

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA**

ALEXANDRE PAULO PORTELA SILVA

**ESTUDO DE RESERVATÓRIOS CARBONATADOS EM
DOIS POÇOS DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS:
CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA,
SÍNTESE COMPARATIVA INTEGRADA**

**UNIVERSIDADE
FEDERAL
FLUMINENSE**

**NITERÓI
2018**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA**

ALEXANDRE PAULO PORTELA SILVA

**ESTUDO DE RESERVATÓRIOS CARBONATADOS EM
DOIS POÇOS DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS:
CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA,
SÍNTESE COMPARATIVA INTEGRADA**

**UNIVERSIDADE
FEDERAL
FLUMINENSE**

**NITERÓI
2018**

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

**ESTUDO DE RESERVATÓRIOS CARBONATADOS EM DOIS
POÇOS DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS:
CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA,
SÍNTESE COMPARATIVA INTEGRADA**

ALEXANDRE PAULO PORTELA SILVA

DISSERTAÇÃO
MESTRADO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

Niterói – RJ

2018

ALEXANDRE PAULO PORTELA SILVA

ESTUDO DE RESERVATÓRIOS CARBONATADOS EM DOIS
POÇOS DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS:
CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA,
SÍNTESE COMPARATIVA INTEGRADA

Dissertação apresentada à Universidade
Federal Fluminense como requisito parcial
do Programa de Pós-Graduação em
Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a
obtenção do título de Mestre na área de
Geologia e Geofísica.

Orientadores: Professor Doutor André Luiz Ferrari (Universidade Federal Fluminense)
Professora Doutora Ana Cristina Azerêdo (Universidade de Lisboa)
Professor Doutor Luís Vítor Duarte (Universidade de Coimbra)

Niterói – RJ

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S586e Silva, Alexandre Paulo Portela
Estudo de reservatórios carbonatados em dois poços do pré-sal da Bacia de Santos: Cracterização faciológica e diagenética, síntese comparativa integrada / Alexandre Paulo Portela Silva ; André Luiz Ferrari, orientador ; Ana Neves dos Santos Azeredo, coorientadora. Niterói, 2108.
151 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2108.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2108.m.08158540139>

1. Bacia de Santos. 2. Pré-sal. 3. Reservatórios carbonáticos. 4. Descrição de testemunhos. 5. Produção intelectual. I. Ferrari, André Luiz, orientador. II. Azeredo, Ana Neves dos Santos, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Yolle Vacariuc Bittencourt - CRB7/6040

ALEXANDRE PAULO PORTELA SILVA

ESTUDO DE RESERVATÓRIOS CARBONATADOS EM DOIS POÇOS DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS: CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E DIAGENÉTICA, SÍNTESE COMPARATIVA INTEGRADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

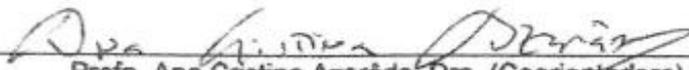
Área de Concentração: Geologia e Geofísica.

Aprovada em 28 de setembro de 2018.

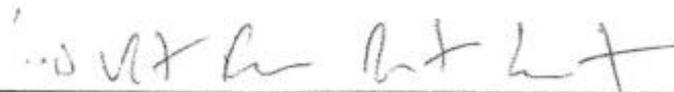
BANCA EXAMINADORA



Prof. André Luiz Ferrari, Dr (Orientador)
Deptº de Geologia/LAGEMAR-UFF



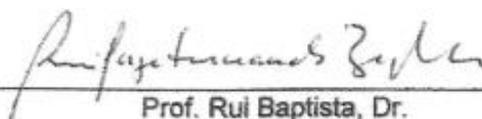
Profa. Ana Cristina Azerêdo, Dra. (Coorientadora)
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa



Prof. Luis Vitor Duarte, Dr. (Coorientador)
Deptº de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra



Prof. Dimas Dias Brito, Dr.
UNESP – Universidade Estadual Paulista



Prof. Rui Baptista, Dr.
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Nota: Esta dissertação foi redigida utilizando a ortografia do português de Portugal.

AGRADECIMENTOS

À Professora Ana Cristina Azerêdo, pela oportunidade que me deu de integrar este projecto tão aliciante, acreditando no meu potencial, mas também pelo acompanhamento e preocupação constantes, assim como pela orientação académica, vital para a realização desta tese.

Ao Professor Luís Vítor Duarte pelo apoio, acompanhamento e orientação académica, assim como pelas conversas futebolísticas.

Ao Professor Rui Baptista por acreditar e zelar pelos interesses deste projecto, e pela ajuda e incentivo à realização de um óptimo trabalho.

Ao Professor Luiz Pierantoni Gâmbôa pela oportunidade que me proporcionou de integrar este grupo de projecto.

Aos Professores André Luiz Ferrari e Wagner Moreira Lupinacci pelo apoio e acompanhamento incansável, mas também por toda a hospitalidade.

Ao grupo de projecto que tão bem me recebeu e ajudou durante a minha estadia no Brasil, e com os quais aprendi mais um pouco.

A todas as pessoas com as quais me cruzei durante esta jornada, e que me ensinaram a entender alguns dos lemas populares brasileiros “gentileza gera gentileza” e “no fim acaba sempre dando certo”.

À Universidade Federal Fluminense, instituição na qual tive o privilégio de cursar, e a todos os professores e funcionários do Departamento de Geologia e Geofísica, pela dedicação e apoio prestados.

À Fundação Euclides da Cunha pelo apoio financeiro prestado o que permitiu o foco total no meu trabalho.

À Petrogal Brasil, S.A., que permitiu a realização deste projecto e disponibilizou os recursos necessários para tal, e também agradecer à Maria Olho-Azul Martins pelo apoio e incentivo nomeadamente durante as visitas ao CENPES.

Ao Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa pelas condições logísticas que me permitiram continuar a desenvolver trabalho em Portugal.

Last but not least às pessoas mais importantes na minha vida, à minha família, principalmente aos meus pais, irmã e avós por toda a tolerância, apoio e amor incondicional, à Cláudia por ter estado sempre lá, e por me mostrar diariamente que a medida do amor é amar sem medida, sem barreiras, sem fronteiras e sem distância, mas também pelos momentos incríveis que vivemos juntos no Brasil, que me deram forças para continuar; aos meus amigos de sempre, principalmente ao João Pessoa que sempre me apoiou e incentivou, ao Pedro Rolim pela amizade e por me fazer sentir sempre em casa mesmo estando noutro continente, ao João Reis pela constante preocupação com o meu trabalho, pelo incentivo constante e por acreditar em mim, ao Bruno Penajóia e ao Rodrigo Neves, pela amizade e apoio incondicional.

“In reading the rocks, we read the story of our restless planet. We come to understand its complex patterns of interaction and the nature of change over deep geological time.”

(autor desconhecido; retirado de numa exposição no Museu de História Natural de Londres, em abril de 2015)

Índice

AGRADECIMENTOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS	1
2. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO-GEOLÓGICO	5
2.1. Génese das bacias da margem brasileira	5
2.2. Evolução tectonostratigráfica da Bacia de Santos	7
3. CONCEITOS TEÓRICOS	15
3.1. Sedimentação carbonatada	15
3.2. Carbonatos lacustres	16
3.3. Reservatórios carbonatados	16
3.4. Propriedades importantes das rochas no estudo de reservatórios	17
3.5. Diagénese	20
3.6. Processos Diagenéticos	22
3.7. Ambientes Diagenéticos	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	27
5. CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E SÍNTESE DESCRITIVA DOS TESTEMUNHOS	32
5.1. Caracterização das fácies	32
5.2. Síntese descritiva dos testemunhos	38
5.2.1. Testemunho 1.....	38
5.2.2. Testemunho 2.....	41
6. VARIABILIDADE DE FÁCIES, ASSOCIAÇÕES FACIOLÓGICAS E PADRÕES EVOLUTIVOS	51
6.1. Variabilidade de fácies	51
6.1.1. Testemunho 1.....	51
6.1.2. Testemunho 2.....	52
6.2. Associações de fácies	53
6.2.1. Testemunho 1.....	53
6.2.2. Testemunho 2.....	53
6.3. Sucessão dos padrões faciológicos	55
7. CARACTERIZAÇÃO DIAGENÉTICA	56
7.1. Processos diagenéticos e argilosidade	56
7.1.1. Testemunho 1.....	56

