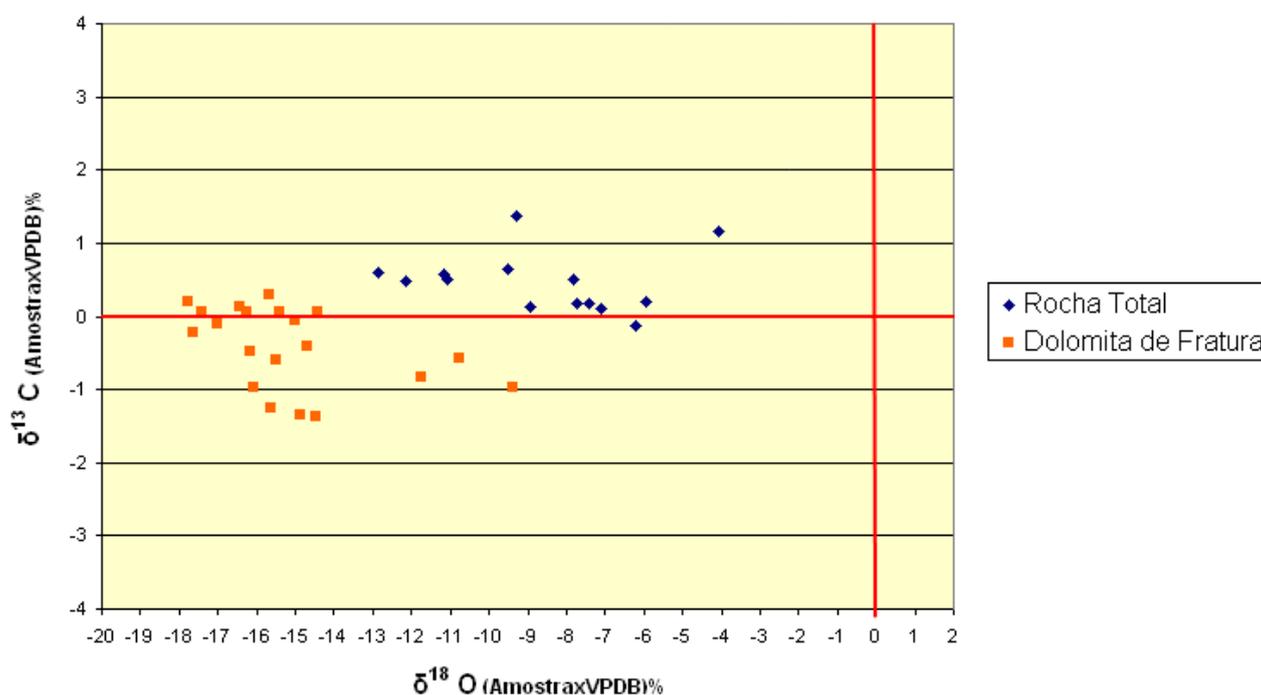


Figura nº266 Gráfico de dispersão mostrando a distribuição dos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de rocha total e amostras pontuais de dolomitas em fraturas no testemunho do furo PFF-57.

7 DIAGÊNESE E HIDROTERMALISMO EM ROCHAS CARBONÁTICAS – ESTUDO DE CASO: CARBONATOS DOS GRUPOS BAMBUÍ E VAZANTE

Grupo Bambuí

Estudos diagenéticos em rochas carbonáticas do Gr. Bambuí foram realizados por Nobre-Lopes (1995, 2002) nas regiões de Arcos e Januária, Minas Gerais. Como características semelhantes às rochas carbonáticas do Gr. Bambuí da região de Alvorada do Norte, Goiás, tem-se:

* As rochas carbonáticas do Gr. Bambuí na região de Arcos mostram que fácies de *grainstone* e *packstone* apresentam vestígios de franja isópaca, e que estão pouco compactados, evidenciando cimentação precoce, em ambiente marinho. Na região ocorrem também fácies de ambientes perilitorâneos, aonde ocorrem cavidades amplas e a formação de brechas de colapso, em ambiente vadoso, na zona de dissolução. Observou-se dolomitização, além de calcita espática nos espaços intercrystalinos e vugs, além de dolomita barroca, tardia, associada com estilólitos.

* As rochas carbonáticas do Gr. Bambuí presentes na região de Alvorada do Norte mostram o predomínio de fácies de alta energia (calcarenitos, dolarenitos e dolorruditos). Nas fácies de calcarenito e dolarenito é possível observar franja de cimento ao redor dos grãos, tratando-se de cimentação precoce, em ambiente marinho ou, por vezes, meteórico. Cimentação em ambiente de soterramento raso é comum. Esta cimentação impediu a compactação mecânica dos grãos.