7.1.2. Testemunho 2	60
7.2. Porosidade e a sua afinidade faciológica	65
7.2.1. Testemunho 1	65
7.2.1. Testemunho 2	67
8. INTERPRETAÇÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS	70
8.1. Fácies deposicionais <i>versus</i> fácies diagenéticas	77
8.2. Tipologia da porosidade <i>versus</i> qualidade do reservatório	80
8.3. Interação do CO ₂ com o reservatório	83
9. CONCLUSÕES	84
10. BIBLIOGRAFIA	87
11. ANEXOS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esboço com as principais Bacias brasileiras (baseado em Cainelli & Mohriak, 1999).	5
Figura 2.2 – Reconstruções paleogeográficas do Barremiano ao neo-Aptiano, mostrando as principais fases tectónicas e a abrangência da sedimentação marinha no Oceano Atlântico Sul (Dias, 2005).	6
Figura 2.3 – Mapa com a localização da Bacia de Santos, contextualizada entre as bacias de Pelotas e de Campos (Abelha, 2017).	8
Figura 2.4 – Mapa com a localização da Bacia de Santos e de alguns dos seus principais elementos estruturais (Garcia <i>et al.</i> , 2012; <i>in</i> Abelha, 2017).	8
Figura 2.5 – Secções esquemáticas que mostram o deslocamento para leste do processo de <i>rifting</i> e a exposição das áreas proximais durante o eo-Aptiano (A), e o recobrimento da discordância pré-Aptiano superior pela sedimentação marinha durante o neo-Aptiano, em condições de quiescência tectónica (B) (Dias, 2005).	10
Figura 2.6 – Porção da supersequência da fase <i>rift</i> , do quadro estratigráfico da Bacia de Santos (adaptado de Moreira <i>et al.</i> , 2007).	11
Figura 2.7 – Porção da supersequência pós- <i>rift</i> , do quadro estratigráfico da Bacia de Santos (adaptado de Moreira <i>et al.</i> , 2007).	12
Figura 2.8 – Porção da supersequência <i>drift</i> , do quadro estratigráfico da Bacia de Santos (adaptado de Moreira <i>et al.</i> , 2007).	13
Figura 2.9 – Quadro estratigráfico da Bacia de Santos (Moreira <i>et al.</i> , 2007).	14
Figura 3.1 – Classificação da porosidade segundo Choquette & Pray (1970) (baseado em Moore, 2001).	19
Figura 3.2 – Zonas diagenéticas (baseado em Ali <i>et al.</i> , 2010).	22
Figura 3.3 – Classificação genética para a porosidade nas rochas carbonatadas (baseado em Ahr, 2008).	25
Figura 3.4 – Ambientes diagenéticos e os seus limites (baseado em Flügel, 2004).	26
Figura 4.1 – Classificação textural de rochas carbonatadas segundo Dunham, 1962 (<i>in</i> Terra <i>et al.</i> , 2010).	28
Figura 4.2 – Classificação textural de rochas carbonatadas, largamente utilizada em áreas de ocorrência de calcários bioconstruídos, segundo Embry & Klovan, 1971 (<i>in</i> Terra <i>et al.</i> , 2010).	29
Figura 4.3 – Classificação de fácies para o PS brasileiro (Azerêdo <i>et al.</i> , 2011b).	29
Figura 5.1 – Quadro de fácies representativo dos testemunhos estudados.	33
Figura 5.2 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das fácies (F) diferenciadas: A. F1, calcário argiloso com laminação planar suave (2_5427,85m). B. F1, calcário com menor teor argiloso do que em A, laminação marcada planar e crenulada (2_5436,55m). C. F2A, estrutura laminada ondulante e planar, pequenos esferulitos e zonas silicificadas (1_5319,55m). D. F2B, mostrando morfologias de <i>shrubs</i> , alguns parcialmente compactados/fragmentados (2_5433,60m). E.	

F2B com passagem no topo a F3 algo argilosa (2_5430,50m). F. F2BT, evidenciando claramente *shrubs* com morfologias bem desenvolvidas e preservadas (2_5421,05m). 36

Figura 5.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das fácies (F) diferenciadas: A. F2B2 (“*micro-shrubs*” disposição preferencial em bandas), com esferulitos dispersos e F2A, esta mais na base (2_5420,50m). B. F3, *grainstone* a *packstone* intraclástico, clastos maioritariamente correspondendo a estruturas da F2B (vide também C), ainda com trama de F2B reconhecível (2_5428,00m). C. F3 (vide também B) (1_5321,25m). D. F4, *grainstone* esferulítico, silicificado (2_5418,65m). E. F5, *packstone* com intraclastos frequentemente escuros (1_5315,95m). F. F6, *rudstone* oncolítico, com estruturas oncolíticas grandes e cimento dolomítico silicificado (1_5315,30m). 37

Figura 6.1 – Gráfico com as proporções relativas estimadas para as diferentes fácies identificadas no testemunho 1. 51

Figura 6.2 – Gráfico com as proporções relativas estimadas das diferentes fácies identificadas no testemunho 2. 52

Figura 6.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das associações de fácies mais comuns: A. Transição F2B – F3, com F3 a apresentar-se muito cimentada (1_5311,65m). B. Transição F2B – F3, com F2B já algo dissolvida, zona de F3 cimentada (1_5313,05m). 53

Figura 6.4 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das associações de fácies mais comuns: A. Transição F2B – F3 (2_5409,40m). B. Transição F2B – F3, com alguns laivos argilosos, possivelmente películas de F2A (2_5409,70m). C. Transição F2B – F2A, passagens cíclicas (2_5417,15m). D. F2BT com restos intersticiais de F2A (2_5428,40m). F. Transição F2B – F3 (2_5432,05m). G. F2B2 com passagens de F2A associadas (2_5433,30m). 54

Figura 7.1 – Fotomicrografia das unidades estudadas mostrando um exemplo representativo de processos diagenéticos na seguinte fácies (F): F6 com a fase de ligação completamente silicificada (1_5315,60m). 57

Figura 7.2 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F6 com cimento dolomítico (eventualmente, substituindo cimento calcítico microcristalino pré-existente) e alguma dolomitização das partículas calcíticas, é também possível identificar a ocorrência de desdolomitização através da presença de *rhombs* calcíticos (1_5316,40m). B. F6 com cimento dolomítico e alguma dolomitização das partículas calcíticas, é também possível identificar a ocorrência de desdolomitização através da presença de *rhombs* calcíticos (1_5317,00m). 58

Figura 7.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F2BT com zonas muito dissolvidas originando porosidades dos tipos VUG, BP, WP, GF; é possível identificar alguns restos de F2A, possivelmente já bastante dissolvida (1_5313,35m). B. F2BT constituída por arbustos digitiformes (“*micro-shrubs*”),

identificam-se zonas muito dissolvidas originando porosidades dos tipos VUG, BP, WP, GF; é possível identificar alguns restos de F2A, possivelmente já bastante dissolvida (1_5313,60m).	59
Figura 7.4 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F3 constituída por fragmentos carbonatados, provavelmente de origem F2B/F2BT, identificam-se contactos suturados; ocorrência de laivos argilosos associados a F2A (1_5321,55m). B. (1_5321,25m) F3 constituída por fragmentos carbonatados, provavelmente de origem F2B/F2BT, mas também alguns oncóides e clastos oncolitizados; identificam-se contactos suturados.	59
Figura 7.5 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F2A com zonas distintas, uma bastante dissolvida, restando apenas alguns laivos de F2A e alguns esferulitos, e outra zona onde apenas é possível identificar alguns esferulitos e grumos carbonatados, estando esta zona cimentada por um cimento silicioso (1_5319,55m). B. F6 com F3, sendo possível identificar oncóides, clastos oncolitizados e outros fragmentos carbonatados, ocorrência de cimentação siliciosa provavelmente a substituir o cimento carbonatado pré-existente (1_5318,45m).	60
Figura 7.6 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F2B com duas zonas distintas, uma bastante dissolvida e outra completamente silicificada (2_5426,65m). B. Textura cristalina com silicificação intensa, o protólito talvez fosse F2B (2_5430,00m).	62
Figura 7.7 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F2B com dolomitização intensa e algumas zonas desdolomitizadas (2_5411,25m). B. F2B com dolomitização intensa e algumas zonas desdolomitizadas (2_5439,60m).	63
Figura 7.8 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F2B com transição para F3, são identificadas algumas películas de F2A, a dissolução é intensa originando porosidade excelente (2_5409,70m). B. F2B muito dissolvida/corroída com porosidade excelente (2_5426,65m).	64
Figura 7.9 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F2B com partículas muito amalgamadas, formando um <i>framework</i> compacto, identificam-se alguns contactos suturados (2_5413,85m). B. F2BT com as partículas a apresentarem evidências de ocorrência de compactação, identificando-se contactos suturados; presença de fracção argilosa (2_5433,60m).	64
Figura 7.10 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): A. F2B com cimentação dolomítica intensa entre os <i>shubs</i> , sendo possível identificar pelo menos duas fases de cimentação distintas (2_5438,95m). B. F2B com F2A intersticial e com cimentação dolomítica associada (2_5418,95m).	65

Figura 7.11 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da porosidade em algumas fácies (F): A. Porosidade boa, VUG, localmente CH e WP em F2BT (1_5313,35m). B. Porosidade baixa, FE e VUG em F2A (1_5319,40m).	67
Figura 7.12 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos da porosidade em algumas fácies (F): A. Porosidade excelente, GF, VUG e CV em F2B (2_5412,35m). B. Porosidade excelente BP em F3 (2_5423,65m).	69
Figura 8.1 – Quadro com a cronologia relativa dos processos diagenéticos nos dois testemunhos.	76
Figura 8.2 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da variedade morfológico-estrutural associada à fácies 2B: A. F2B “maciça”, compacta/aglomerada e sem edificação aparente (2_5413,85m). B. F2BT com uma estrutura claramente edificada, <i>shrubs</i> organizados e bem desenvolvidos (2_5420,80m). C. F2B2 com os “ <i>micro-shrubs</i> ” a apresentarem um certo alinhamento, evidenciando alguma organização. (2_5433,30m). D. F2B “rendilhada”, com a estrutura bastante dissolvida/corroída, formando uma espécie de renda/rede, e as partículas carbonatadas encontram-se ligadas por o que parecem ser “pontes” dolomíticas (2_5409,10m). E. F2B “ <i>quasi-F3</i> ”, com uma estrutura muito dissolvida/corroída, as partículas encontram-se ligadas apenas por contactos pontuais e algumas “pontes” dolomíticas (2_5431,45m).	78
Figura 8.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da possível origem da fácies F3: A. F2B “maciça”, compacta/aglomerada e sem edificação aparente e passagem para uma zona superior com F2B “ <i>quasi-F3</i> ” e F3 (2_5432,05m). B. F3 representado por um grainstone composto por partículas carbonatadas, provavelmente o que resta de uma fácies F2B “maciça” (2_5423,95m).	80
Figura 8.4 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da porosidade nas fácies (F) mais porosas: A. Porosidade excelente, GF, BP e VUG em F2B (2_5412,35m). B. Porosidade excelente BP em F3 (2_5423,65m). C. Porosidade boa a muito boa, VUG, BP e WP em F2BT (1_5313,35m). D. Porosidade baixa a moderada, FE e VUG em F2A (1_5319,40m).	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 7.1 – Tabela que mostra a ocorrência e intensidade dos diferentes processos diagenéticos e da argilosidade, identificados no testemunho 1.	56
Tabela 7.2 – Tabela que mostra a ocorrência e intensidade dos diferentes processos diagenéticos e argilosidade, identificados no testemunho 2.	61
Tabela 7.3 – Tabela que mostra os tipos de porosidade mais comuns associados às diferentes fácies, no testemunho 1.	67
Tabela 7.4 – Tabela que mostra com os tipos de porosidade mais comuns associados às diferentes fácies, no testemunho 2.	69

RESUMO

O presente estudo, apresentado sob a forma de uma dissertação de mestrado, enquadra-se no âmbito do *Projecto “Análise de Atributos e Inversão Sísmica para a Interpretação e Caracterização de Reservatórios do Pré-Sal”*, acordado entre a Universidade Federal Fluminense e a Petrogal Brasil, S.A., e constitui a componente de Sedimentologia.

O pouco conhecimento e a limitada caracterização das rochas carbonatadas que constituem o principal reservatório do Pré-Sal, aliados à complexidade associada a estes reservatórios, resultado de um conjunto de factores (dos quais se destaca a diagénese), revelam a necessidade de novos estudos de detalhe destas litologias. Nesse sentido, este estudo tem como principal objectivo contribuir para a caracterização faciológica e diagenética detalhada dos reservatórios carbonatados de um sector do Pré-Sal da Bacia de Santos, tentando também estabelecer uma possível relação entre estas características e as propriedades das rochas, nomeadamente, porosidade e permeabilidade, identificando possíveis padrões e/ou assinaturas que contribuam para uma melhor definição das qualidades e variabilidade dos reservatórios carbonatados em causa.

Apresenta-se aqui a caracterização faciológica e diagenética, bem como a síntese comparativa integrada de dois poços (poços 1 e 2), estudados do ponto de vista sedimentológico e faciológico, tendo como foco os reservatórios carbonatados da Formação Barra Velha, enquadrada no Pré-Sal da Bacia de Santos. A observação dos testemunhos foi acompanhada e complementada com a observação de amostras laterais e de *plugs*, mas também com a observação microscópica (lâmina delgada), o que permitiu a identificação e caracterização de 6 fácies (F) principais (F1, F2, F3, F4, F5 e F6), com alguns subtipos associados a F2, tendo-se definido: **(F1)** calcário argiloso com estrutura laminada fina incipiente a nítida, existindo um predomínio de laminações silto-argilosas; **(F2)** calcário fundamental ou predominantemente formado por estruturas *in-situ* interligadas, com um conjunto de morfologias específicas diversas: F2A, estrutura claramente laminada (planar, ondulante, crenulada), por vezes evocando feição estromatolítica; F2B, *shrubs* de estrutura colunar/arborescente/digitiforme, com *framework* robusto a “rendilhado”; F2BT, *shrubs* de estrutura colunar/arborescente/digitiforme, bastante bem desenvolvidos e preservados; F2B2, estrutura do tipo “*micro-shrubs*”, em que estes parecem apresentar uma orientação/disposição preferencial planar, definindo bandas; **(F3)** *grainstones/packstones* intraclásticos, sendo estes desde clastos bem definidos a fragmentos irregulares, de dimensões variadas e maioritariamente correspondendo às estruturas constituintes da F2B/F2BT, estando *in-situ*; **(F4)**

grainstones/packstones esferulíticos; **(F5)** *grainstones/packstones* (localmente *rudstones*) exibindo evidências claras de retrabalhamento, sendo compostos por intraclastos frequentemente escuros, com arranjo textural heterogêneo; **(F6)** *grainstones/rudstones* e *packstones/floatstones* oncolíticos.

No que respeita à Fácies 2B, esta apresenta um leque de características morfológico-estruturais bastante diversificado, tendo-se verificado a ocorrência de transições subtis a claras de F2B “maciça” para estruturas mais finas e menos compactas, denominadas fácies “diagenéticas” e interpretadas como estágios graduais de dissolução/corrosão da fácies original. O maior desenvolvimento dos processos de dissolução e fragmentação deixam um *fabric* residual composto por clastos, onde ainda é possível identificar uma “trama fantasma”, naquilo que foi definido como Fácies 3. Esta interpretação, juntamente com outras singularidades identificadas neste estudo, aumentam as questões de terminologia/classificação das fácies associadas ao PS brasileiro, desafiando as nomenclaturas convencionais.

As heterogeneidades bastante evidentes, associadas às unidades carbonatadas em estudo, resultam de uma combinação complexa entre variações faciológicas de alta frequência, influência das texturas deposicionais e da diagênese multifásica. Os processos diagenéticos mais importantes na origem das características actualmente apresentadas nestas unidades carbonatadas são: dissolução, fracturação, dolomitização, cimentação, silicificação, recristalização e compactação; às quais se associa também a argilosidade.

As Fácies 2B e 2BT são as que apresentam melhores condições de porosidade e, por isso, um melhor potencial como fácies reservatório. A Fácies 2B2 apresenta, no geral, porosidade relativamente mais baixa que estas duas fácies, no entanto também apresenta boas indicações ao nível da porosidade; as Fácies 2A e 3 apresentam grandes variações laterais/verticais em termos de porosidade. Os tipos de porosidade mais frequentemente identificados foram o tipo *vuggy*, interpartícula, intrapartícula, trama de crescimento, eventualmente fractura.

Este estudo destaca o papel fundamental da análise detalhada de testemunhos a diferentes escalas, desde a microscópica à macroscópica, na previsão espacial da distribuição das características do reservatório, tendências de porosidade, padrões de litofácies e na qualidade dos reservatórios, o que pode ser bastante útil em situações semelhantes de prospecção/exploração complexas.

Palavras-chave: Pré-Sal, Bacia de Santos, Formação Barra Velha, Aptiano, Reservatórios Carbonatados, Fácies, Diagênese.

ABSTRACT

The present study, disclosed in the form of a MSc dissertation, falls within scope of the Project “*Análise de Atributos e Inversão Sísmica para a Interpretação e Caracterização de Reservatórios do Pré-Sal*”, agreed between Universidade Federal Fluminense and Petrogal Brasil, S.A., and constitutes the Sedimentology component.

The lack of knowledge and the limited characterization of the carbonates, which constitutes the main reservoir of Pre-Salt, and the complexity of carbonate reservoirs results from a range of facts (among which diagenesis stands out as a crucial one), this reveals the need for further detailed studies of these lithologies. Due to these the main objective of this study is to contribute to the faciological and diagenetic characterization of carbonate reservoirs of a Pre-Salt sector of the Santos Basin, also trying to establish a possible relationship between these characteristics and the rocks properties, like porosity and permeability, identifying possible patterns and/or signatures that contribute to a better definition of the qualities and variability of the carbonated reservoirs in study.