* As rochas carbonáticas do Gr. Bambuí na região de Januária apresentam feições de alteração diagenética em ambientes subaéreos, submarinos e em subsuperfície, sendo esta última a feição predominante. Cavidades resultantes de dissolução meteórica preenchidas por sedimento fino dolomitizado estão presentes na região.

* O topo da Fm. Sete Lagoas na região de Alvorada do Norte encontra-se intensamente dolomitizado, com feições de carstificação. As cavidades geradas pelo processo meteórico foram preenchidas por sedimento carbonático fino, dolomítico. Análises isotópicas e de catodoluminescência indicam que a dolomitização da rocha corresponde a evento diferente da dolomitização do sedimento fino que preenche as cavidades.

* Na região de Januária ocorrem processos de dolomitização e hidrotermalismo nas rochas carbonáticas do Gr. Bambuí, sendo os principais eventos diagenéticos de subsuperfície identificados: cimentação por calcita, dissolução hidrotermal, dolomitização, mineralização de sulfetos e silicatos de Zn, fluorita e a presença de betume.

* Na região de Alvorada do Norte, fraturas abertas ou parcial a totalmente cimentadas por calcita estão presentes nas rochas carbonáticas das Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré. Porosidade secundária, gerada por processo de dissolução mesodiagenético, está associada com planos de fraturas e estilólitos. Esta evidente associação de porosidade secundária com as fraturas/falhas indicam que a dissolução foi gerada por fluidos ascendentes. Parte da porosidade secundária está preenchida por dolomita-em-sela, calcita blocosa, quartzo e localmente observam-se resquícios de betume. O betume migrou após a cimentação tardia. Análises isotópicas pontuais realizadas em cimentos de calcita e dolomita indicam temperaturas mais elevadas para a formação destes ($\delta^{18}\text{O}$ chegam a valores de -13,29 para calcita e -12,42 para dolomita). Este processo poderia estar relacionado a evento hidrotermal ou associado a frentes de migração de hidrocarbonetos.

Grupo Vazante

Na região de Fagundes, Estado de Minas Gerais, são conhecidos diversos estudos no que se refere à identificação e ordenamento dos eventos diagenéticos que atuaram nos carbonatos da Formação Morro do Calcário, visto a presença de importantes mineralizações de zinco e chumbo na região, geradas em processo de hidrotermalismo.

Monteiro et. al. (2005, 2006) observaram nas rochas carbonáticas da região de Fagundes uma dolomitização precoce, onde dolomita microcristalina substitui principalmente sedimentos micríticos. Evento de recristalização da dolomita foi também reconhecido em unidade portadora de mineralização. Uma dolomita de cristalinidade grossa oblitera a textura e estrutura original da rocha, ocorrendo de forma pervasiva. Eventos de recristalização e a geração da dolomita grossa podem estar, portanto, relacionados com o aumento da temperatura devido ao hidrotermalismo.

Os referidos autores observaram também a presença de dolomita fibrosa, a qual poderia representar a substituição de cimento marinho precursor, e dolomita inequante (dente-de-cão) e equante (blocosa), juntamente com quartzo, ocorrendo como cimento em cavidades, interpretado como possível diagênese de soterramento raso, com influência de água meteórica.

Nesta dissertação, os estudos realizados no testemunho do furo PFF-57 (região de Fagundes) mostram também a presença de cimento dolomítico fibroso. Porém foi observado cimento micrítico botrioidal e dolomítico, delineando porosidade. Estas duas fases de cimentação são possivelmente de origem marinha, as quais foram posteriormente dolomitizadas. Cimentação em ambiente de

soterramento raso também é comum nestas rochas. A cimentação precoce impediu a compactação mecânica dos grãos.

A dolomitização ocorre de forma tão intensa e pervasiva nos carbonatos da Formação Morro do Calcário que por vezes torna-se difícil caracterizar as fácies deposicionais. Torna-se então importante a caracterização dos tipos de dolomita presentes na rocha. Nas amostras estudadas ocorrem basicamente três tipos de dolomita: 1) dolomita de substituição - xenotópica, com a cristalinidade variando de muito fina a grossa, com bordas bastante irregulares; 2) dolomita de cimentação - idiotópica, com cristalinidade muito grossa; 3) dolomita de preenchimento de fraturas, idiotópica, de cristalinidade muito grossa a extremamente grossa, por vezes com leve extinção ondulante.

Uma feição de dissolução mesodiagenética, associada com planos de estilólitos, está presente tanto em afloramento, como no testemunho do furo PFF-57. Próximo aos estilólitos ocorre porosidade secundária do tipo vugular, cimentada por dolomita e localmente com pirobetume.

Azmy *et. al.* (2001) observaram quatro gerações de dolomitas em carbonatos do Gr. Vazante, caracterizando suas temperaturas de formação. São elas: 1) dolomita em esteiras microbiais; 2) cimento fibroso; 3) cimento equante; 4) cimento de dolomita tardio, de soterramento e de preenchimento de fraturas. As dolomitas 1, 2 e 3 são de baixa temperatura (< 50 °C) indicando eodiagênese. A dolomita 4 teria sido formada em condições de soterramento profundo, a temperaturas acima de 120 °C, correspondendo a evento de hidrotermalismo. Esta preenche as fraturas e está relacionada com as mineralizações de Zn-Pb.

Monteiro *et. al.* (2005, 2006) reconhecem evento de silicificação ocorrendo de forma intensa próximo às mineralizações, tratando-se de evento anterior.

No testemunho do furo PFF-57 é possível identificar zona onde silicificação e fraturas cimentadas por sílica ocorrem próximo à zona com as mineralizações, confirmando o evento de silicificação anterior às mineralizações.

Quanto ao minério, Bettencourt *et. al.* (2001) observa que a pirita representa a primeira geração de sulfetos, ocorrendo disseminada ou associada a preenchimentos de espaços abertos, estilólitos e veios com dolomita-em-sela. O minério é formado por pirita, esfalerita e galena, sendo esta última em geral tardia em relação às demais fases.

Caracterizando as mineralizações presentes no furo PFF-57 através de seção polida, lâmina delgada e descrição macroscópica, pôde-se constatar zonação, onde cristais de pirita ocorrem na borda das fraturas e posteriormente há precipitação de esfalerita. Observa-se então a ocorrência de processo de microfraturamento dos cristais de esfalerita, e por vezes de pirita, sendo que as

microfraturas e o espaço poroso restante encontram-se cimentados por dolomita e galena. Estas feições petrográficas mostram então a ocorrência de diferentes pulsos de migração de fluidos.

Caracterização diagenética

Os eventos diagenéticos identificados nas rochas carbonáticas dos Grupo Bambuí e do Grupo Vazante presentes respectivamente nas áreas de Alvorada do Norte, Estado de Goiás, e Fagundes, Estado de Minas Gerais, apresentam similaridade na fase inicial, ou seja, na eodiagênese, porém eventos mesodiagenéticos modificaram de forma significativa as rochas das duas áreas estudadas.

Os principais pontos de comparação entre as rochas carbonáticas dos Grupos Bambuí e Vazante foram:

Ambiente deposicional – Em ambas as regiões as fácies estudadas são predominantemente calcarenitos, dolarenitos e dolorruditos, em sua maioria sem lama carbonática, o que indica ambiente de alta energia.

Evolução diagenética – Apesar das fácies serem deposicionalmente porosas, um intenso processo de cimentação ocorreu na eodiagênese, em ambiente marinho raso, localmente sob influência meteórica, e em condições de soterramento raso, obliterando grande parte da porosidade primária. A partir deste ponto, as diferenças na evolução diagenética entre as rochas carbonáticas presentes nas duas áreas estudadas está fortemente relacionada ao contexto tectono-estrutural.

O Gr. Vazante na região de Fagundes, MG, encontra-se em contexto de deformação intensa, ocorrendo dobras, fraturas e falhas de empurrão, enquanto o Gr. Bambuí encontra-se menos deformado, com leve dobramento na região de Alvorada do Norte, GO, mas intensamente fraturado. As falhas profundas presentes na região de Vazante-Paracatu foram os prováveis condutos para fluidos dolomitizantes, sendo que as rochas carbonáticas da Formação Morro do Calcário (Gr. Vazante) sofreram intenso e pervasivo processo de dolomitização e cimentação, o qual obliterou a porosidade remanescente. Já na região de Alvorada do Norte a dolomitização ocorre apenas no topo da Fm. Sete Lagoas, porém, diferentemente da Fm. Morro do Calcário, trata-se de evento diagenético precoce, relacionado a período de exposição.

Durante a mesodiagênese houve geração de porosidade secundária nas rochas carbonáticas das duas áreas. Nas rochas carbonáticas do Gr. Bambuí pelo menos dois eventos de fraturamento, dissolução e cimentação foram reconhecidos, sendo que a cimentação tardia não obliterou totalmente a porosidade.

Nos carbonatos do Gr. Vazante ocorreram pelo menos três fases de fraturamento, sendo a última relacionada ao hidrotermalismo. Neste caso a porosidade secundária gerada foi intensamente

obliterada, sendo que apenas localmente ocorre porosidade vugular, estando esta preenchida por pirobetume.