A faciological and diagenetic characterization is presented here, also as the integrated comparative synthesis of the two wells studied (well 1 and 2), focusing on the carbonated reservoirs of Barra Velha Formation, framed in the Pre-Salt of Santos Basin. The core observation was accompanied and complemented by the observation of lateral samples and plugs, but also with microscopic observation (thin-section), which allowed the identification and characterization of 6 main facies (F1, F2, F3, F4, F5 and F6), with a few subtypes associated with F2, resulting in: **(F1)** argillaceous limestone with incipient to marked lamination, whose laminae are mostly sedimentary, some microbial; **(F2)** limestone dominantly formed by *in-situ* bounded structures with a range of specific singular morphologies, sub-divided into: F2A, clearly laminated (planar, wavy, crenulated), namely stromatolitic fabric; F2B, shrubby columnar/tree-like/finger-like structures, showing robust to finely “lacy” structures; F2BT, shrubby columnar/tree-like/finger-like structures, fairly well developed and preserved; F2B2, “micro-shrubs” which appear to have a preferential planar orientation/arrangement, defining bands; **(F3)** apparently intraclastic grainstones/packstones, whose clasts are interpreted mostly as *in-situ* to slightly collapsed/reworked remnants of F2 material, so are classified as diagenetic, not depositional grainstones; **(F4)** spherulitic grainstones/packstones; **(F5)** intraclastic grainstones and packstones (locally rudstones) with heterogeneous, massive arrangement and common dark clasts; **(F6)** oncoidal grainstones/rudstones and packstones/floatstones.

Subtle to clear transitions from the robust to finely lacy-structures of F2B were recognized, interpreted as gradual corrosional stages of the original facies; further development of the dissolution and spalling processes leads to a “ghost shrub framework” where the remnants appear as “clasts”, thus forming a residual fabric resembling a grain-supported one (F3). The interpretation of this case as presented here, together with other singularities of the Brazil PS facies also rise terminology/classification issues challenging conventional nomenclature.

The marked heterogeneities associated with the studied carbonate units are the result of a complex combination of high-frequency variations of facies types and intricate mutual influence between depositional textures and multi-phased diagenesis. The most important diagenetic processes in the origin of the characteristics currently presented in these carbonate units are: dissolution, fracturing, dolomitization, cementation silicification, recrystallization and compaction; argilosity is also associated.

Facies 2B and 2BT are the ones that present better conditions of porosity and therefore a better potential as reservoir facies. Facies 2B2 presents, in general, relatively lower porosity than facies 2B and 2BT, but also presents good indications of porosity level, facies 2A and 3 present marked lateral/vertical porosity variations. The most frequently identified porosity types were vuggy, interparticle, intraparticle, growth-framework, possibly fracture.

This study highlights the key role of detailed core microscale analysis along with macroscopic observation to better predicting spatial distribution, porosity trends, rock-type patterns and quality of the PS singular reservoirs and may be useful in similar complex exploration/exploitation situations.

Keywords: Pre-Salt, Santos Basin, Barra Velha Formation, Aptian, Carbonate Reservoirs, Facies, Diagenesis.

1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

O presente estudo, apresentado sob a forma de uma dissertação de mestrado, enquadra-se no âmbito do *Projecto “Análise de Atributos e Inversão Sísmica para a Interpretação e Caracterização de Reservatórios do Pré-Sal”*, acordado entre a Universidade Federal Fluminense (UFF) e a Petrogal Brasil, S.A. (Petrogal), e constitui a componente de Sedimentologia. O Projecto visa compreender melhor a formação e evolução tectono-sedimentar da **Bacia de Santos (BS)**, com o intuito de delinear e caracterizar possíveis reservatórios carbonatados do **Pré-Sal (PS)**, focando-se em especial numa determinada área de interesse.

A terminologia “Pré-Sal” começou a ser amplamente utilizada a partir de 2005, quando a Petrobras iniciou a exploração na secção *rift* em águas profundas, na BS, tendo em 2006 ocorrido a primeira descoberta de óleo leve no poço pioneiro, 1-BRSA-369A-RJS, localizado no Bloco BM-S-11. Desde então, têm sido várias as definições aplicadas a esta terminologia (*e.g.* Carminatti *et al.*, 2008; Gomes *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2008), até que Papaterra (2010) associa “Pré-Sal” a uma definição de carácter geológico-temporal, abrangendo a sequência carbonatada depositada anteriormente à sequência evaporítica, assim sendo os reservatórios que ocorreram nestas condições devem ser considerados simplesmente mais antigos que a camada de sal autóctone, apresentando um carácter fundamentalmente geocronológico.

As descobertas petrolíferas da província do PS colocam o Brasil numa posição de destaque, posicionando-o nos próximos anos como um dos principais países no mapa de reservas petrolíferas, e assumindo uma posição estratégica face à grande demanda energética mundial (Carminatti *et al.*, 2008).

A descoberta dessas reservas conduziu à necessidade de operar com eficiência em águas ultraprofundas, o que necessitou de um grande avanço tecnológico e científico da indústria petrolífera, que teve de se renovar e se moldar ao panorama actual, abrindo-se assim uma nova fronteira na exploração e produção dos hidrocarbonetos. Para além disso, outro grande desafio encontrado, e que consome para além de recursos financeiros, muito tempo na exploração e produção associada ao PS é o elevado teor de dióxido de carbono (CO₂) presente em alguns reservatórios, o que resulta na necessidade de remoção das concentrações anómalas deste gás.

O pouco conhecimento acerca das rochas carbonatadas (informal e simplificada e referidas, frequentemente como “carbonatos”), que constituem o principal reservatório do PS representa outro grande desafio para a indústria, uma vez que estas rochas são muito

heterogéneas, apresentando porosidades e permeabilidades altamente variáveis. Também a escassez de reservatórios petrolíferos desta natureza traduz-se numa limitada experiência tanto a nível da prospecção e pesquisa, como na fase de produção.

Segundo Ahr (2008), a porosidade associada aos reservatórios carbonatados, regra geral, representa os efeitos combinados de mais do que um processo geológico, reflectindo vários episódios de mudanças ao longo da história de soterramento das rochas carbonatadas. Consequentemente, deve dar-se especial atenção à identificação da sequência de eventos que levaram ao arranjo final das propriedades das rochas, nomeadamente as características dos poros. Essas mudanças são resultado da diagénese associada às rochas carbonatadas, sendo bastante importante identificar os processos que produziram essas alterações, bem como o seu *timing* de actuação, de forma a compreender as relações causa-efeito. Do ponto de vista da compreensão do reservatório, é vital avaliar em que medida a diagénese produziu/modificou a porosidade e permeabilidade, e entender a origem e distribuição espacial das alterações produzidas. Neste contexto, a diagénese carbonatada e o seu entendimento assumem um papel de destaque, pois os processos que actuaram nas rochas, após a sua deposição, são bastante complexos, sendo os principais responsáveis pelas heterogeneidades evidenciadas actualmente nos reservatórios. Segundo Tucker & Wright (1990), a diagénese inclui 6 grandes processos diagenéticos: cimentação, neomorfismo/recristalização, dissolução, compactação, dolomitização, desdolomitização. A sua identificação, percepção do *timing* de actuação, e entendimento dos efeitos produzidos nas rochas carbonatadas é muito importante.

A sequência carbonatada que constitui Formação (Fm.) Barra Velha, que é objecto deste estudo, representa o principal reservatório do PS, o maior reservatório carbonatado de carácter não-marinho do mundo, com mais de 500 m de espessura, depositado em ambiente lacustre raso e altamente alcalino (Szatmari & Milani, 2016). A espessura desta formação varia significativamente ao longo da bacia, desde >500 m a <55 m nos altos de blocos de falha, onde pode estar localmente ausente (Wright & Barnett, 2015). O principal objectivo deste estudo consiste na caracterização faciológica e diagenética dos reservatórios carbonatados presentes na sucessão estratigráfica subjacente aos evaporitos da BS, em geral, bem como a sua interpretação e síntese comparativa integrada, do ponto de vista diagenético, perspectivando a relação entre aquelas características e as propriedades das rochas carbonatadas importantes no estudo de reservatórios, nomeadamente, porosidade e permeabilidade. Em termos mais detalhados, os principais objectivos são:

- ❖ Contribuir para a caracterização faciológica e diagenética detalhada dos reservatórios carbonatados presentes nos sectores e intervalos em estudo no Projecto, acima mencionado.
- ❖ Pesquisar e estabelecer de forma sistematizada a relação entre as características faciológicas e diagenéticas, por um lado e, por outro, entre estas e as propriedades das rochas carbonatadas importantes no estudo de reservatórios, nomeadamente, porosidade e permeabilidade.
- ❖ Identificar e compreender padrões e assinaturas das propriedades dos reservatórios que possam contribuir para a melhor definição das suas qualidades e variabilidade no sector estudado e no PS, em geral.
- ❖ Contribuir para a interpretação sedimentar e diagenética das unidades nas quais se desenvolveram os reservatórios carbonatados do PS da Bacia de Santos.