É interessante notar que os estilolitos serviram como condutos para fluidos corrosivos nos carbonatos do Gr. Bambuí e Vazante, visto que é bastante comum observar porosidade secundária em planos de estilolitos e/ou próximo a estes.

Hidrotermalismo – na região de Fagundes ocorrem mineralizações de Zinco e Chumbo associadas a processo hidrotermais. Nos veios e fraturas é comum a presença de dolomita como cimento, sendo que análises isotópicas de Oxigênio indicam altas temperaturas para a sua formação. Associadas a esta dolomita ocorre uma associação de pirita, esfalerita e galena. Houve também parcial silicificação da rocha. O hidrotermalismo contribuiu tanto para uma intensa cimentação e recristalização da rocha, como também para o craqueamento do hidrocarboneto, transformando este em pirobetume, composto basicamente por carbono, com baixíssimo índice de Hidrogênio.

Na região de Alvorada do Norte as rochas carbonáticas do Gr. Bambuí encontram-se fraturados. Associada às fraturas e planos de estilolitos ocorre dissolução da rocha, o que gerou porosidade secundária. Esta porosidade encontra-se parcialmente cimentada por dolomita-em-sela e quartzo. Os eventos de cimentação tardios podem estar relacionados circulação de fluidos hidrotermais. Porém, para melhor caracterização deste evento tardio, torna-se necessário estudo de inclusões fluidas.

Porosidade – Porosidade efetiva foi observada somente nos carbonatos do Gr. Bambuí, tratando-se de porosidade secundária dos tipos intercrystalina, vugular, móldica e porosidade em fraturas. Parte da porosidade está relacionada a planos de estilolitos, muitos deles horizontalizados. Porosidade primária é observada pontualmente, estando em parte alargada por processos de dissolução.

A porosidade secundária encontra-se parcialmente cimentada (dolomita-em-sela, calcita blocosa e localmente quartzo), sendo localmente observado resquícos de betume entre os cristais de cimento.

O evento de dissolução pode estar relacionado a migração de fluidos ricos em ácidos carboxílicos, CO₂ e SO₄, os quais são formados devido à maturação da matéria orgânica durante o soterramento (Surdam & Crossey 1984). Estas frentes ácidas podem ocorrer antes ou durante a migração de hidrocarbonetos, gerando porosidade secundária. A matéria orgânica concentrada em estilolitos também pode gerar tais fluidos corrosivos, o que explicaria a porosidade observada em planos de estilolitos e em suas proximidades.

8 CONCLUSÕES

As principais conclusões sobre as características das rochas carbonáticas das Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, amostradas no poço 1-RC-1-GO, perfurado na região de Alvorada do Norte, Estado de Goiás, são:

* As fácies deposicionais reconhecidas são predominantemente calcarenitos, calcirruditos e dolorruditos, indicando ambiente de alta energia;

* Houve intensa cimentação nestas fácies durante a eodiagênese, o que obliterou grande parte da porosidade primária;

* Foram reconhecidos pelo menos dois processos de fraturamento, ambos após a compactação química.

* Um importante processo de dissolução ocorreu na mesodiagênese, gerando porosidade secundária dos tipos intercrystalina, móldica e vugular.

* A porosidade secundária encontra-se parcialmente cimentada por calcita blocosa, dolomita, dolomita-em-sela e quartzo.

* Resquílios de hidrocarbonetos podem ser observados em porosidade secundária.

* Análises isotópicas de Oxigênio indicam que o evento de cimentação tardio observado nas rochas carbonáticas do Gr. Bambuí podem estar relacionados a fluidos hidrotermais.

* Estão presentes estilólitos horizontais a subverticais, sendo comum apresentarem porosidade secundária ao longo dos mesmos. Isto indica que estes atuaram como caminho para a percolação de fluidos corrosivos.

* As rochas carbonáticas do Gr. Bambuí, na região de Alvorada do Norte, são portadoras de porosidade efetiva, sendo potenciais reservatórios de hidrocarbonetos. Esta porosidade é do tipo secundária, relacionada a processos de fraturamento e dissolução ocorridos durante a mesodiagênese.

* O pacote carbonático que ocorre a 970 a 1110 m de profundidade (Intervalo I), no poço 1-RC-1-GO, pode corresponder ao topo do Grupo Paranoá. O contato entre as rochas carbonáticas do intervalo I e as rochas carbonáticas imediatamente acima destas (Intervalo II – Fm. Sete Lagoas) se dá através de plano de falha, observado através de perfil de *Dipmeter*.

* Dados isotópicos e mineralógicos mostram diferenças entre as rochas carbonáticas dos intervalos I e II.

* Perfis de Densidade, Caliper e Resistividade mostram que as rochas correspondentes ao intervalo II (Fm. Sete Lagoas) encontram-se intensamente fraturadas, com possível presença de cavidades geradas por dissolução.

As principais conclusões sobre as características das rochas carbonáticas da Formação Morro do Calcário, Grupo Vazante, amostrados no furo PFF-57, perfurado na região de Fagundes, Estado de Minas Gerais, são:

* As principais fácies deposicionais observadas são dolorruditos (brechas carbonáticas – fragmentos intraclásticos chegam a 1 metro de tamanho) e dolarenitos, indicando ambiente de alta energia, com alta instabilidade do substrato.

* Houve intensa cimentação durante a eodiagênese, o que obliterou grande parte da porosidade primária;

* Ocorreram pelo menos três fases de fraturamento, sendo uma antes da compactação química e duas após este processo. As fraturas encontram-se fechadas ou cimentadas;

* Estilolitos serviram como condutos para percolação de fluidos corrosivos, ocorrendo porosidade secundária cimentada próximo a estes;

* Houve migração de hidrocarbonetos, sendo observada presença de pirobetume em planos de estilolitos e em porosidade vugular;

* Ocorrem estilolitos subverticais a subhorizontais, sendo comum a presença de porosidade secundária próximo a estes ou ao longo dos mesmos, indicando que atuaram como condutos para a migração de fluidos corrosivos. Esta porosidade encontra-se obliterada.

* As rochas carbonáticas foram submetidos a processos hidrotermais, o que resultou em intensa dolomitização, silicificação, cimentação e brechação, além da mineralização de sulfetos de Zn e Pb principalmente em fraturas.

* Houve craqueamento do betume devido às altas temperaturas relacionadas ao processo hidrotermal.

* As rochas carbonáticas da Fm. Morro do Calcário não apresentam porosidade efetiva.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahr, W.M., 1973. The carbonate ramp: an alternative to the shelf model. *In: Gulf Coast Association of Geological Societies, 23rd Annual Convention*, p. 221.
- Alkmin, F.F., Brito Neves, B.B., Castro Alves, J.A. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – Uma Revisão. *In: Dominguez, J.M.L., Misi, A. (ed.) O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG/Núcleo BA/SE, 45-62.
- Alkmin, F. F.; Chemale Jr., F., Endo, I. 1996. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e seu significado tectônico. *Rev. Escola de Minas*, 49(1): 22-38.
- Alkmim, F.F. & Martins-Neto, M.A. 2001. A Bacia Intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *In: Pinto, C. P. & Martins-Neto, M. A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais*. SBG, Belo Horizonte. p.9-30.
- Almeida, F.F.M. 1967. *Origem e Evolução da Plataforma Brasileira*. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, Boletim 241, 36p.
- Almeida, F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364.
- Alvarenga, C.J.S, Giustina, M.E.S.D., Silva, N.G.C.S., Santos, R.V., Gioia, S.M.C.L., Guimarães, E.M., Dardenne, M.A., Sial, A.N., Ferreira, V.P., 2007. Variações dos isótopos de C e Sr em carbonatos pré e pós-glaciação Jequitai (Esturtiano) na região de Bezerra-Formosa, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 37 (4-suplemento): 147-155.
- Amaral, G., Kawashita, K. 1967. Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. *In: SBG, Congr. Bras. Geol. Anais*, 214-217.
- Azmy, K.; Veizer, J.; Misi, A.; Oliveira, T.F.; Sanches, A.L. e Dardenne, M.A., 2001. Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco Basin, Brazil. *Precambrian Research*, No. 112, pp. 303-329.
- Barbosa, O. 1965. Série Bambuí. *In: SBG, Simpósio das formações Eo-Paleozóicas do Brasil, Congr. Bras. Geol., 19. Anais*, Rio de Janeiro.
- Barbosa, O., Dyer, R.C., Braun, O.P.G., Cotta, J.C. 1969. *Geologia e inventário dos recursos minerais do projeto Brasília: relatório final*. PROSPEC/DNPM.
- Bathurst, R.G.C. 1975. *Carbonate sediments and their diagenesis*. Elsevier, Amsterdam, 658p.
- Bathurst, R.G.C. 1984. The integration of pressure-solution with mechanical compaction and cementation. *In: Stylolite and Associated Phenomena Relevance to Hydrocarbon Reservoirs. Abu Dhabi National Reserv. Res. Found. Spec. Pub.*, pp. 41-55.