Apresenta-se aqui a caracterização faciológica e diagenética, bem como a síntese comparativa integrada de dois poços (poços 1 e 2), estudados do ponto de vista sedimentológico e faciológico, tendo como foco os reservatórios carbonatados da Fm. Barra Velha, enquadrada no PS da Bacia de Santos. A disponibilidade de testemunhos, amostras laterais e lâminas delgadas permitiriam um estudo mais pormenorizado conciliando diferentes escalas de observação, tendo-se procedido à descrição e registo iconográfico do material disponibilizado para dois poços.

Sabe-se que apesar das descobertas dos reservatórios carbonatados do PS terem potenciado a indústria petrolífera e todo o conhecimento que a envolve, abrindo novas fronteiras e colocando desafios tanto aos agentes da indústria como da academia, existem ainda muitas incertezas, no que respeita à singularidade e características incomuns das fácies e sequências encontradas nos sistemas petrolíferos do PS, em particular nos reservatórios. Nota de destaque para alguns trabalhos publicados e que apresentam informação, ainda que parcial, relativa ao PS (*e.g.* Terra *et al.*, 2010; Wright, 2010, 2012; Azerêdo *et al.*, 2011a, 2018; Muniz, 2013; Tosca & Wright, 2014, 2015, 2017; Wright & Barnett, 2014, 2015, 2017; Muniz & Bosence, 2015, 2017; Szatmari & Milani, 2016; Wright & Tosca, 2016; Carlotto *et al.*, 2017; Herlinger

et al., 2017; Chafetz *et al.*, 2018), de algum modo complementados pelos estudos de outros depósitos considerados mais ou menos afins dos do PS, em diferentes zonas do globo (*e.g.* Della Porta, 2015; Mercedes-Martín *et al.*, 2016, 2017; Della Porta *et al.*, 2017; Erthal *et al.*, 2017; Rogerson *et al.*, 2017).

2. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO-GEOLÓGICO

2.1. Génesis das bacias da margem brasileira

O contexto geodinâmico de abertura do Atlântico Sul, associado à fragmentação do sector oeste do super-continente Gondwana, permitiu a formação e desenvolvimento das bacias sedimentares que actualmente constituem a província petrolífera do PS brasileiro (*e.g.* Cainelli & Mohriak, 1999; Milani *et al.*, 2000; Chang *et al.*, 2008; Garcia *et al.*, 2012) (Fig. 2.1).



Figura 2.1 – Esboço com as principais Bacias brasileiras (baseado em Cainelli & Mohriak, 1999).

O início desta separação, datada do Cretácico Inferior, entre o que são hoje conhecidos como continente sul-americano e continente africano, levou à formação de vales e depressões que em condições de ambiente lacustre permitiram a deposição de rochas carbonatadas actualmente identificadas como reservatórios do PS brasileiro (*e.g.* Moreira *et al.*, 2007; Muniz, 2013; Wright & Barnett, 2014, 2015, 2017; Tosca & Wright, 2015; Szatmari & Milani, 2016, Wright & Tosca, 2016) (Fig. 2.2). Estas litologias antecedem uma espessa sucessão salífera que se terá formado em condições favoráveis (episódios de inundação, evaporação e precipitação química), aquando do aumento da separação continental e consequentes incursões marinhas, com a deposição salífera a encontrar-se estrangida ao intra-Aptiano, o que é indicado por faunas marinhas registadas abaixo e acima do sal (Silva-Telles, 1996) (Fig. 2.2).

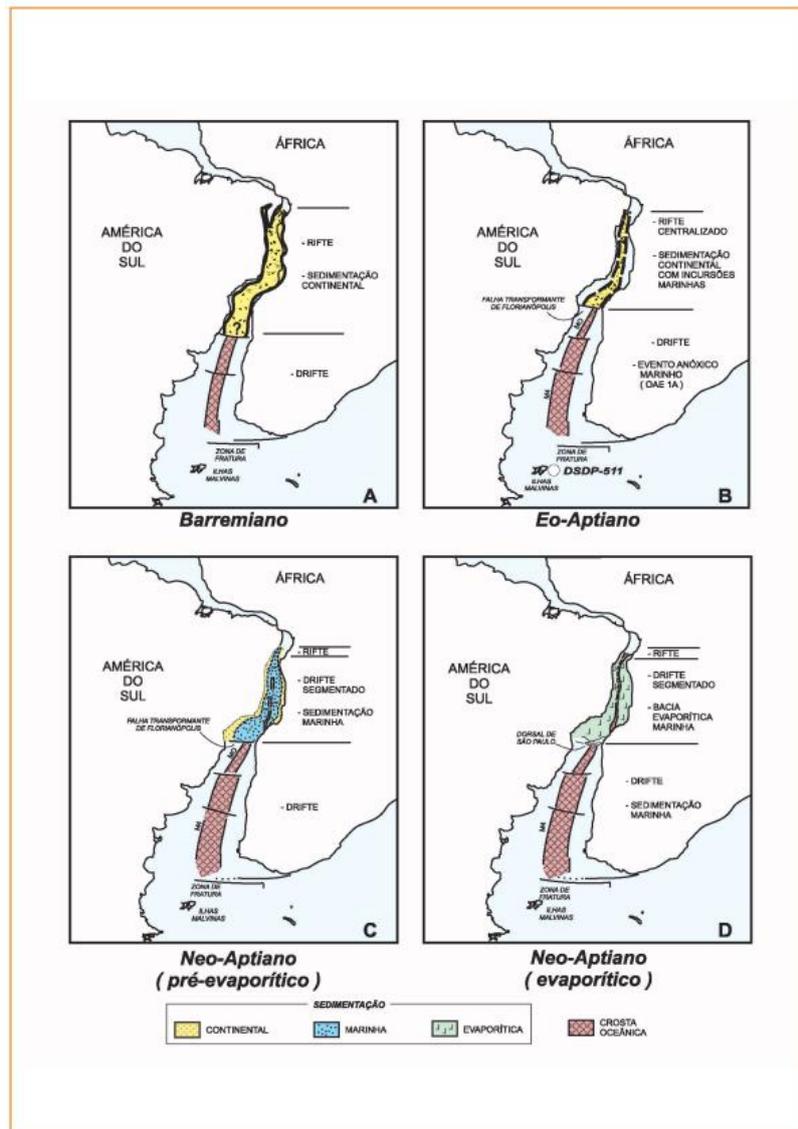


Figura 2.2 – Reconstruções paleogeográficas do Barremiano ao neo-Aptiano, mostrando as principais fases tectônicas e a abrangência da sedimentação marinha no Oceano Atlântico Sul (Dias, 2005).

Esta “Bacia de Sal” tem aproximadamente 400 km de largura na sua extremidade sul (Bacia de Santos), estreitando para NE do Brasil até valores inferiores a 100 km de largura (Bacia Sergipe-Alagoas), no entanto parecem existir evidências de que a deposição do intervalo de sal tenha sido de curta duração, entre 0,5 a 1 milhão de anos (*e.g.* Dias, 1998; Dias, 2005; Garcia *et al.*, 2012) o que corresponde a uma elevada taxa de deposição (Chang *et al.*, 1988; Dias, 1998). À medida que a separação dos continentes ia aumentando e dando origem à formação do Atlântico Sul, no Aptiano superior, a criação de espaço de acomodação devido à pressão litostática dos sedimentos, permitiu que outras rochas se depositassem acima da camada de sal.

A distensão da litosfera ocorreu de forma assimétrica, devido à rotação horária da Placa Sul-Americana a partir de um polo de rotação situado a NE desta, resultando num leque que se alarga para S, e conseqüentemente o estiramento e o afinamento crustal aumentam também para S, assim como a largura da crosta oceânica gerada posteriormente. Szatmari & Milani (2016) apontam evidências do aumento do magmatismo para S reflectindo esse maior estiramento, combinado com a presença de um manto sub-litosférico aquecido (permaneceu coberto por 350-400 Ma), mas também com a presença de uma anomalia térmica associada à Pluma de Tristão da Cunha.

Na porção sul da margem proto-atlântica brasileira, onde se inclui a BS, o *rifting* e subsidência iniciais são assinalados por intensa extrusão basáltica, e as fases posteriores de subsidência e sedimentação correspondem a 3 megassequências, semelhantes no conjunto das bacias da margem brasileira: megassequências continental, transicional e marinha, separadas por fortes discontinuidades erosivas, associadas a grandes pulsos tectônicos (Cainelli & Mohriak, 1999; Mohriak *et al.*, 2008).

2.2. Evolução tectonostratigráfica da Bacia de Santos

A **Bacia de Santos** (Fig. 2.3) corresponde a uma bacia de margem passiva que se terá formado durante o Cretácico inferior, devido ao evento de ruptura do super-continente Gondwana e abertura do oceano Atlântico. Localiza-se entre as latitudes 23° e 28° S na porção SE da margem continental passiva brasileira, no *offshore* dos estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro, e é uma das maiores e mais importantes bacias sedimentares brasileiras de margem continental, abrangendo uma área aproximada de 350.000 km² e profundidades que podem chegar a ser superiores a 3.000 m (Carlotto *et al.*, 2017). Esta bacia encontra-se limitada a N pelo alto estrutural de Cabo Frio que a separa da Bacia de Campos e a S pelo alto estrutural de Florianópolis que a separa da Bacia de Pelotas, já o limite W da bacia é representado pelos cinturões das serras costeiras (Maciço da Carioca, Serras do Mar e da Mantiqueira), enquanto que o limite E é representado pelo *Plateau* de São Paulo (Moreira *et al.*, 2007) (Fig. 2.4).