- Bertrand-Sarfati, J. Stromatolites columnaires du Precambrien Superieur; du Sahara Nord-occidental.
- Bettencourt, J.S., Monteiro, L.V.S., Bello, R.M.S., Oliveira, T.F. e Juliani, C., 2001. Metalogênese do zinco e chumbo na região de Vazante-Paracatu, Minas Gerais. In: Bacia do São Francisco – Geologia e Recursos Naturais. Pinto, C.P. e Martins-Neto, M.A., Editores. SBG, Belo Horizonte. 161-198 p.
- Branco, J.J.R. & Costa, M.T. da. 1961. Roteiro para a excursão Belo Horizonte-Brasília. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 15, Belo Horizonte, v.15, 25p.
- Braun, O.P.G. 1968. Contribuição à Estratigrafia do Bambuí. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 22, Belo Horizonte, *Anais*, 154-166.
- Campos Neto, M.C. 1984. Geometria das fases de dobramento do Brasileiro superpostos no Oeste de Minas Gerais. Ver. Bras. Geoc., **14**(1): 60-68.
- Castro, P.T.A. 1997. *Os conglomerados da borda SW do Cráton do São Francisco junto à porção S da Faixa Brasília: sedimentologia e relações estratigráficas com as rochas do Grupo Bambuí*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 264p.
- Castro, P.T.A. & Dardenne, M.A. 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southwestern domain of the São Francisco Craton, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**: 345-437.
- Choquette P.W. & James, N.P., 1987. Diagenesis in limestones – 3, the deep burial environment. *Geoscience Canadá*, **14**: 3-35.
- Choquette P.W. & Pray, L.C., 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, **54**: 207-250.
- Cunha, I. de A. 1999. *Estudo de inclusões fluidas e de isótopos de enxofre dos corpos de minério de Morro Agudo, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 105p.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 30, Recife, *Anais*, **2**: 507-610.
- Dardenne, M.A. 1978. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do São Francisco. In: SBG, Cong. Bras. Geol. 30, Recife, *Anais*, **1**: 299-308.
- Dardenne, M.A. 1981. Os Grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília. In: SBG, Simp. Cráton do São Francisco, 1º Anais, 140-157.
- Dardenne, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz, A., Filho & Campos, D.A. 2000. *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro, 231-263, (Intern. Geolo. Congr., 31).

- Dardenne, M.A., Freitas-Silva, F.H., Souza, J.C.F. de., Campos, J.E.G. 1998. Evolução Tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. *In: SBG, Congr. Bras. Geol.*, 40, Belo Horizonte, *Resumos*, 26.
- Della Piazza, H., Melo, U., Guazelli, W. 1987. Reavaliação das possibilidades de gás natural da Bacia Sedimentar do São Francisco. Relatório interno. Centro de Pesquisas Leopoldo A. Miguez de Mello, Petrobrás.
- Dunham, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In: Classification of Carbonate Rocks* (Ed. by W.E. Ham). *Mem. Am. Ass. Petrol. Geol.* **1**:108-121.
- Folk, R.L., 1959. Practical petrographic classification of limestones. *Boletim da AAPG*, **43**: 1-38.
- Folk, R.L., 1962. Spectral subdivision of limestones types. *In: Classification of Carbonate Rocks – a Symposium*, W.E. Ham, ed., Tulsa, OK. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, p.62-84.
- Folk, R.L., 1965. Some aspects of recrystallization in ancient limestones. *In: Dolomitization and Limestone Diagenesis* (Ed. L.C. Pray & R.C. Murray). *Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner.* **13**: 14-48.
- Folk, R.L., 1974. The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of magnesium content and salinity. *J. sedim. Petrol.* **44**: 40-53.
- Freitas-Silva, F.H., Dardenne, M.A. 1997. Pb/Pb isotopic patterns of galenas from Morro do Ouro (Paracatu Formation), Morro Agudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits. *In: South-American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts*, 118-120.
- Ginsburg, R. N., 1957, Early diagenesis and lithification of shallow water carbonate sediments in south Florida, in, Regional aspects of carbonate deposition, a symposium, R. J. Le Blanc and J. G. Breeding, ed.: Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub. 5, p. 80-99.
- Guimarães, E.M. 1993 Implicações da caracterização mineralógica e química da Formação Três Marias - região de Cabeceiras (GO) - na interpretação da gênese da Bacia. II Simpósio sobre o Cráton São Francisco e suas faixas marginais, Salvador. SBG-Núcleo Bahia/Sergipe/SGM *Anais*, 298-301p.
- Guimarães, E.M. 1997. *Estudos de proveniência e diagênese com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos Grupos Paranoá e Bambuí, na região de Bezerra-Cabeceiras (GO)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 270p.