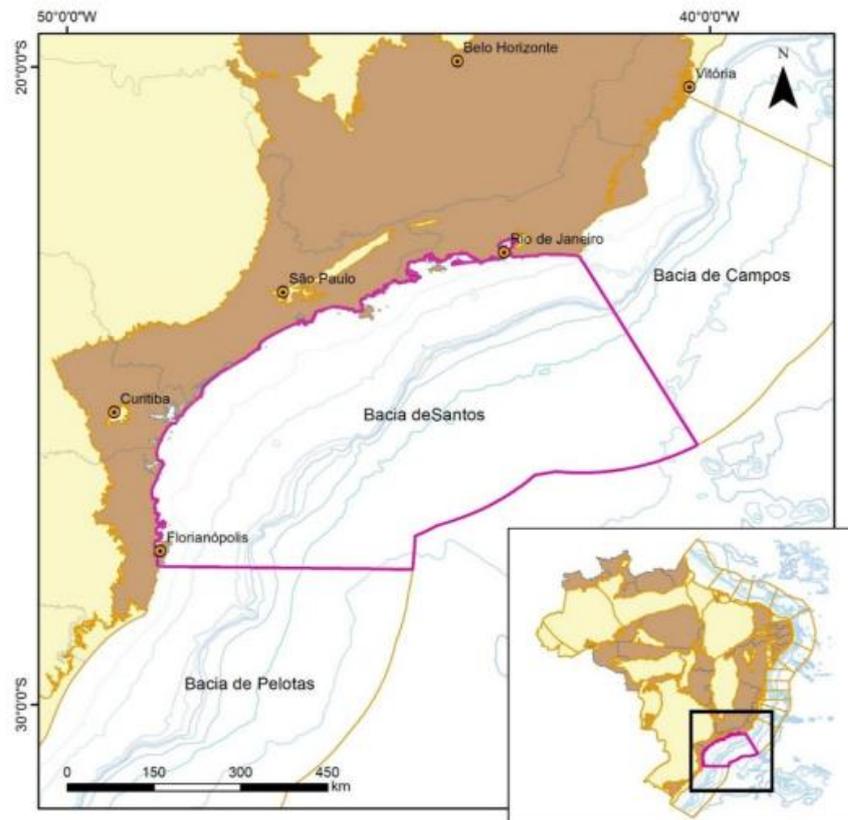


Figura 2.3 – Mapa com a localização da Bacia de Santos, contextualizada entre as bacias de Pelotas e de Campos (Abelha, 2017).

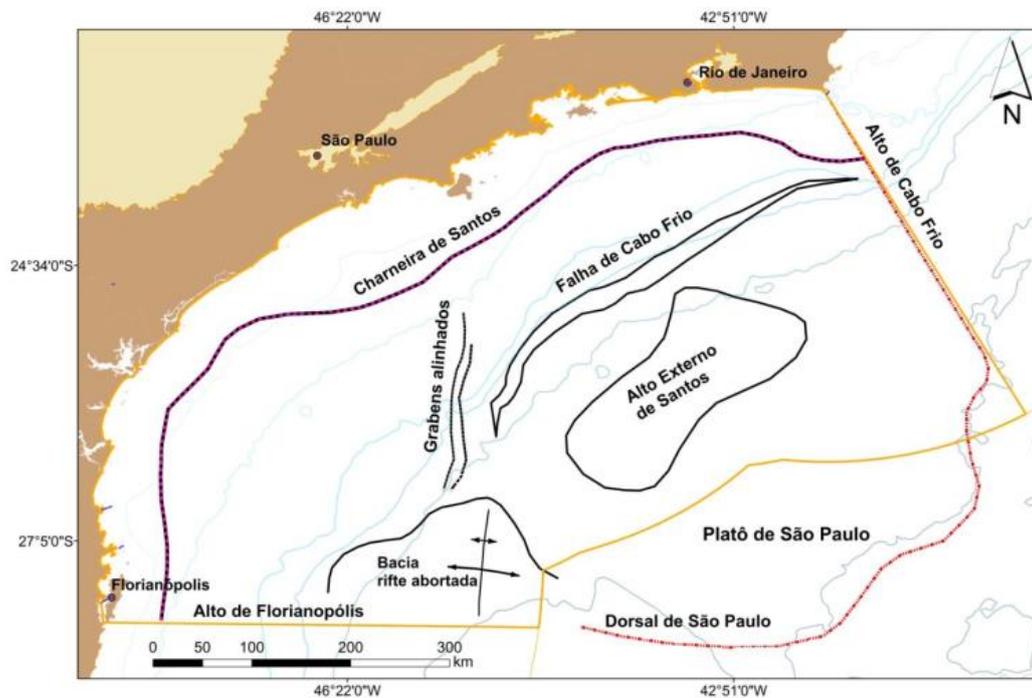


Figura 2.4 – Mapa com a localização da Bacia de Santos e de alguns dos seus principais elementos estruturais (Garcia *et al.*, 2012; *in* Abelha, 2017).

A evolução tectonostratigráfica desta bacia é característica de uma margem passiva, com registos geológicos bem marcados dos processos de estiramento crustal, rompimento da crosta continental, implantação da crosta oceânica e subsidência térmica, tendo sido estudada amplamente ao longo de vários anos por diversos autores (*e.g.* Pereira & Feijó, 1994; Milani *et al.*, 2007; Moreira *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2008). No entanto, neste trabalho optou-se por seguir a abordagem actualizada do arcabouço cronolitostratigráfico da BS sugerida por Moreira *et al.* (2007), na qual o registo sedimentar da bacia está dividido em três supersequências principais: *Rift*, *Pós-Rift* e *Drift*. Estas são separadas por discordâncias erosivas e estão intrinsecamente relacionadas com as principais fases tectónicas, sendo subdivididas internamente em sequências deposicionais. Esta abordagem foi conciliada com a evolução tectono-sedimentar proposta por Chang *et al.* (2008). Em termos estruturais, a bacia pode ser dividida em 2 porções distintas, concretamente, uma zona mais interna e rasa próxima à zona litoral, onde o pacote sedimentar não ultrapassa 2.000 m de espessura; e uma parte mais externa e profunda, na qual o soco se encontra a mais de 8.000 m de profundidade (Leyden *et al.*, 1971; Ponte & Asmus, 1976).

Segundo Garcia *et al.* (2012), o processo de ruptura que levou à abertura do Oceano Atlântico imprimiu as principais feições estruturais da BS, com o desenvolvimento de vários *half-grabens*, preenchidos por sedimentos *sin-rift* e mais frequentemente *pós-rift*. A secção *rift* é principalmente controlada por falhas normais NE-SW, existindo também evidências para zonas mais a norte da área em estudo, controladas por falhas normais NW-SE e N-S. Esta complexidade estrutural na distribuição das diferentes famílias de falhas é controlada pela existência de zonas de transferência na porção norte da área em estudo, perpendicular à direcção das principais falhas (NE-SW). As zonas de cisalhamento correspondem a zonas mais susceptíveis, que normalmente aproveitam estruturas preexistentes, e que em conjunto com o padrão de falhas normais, desempenham um papel crucial na compartimentação da bacia, e na movimentação vertical aparente, sendo bastante comuns nas bacias do Atlântico Sul.

O alinhamento do Alto de Florianópolis e da Dorsal de São Paulo proporcionou condições de desenvolvimento peculiares (Fig. 2.5), com estas estruturas a barrarem a circulação de águas oceânicas provenientes de sul, tendo-se assim iniciado a deposição da expressiva fase evaporítica da bacia (Demercian, 1996).

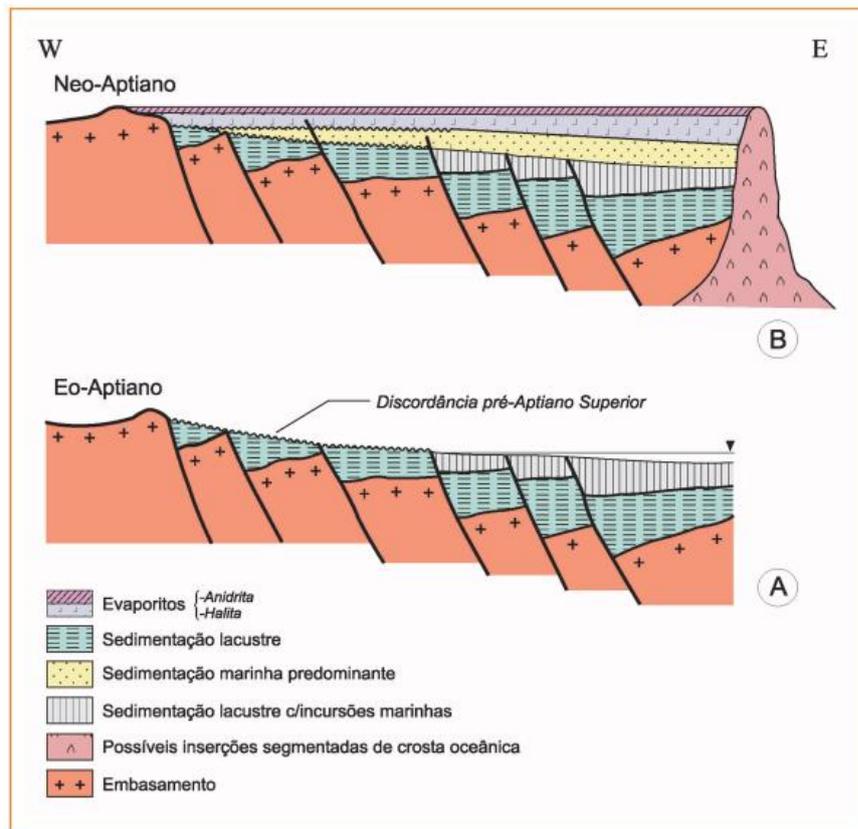


Figura 2.5 – Seções esquemáticas que mostram o deslocamento para leste do processo de *rifting* e a exposição das áreas proximais durante o eo-Aptiano (A), e o recobrimento da discordância pré-Aptiano superior pela sedimentação marinha durante o neo-Aptiano, em condições de quiescência tectónica (B) (Dias, 2005).

Segundo Moreira *et al.* (2007), a supersequência da fase *rift* (Fig. 2.6) estende-se desde o Hauteriviano ao Aptiano e subdivide-se em três sequências de sedimentos depositados durante a ruptura do Gondwana, representadas pelas **formações Camboriú, Piçarras e Itapema**. Esta fase está associada à propagação da ruptura das placas Sul-Americana e Africana, durante o início do Cretácico, uma vez que o *rift* no Atlântico Sul se propagou de S para N, controlado pela distribuição de tensões regionais. Na base ocorrem derrames basálticos correspondentes à Fm. Camboriú que contacta discordantemente com a Fm. Piçarras, o que marca o seu limite superior. A Fm. Piçarras é composta na porção proximal por conglomerados e arenitos de leques aluviais, enquanto que a porção distal é composta por arenitos, siltitos e argilitos de origem lacustre. O topo desta sucessão correspondente à fase *rift* é formada pela Fm. Itapema, que é composta, na sua porção proximal por conglomerados e arenitos associados a leques aluviais, enquanto que a porção distal é dominada por calcirruditos e argilitos negros (ricos em matéria orgânica).

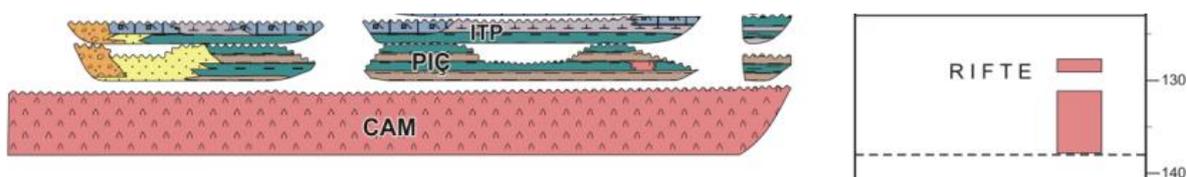


Figura 2.6 – Porção da supersequência da fase *rift*, do quadro estratigráfico da Bacia de Santos (adaptado de Moreira *et al.*, 2007).

Segundo Moreira *et al.* (2007), a supersequência da fase pós-*rift* (Fig. 2.7) foi durante o Aptiano, o correspondente ao andar Alagoas, e engloba as **formações Barra Velha e Ariri**, que terão sido depositadas num ambiente transicional (continental a marinho raso restrito), associado ao intervalo *sag*. Na base desta supersequência define-se a Fm. Barra Velha, que se subdivide em duas sequências. A mais antiga é composta por calcários (provavelmente de origem microbial, apesar de os indícios de actividade microbial nem sempre serem inequívocos), *grainstones* e *packstones* compostos por fragmentos de “estromatólitos”, e laminitos nas porções proximais, enquanto que nas porções distais é composta por argilitos. A sequência mais recente, datada do final do Aptiano, assentando discordantemente sobre um pacote datado do início do Aptiano, é composta maioritariamente por calcários, intercalados com argilitos, ocorrendo também na porção proximal leques aluviais de arenitos e conglomerados. Segundo Moreira *et al.* (2007), o limite inferior é marcado pela discordância pré-Alagoas, acima da qual se depositaram rochas típicas de ambientes de águas rasas ou mar restrito lagunar (Fm. Barra Velha), no entanto trabalhos mais recentes (*e.g.* Wright & Barnett, 2014, 2015, 2017; Tosca & Wright, 2015; Szatmari & Milani, 2016) defendem que estas formações carbonatadas se terão desenvolvido em ambiente deposicional não-marinho, fundamentalmente em lagos alcalinos e de salinidade variável. O limite superior é traduzido pela discordância que corresponde a um alto reflector sísmico, provocado pelo alto contraste de impedância acústica entre o topo destas rochas e a base do sal (Moreira *et al.*, 2007). No topo desta supersequência encontra-se a Fm. Ariri, constituída predominantemente por halite e anidrite, mas também por alguns sais solúveis (taquidrite, carnalite e silvinite). Esta sequência evaporítica é datada do final do Aptiano, e tem uma espessura de cerca de 2.000 m, podendo atingir mais de 3.000 m em alguns locais, tendo-se depositado num curto período de tempo (*e.g.* Chang *et al.*, 1988; Dias, 1998). O seu limite superior é marcado pelo contacto com os sedimentos siliciclásticos/carbonatados das formações Florianópolis e Guarujá.

O intervalo tipo *sag*, a que se associam estas formações reflecte um ambiente transicional de relativa quiescência tectónica e o início da subsidência térmica com ruptura definitiva da litosfera (Chang *et al.*, 2008), ou seja, esta fase de evolução das bacias

sedimentares seria pós-*rift* no sentido de que não haveria subsidência mecânica (tectónica), mas sim térmica. No entanto, nas bacias de margem passiva brasileiras dificilmente são encontrados registos sedimentares para este estágio de evolução sem que haja reactivação e/ou até mesmo inversões tectónicas de falhas, sendo talvez mais correcto associar estas formações à fase *sin-rift* (Milani *et al.*, 2007). Tendo em conta que este é um tema que suscita discussão, sendo também um assunto relativamente recente e que não faz parte do foco deste estudo, optou-se por não entrar em grandes detalhes, deixando apenas uma breve nota.

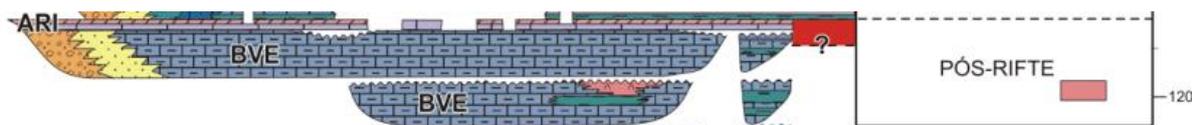


Figura 2.7 – Porção da supersequência pós-*rift*, do quadro estratigráfico da Bacia de Santos (adaptado de Moreira *et al.*, 2007).

Segundo Moreira *et al.* (2007), a supersequência da fase *drift* (Fig. 2.8), muito marcada pela subsidência térmica, começou a depositar-se no Albiano estendendo-se até à actualidade. Este intervalo corresponde essencialmente a sedimentos de origem marinha, correspondentes aos **Grupos Camburi (formações Florianópolis, Guarujá, Itanhaém)**, que representa uma fase transgressiva, **Frade (formações Santos, Juréia, Itajaí-Açu)**, que representa uma fase regressiva, e **Itamambuca (formações Ponta Aguda, Iguape, Marambaia)**. Relativamente à sedimentação albiana, na porção proximal, o Grupo Camburi é composto por sedimentos siliciclásticos e por carbonatos típicos de águas rasas, enquanto que na porção distal ocorrem margas e argilitos. No Cenomaniano ocorreu sedimentação siliciclástica na porção proximal, materializada por sedimentos deltaicos e aluviais, enquanto que na porção distal ocorreram argilitos e margas, e alguns turbiditos. O Grupo Frade depositou-se desde o Turoniano até ao fim do Maastrichtiano, e engloba a Fm. Santos, composta por conglomerados continentais, a Fm. Juréia, composta por arenitos de plataforma e costeiros, e a Fm. Itajaí-Açu que é composta por diamictitos, siltitos, argilitos e margas. O Grupo Itamambuca começou a depositar-se no Paleocénico, estendendo-se a deposição até à actualidade. Na porção proximal ocorrem arenitos de plataforma correspondentes à Fm. Ponta Aguda; mais próximo da quebra da plataforma ocorrem calcarenitos e calcirruditos correspondentes à Fm. Iguape; nas porções distais ocorrem diamictitos, siltitos, argilitos e margas da Fm. Marambaia, ocorrendo também alguns arenitos turbidíticos correspondentes ao Membro Maresias.