- Guimarães, E.M., Dardenne, M.A., 1998. Características de coberturas cratônicas relacionadas com faixas de deformação: as bacias Paranoá e Bambuí e a evolução da faixa dobrada Brasília. *In: SBG, Cong. Bras. Geol. 40, Belo Horizonte, Abstracts, 4.*
- Guimarães, E.M., Soares, L., Fairchild, T., Dardenne, M.A., 2003. Proterozoic stromatolites from Central Brazil: paleoecological and tectonic setting in Paranoá and Bambuí Groups. *Micropalaeontologica Sinica, 20(1): 15-22.*
- Hoffman, P. 1976. Environmental diversity of Middle Precambrian stromatolites. *In: Stromatolites (Ed. by M.R. Walter) pp. 599-611. Elsevier, Amsterdam.*
- Koepnick, R.B. 1984. Distribution and vertical permeability of stylolites within a Lower Cretaceous carbonate reservoir, Abu Dhabi, United Arab Emirates. *In: Stylolites and Associated Phenomena Relevance to Hydrocarbon Reservoirs. Abu Dhabi National Reservoir Res. Found., Spec. Pub., pp 261-278.*
- Madalosso, A., Valle, C.R.O. 1978. Considerações sobre a estratigrafia e sedimentologia do Grupo Bambuí na Região de Paracatu – Morro Agudo (MG). *In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, Recife, Anais, 2: 622-631.*
- Marchese, H.C. 1974. Estromatolitos "Gymnosolenides" en el lado oriental de Minas Gerais, Brasil. *Rev. Bras. Geociências, 4(4); 257-272.*
- Marini, O.J., Fuck, R.A., Danni, J.C., Dardenne M.A. 1981. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e de seu embasamento. *In: CPM/SBG, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, Salvador, Anais, 100-115.*
- Martins, M. 1999. Análise Estratigráfica das Sequências Mesoproterozóicas (borda oeste) e Neoproterozóicas da Bacia do São Francisco. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de mestrado, 214 p.
- Martins, M., 2005. Análise estratigráfica das sequências neoproterozóicas da Bacia do São Francisco. III Simpósio sobre o Cráton do São Francisco: 287-290.
- Martins, M. & Lemos, V.B. 2007. Análise estratigráfica das sequências neoproterozóicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências, 37(4 – suplemento): 156-167.*
- Martins-Neto, M.A. & Alkmim, F.F. 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registros da quebra de Rodínea e colagem de Gondwana. *In: Pinto, C. P. & Martins-Neto, M. A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais. SBG, Belo Horizonte. p.31-54.*
- Martins-Neto, M.A., Pedrosa-Soares, A.C., Lima, S.A.A., 2001. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. *Sedimentary Geology, 141: 343-370.*

- Melo, U., Della Piazza, H., Jesus, J.A., 1991. Possibilidades petrolíferas da Bacia Proterozóica do São Francisco. Relatório interno. Departamento de Exploração, Petrobrás.
- Misi, A., Tassinari C.C.G., Iyer, S.S. 1997. New isotope data from the Proterozoic lead-zinc (Ag) sediment-hosted sulfide deposits of Brazil: Implications for their metallogenic evolution. *In: South-American Symposium no Isotope Geology, Extended Abstracts*, 201-203.
- Moeri, E. 1972. On a Columnar stromatolite in the Precambrian Bambuí Group of Central Brazil. *Eclog. Geol. Helv.*, **65**: 185-195.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Juliani, C., Oliveira, T.F., 2001. Minor and trace-element contents is sulfides from Vazante, Ambrósia, and Fagundes Neoproterozoic Carbonate-Hosted Na-(Pb) Deposits, Minas Gerais, Brazil: implications for Ore Genesis. *Ore Geology Reviews*, Special Issue (Submetido).
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Oliveira, T.F., 2000. The Vazante, Ambrósia, and Fagundes (MG, Brazil) Neoproterozoic Epigenetic Zinc Deposits: similarities, contrasting Features and Genetic Implications. *In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, Abstract (Cd-Rom)*.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Juliani, C., Bello, R.M.S., Oliveira, T.F., 2005. The Vazante-Paracatu zinc district: geology and metallogeny. *In: III Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Atas*, p. 328-331.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Juliani, C., Bello, R.M.S., Oliveira, T.F., 2005. Geology, petrography and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, **28**: 201-234 p.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Juliani, C., Bello, R.M.S., Oliveira, T.F., 2006. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, Minas Gerais, Brazil: Mass balance and stable isotope characteristics of the hydrothermal alterations. *Gondwana Research*, **11** (2007): 362-381 p.
- Moore, C.H. 1989. *Carbonate Diagenesis and Porosity*. Elsevier, Amsterdam, 338p.
- Nobre-Lopes, J. 1995. Faciologia de gênese dos carbonatos do Grupo Bambuí na região de Arcos, Estado de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Nobre-Lopes, J. 2002. *Diagenesis of the dolomites hosting Zn/Ag mineral deposits in the Bambuí Group at Januária region, MG*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas, 183p.

- Pimentel, M.M., Dardenne, M.A., Viana, M.G., Costa, S.M.C.L., Junges, S., Seer, H.J. 1999. Nd Isotopes and the provenance of the sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil: Geodynamic implications. *In: South American Symposium on Isotope Geology*, 2, Córdoba, *Actas*, 426-429.
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Jost, H., Ferreira F.C.F., Araújo, S.M., 2000. The basement of the Brasília fold belt and the Goiás magmatic arc. *In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz, F.A., Campos, D.A. (eds). Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 195-229 (Intern. Geol. Congr., 31)
- Pinho, J.M.M. 1990. Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 115p.
- Pinho, J.M.M., Dardenne, M.A., Rigobello, A.E. 1989. Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante. *In: SBG/MG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 5, *Anais*, 275-276, (Boletim 110).
- Pinho, J.M.M., Dardenne, M.A., Rigobello, A.E. 1990. Caracterização da movimentação transcorrente da falha de Vazante, Vazante, MG. *In: SBG, Congr. Bras. Geol.*, 36, Natal, *Anais*, 5: 2284-2295.
- Reading, H.G. 1986. Facies. *In: Sedimentary Environments and Facies* (Ed. By H.G. Reading). Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 4-19.
- Rocha Araújo da, P.R., Flicoteaux, R., Parron, C., Trompette, R. 1992. Phosphorites of Rocinha Mine, Patos de Minas (Minas Gerais, Brazil): Genesis and Evolution of a Middle Proterozoic Deposit Tectonized by the Brasiliano Orogeny. *Economic Geology*, **87**(2): 332-351.
- Rostirolla, S.P., Mancini, F., Reis Neto, M. 2001. Evolução estrutural da zona de falha da Faixa Vazante: exemplo de deformação Tardi-Orogenética na Faixa Brasília. *In: SNET, Recife*, 229-232.
- Santos, R.V.; Alvarenga, C.J.S.; Dardenne, M.A.; Sial, A.N. e Ferreira, V.P., 2000. Carbon and Oxygen isotope profiles across Meso-Neoproterozoic limestones from central Brazil: Bambuí and Paranoá Groups. *Precambrian Research*, **104**: 107-122.
- Scholle, P.A. 1978. *A color illustrated guide to carbonate rock constituents, textures, cements and porosities*. *Mem. Am. Ass. Petrol. Geol.* **27**, 241p.
- Scholle, P.A. & Halley, R.B. 1985. Burial diagenesis: out of sight, out of mind. *In: N. Schneidermann and P.M. Harris (Eds.), Carbonate cements, SEPM Spec.* **36**: 309-334.
- Scholle, P.A. & Ulmer-Scholle, D.S., 2003. *A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, texture, porosity, diagenesis*. *Mem. Am. Ass. Petrol. Geol.* **77**, 474p.

- Surdam, R.C. & Crossey, L.J. 1984. Mechanisms of organic/inorganic interactions in sandstone/shale sequences. *In: Mc. Donald & Surdam (ed.) Clastic Diagenesis*. Am. Assoc. Petrol. Geol., Memoir 37, p.177-231.
- Sverjensky, D.A. 1981. The origin of a Mississippi Valley-type deposits in the Viburnum trend, southeast Missouri. *Economic Geology*, **76**: 1848-1872.
- Tucker, M.E., 2001. *Sedimentary petrology*. Malden , Blackwell Science Ltd, 262p.
- Tucker, M. E. & Wright, V.P, 1990. *Carbonate Sedimentology*. Oxford, Blackwell Science Ltd., 482 p.
- Vieira, L.C., Trindade, R.I.F, Nogueira, A.C.R., Ader, M. 2007. Identification of a Sturtian cap carbonate in Neoproterozoic Sete Lagoas Carbonate Platform, Bambuí Group, Brazil. *C. R. Geoscience*, **339**: 240-258.
- Walter, M.R. 1976. *Stromatolites*. Elsevier, Amsterdam,790p.
- Wilson, J.L., 1974. Characteristics of carbonate platform margins. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.* **58**: 810-824.
- Wilson, J.L., 1975. *Carbonate facies in geologic history*. Springer-Verlag, Berlin. 471p.