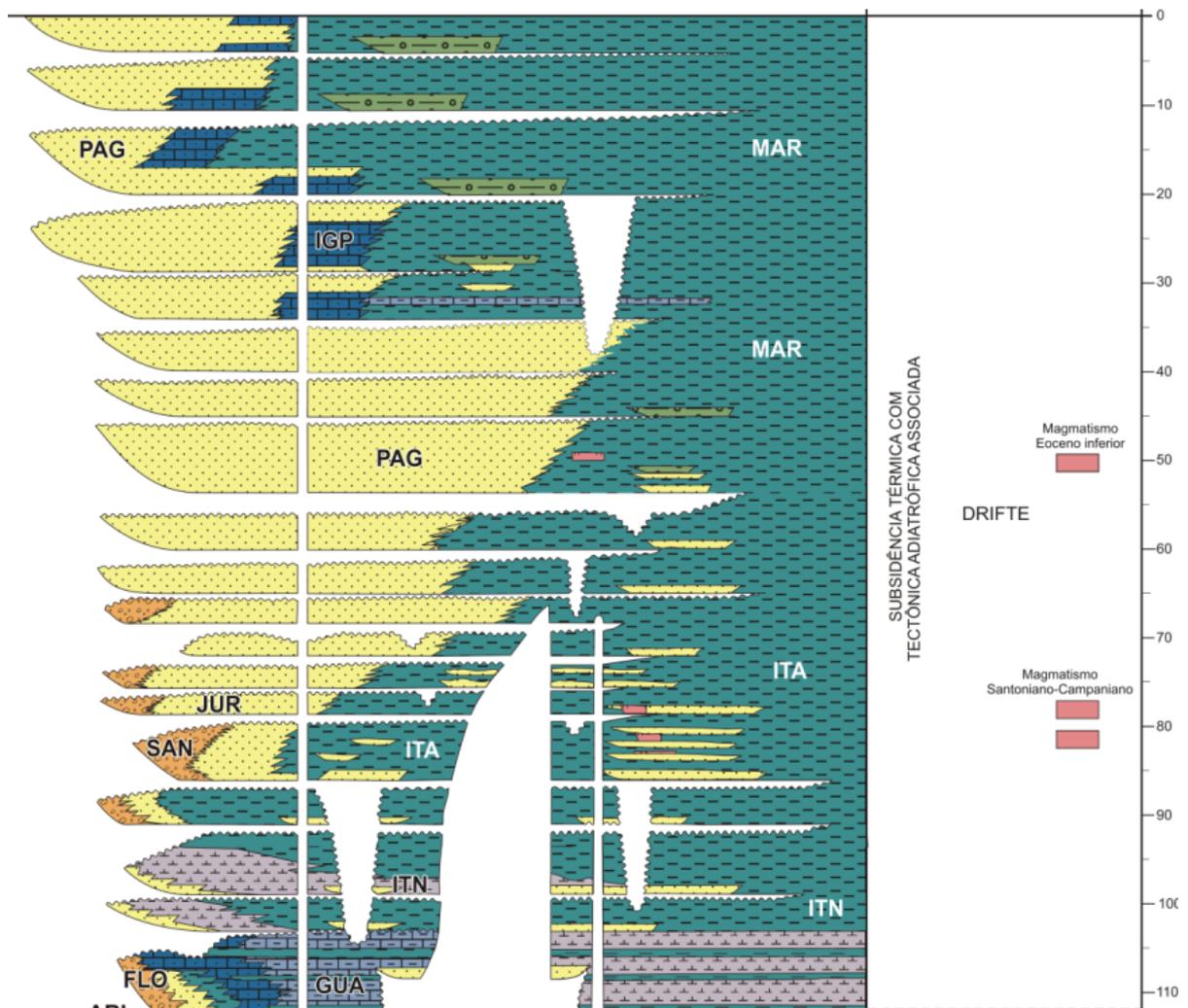


Figura 2.8 – Porção da superseqüência *drift*, do quadro estratigráfico da Bacia de Santos (adaptado de Moreira *et al.*, 2007).

3. CONCEITOS TEÓRICOS

3.1. Sedimentação carbonatada

As **rochas carbonatadas** são rochas sedimentares constituídas essencialmente por minerais carbonatados (dominantemente calcite e dolomite) de neoformação. A gênese destas rochas é essencialmente bioquímica, pois além de se formarem por precipitação química, têm também grande influência de macro e micro-organismos. Regra geral, a gênese de carbonatos ocorre significativamente em ambientes marinhos pouco profundos, ou costeiros, mas também em meios marinhos profundos, e em ambientes continentais áridos, tais como, bacias evaporíticas, lagos, podem ainda desenvolver-se como solos, ou até estarem associados a fontes termais, por precipitação de CaCO_3 (e.g. Gomes & Alves, 2007). Estas rochas constituem os maiores reservatórios petrolíferos do mundo (>60% das reservas mundiais).

Segundo Tucker & Wright (1990) a sedimentação carbonatada é controlada por diversos factores, dos quais se destacam a tectónica e o clima, isto porque estes têm grande influência/controlo sob os demais factores. A tectónica é responsável por controlar o perfil fisiográfico da plataforma e, portanto, a configuração deposicional da sedimentação carbonatada. Em conjunto com o clima, controla a batimetria e os padrões de circulação marinha, resultando em impactos ao nível da temperatura, salinidade e alcalinidade da água, determinando a natureza e eficácia da fábrica de carbonatos e o desenvolvimento de diferentes plataformas carbonatadas.

De acordo com diversos autores (e.g. Choquette & Pray, 1970; Kupecz *et al.*, 1997; Moore, 2001; Flügel, 2004; Schlager, 2005; Gomes & Alves, 2007; Ahr 2008; Azerêdo, 2016), as rochas carbonatadas são bastante diferentes das siliciclásticas, apresentando aspectos específicos e uma complexidade muito maior (resultam de processos deposicionais e diagenéticos complexos). Regra geral, as rochas carbonatadas formam-se no local de deposição ou perto deste, não sendo produtos de origem distante que sofreram longo transporte, como ocorre com as rochas siliciclásticas. Para além disso, os carbonatos são produto de processos físicos complexos, dificilmente modeláveis, e que apresentam determinante influência biológica. O potencial para a geração de porosidade secundária variou ao longo da Geoistória, em função da mineralogia e biogeoquímica dos organismos com partes mineralizadas carbonatadas.

3.2. Carbonatos lacustres

Os grandes sistemas de lagos, tal como o desenvolvido na BS, são, regra geral, de origem tectónica. Segundo Flügel (2004), os ambientes lacustres diferem dos ambientes marinhos relativamente às suas propriedades, dinâmica, química e produtividade das águas do lago, bem como nos padrões de sedimentação originados em lagos abertos e em lagos fechados. Do ponto de vista hidrológico, os lagos podem ser classificados como abertos ou fechados. Nos lagos abertos, ocorrem influxos da drenagem dos rios, bem como da precipitação, estando em permanente equilíbrio com a evaporação e saída de água para o mar. Os lagos fechados, não apresentam fluxos de saída regulares, ou seja, o equilíbrio depende apenas da evaporação. Com o tempo, os lagos podem mudar as suas restrições à circulação, passando de abertos a fechados (ou vice-versa), e podem também alterar o seu perfil, com variações no declive (Tucker & Wright, 1990).

Associado ao sistema de *rift* desenvolvido aquando do início da abertura do Atlântico Sul, formaram-se vales e depressões que em conjunto com outras feições estruturais da bacia, também controladas pela configuração tectónica, influenciam o perfil do lago. A tectónica juntamente com o clima, são os principais responsáveis por controlar o sistema deposicional carbonatado lacustre, manifestando-se através de processos físicos, químicos e biológicos. Segundo Tucker & Wright (1990), neste sistema, por exemplo, a movimentação das massas de água é controlada principalmente pelo vento (processo físico). No que respeita aos processos químicos estes podem favorecer ou não a precipitação de carbonato de cálcio, controlada pela temperatura e/ou pela remoção de CO₂ da água (muito importante, e favorecida pela actividade biogénica), e podem também favorecer ou não a deposição evaporítica (regra geral, em lagos fechados), importante nas relações de salinidade/alcalinidade do lago. Os processos biológicos também têm um grande impacto na sedimentação carbonatada em ambientes lacustres, através da precipitação biogénica de carbonatos, mas também induzindo a precipitação inorgânica de carbonato.

Os lagos são sistemas dinâmicos, e mudanças de curto-termo ou longo-termo no clima, química da água e batimetria dos lagos, resultam em variações significantes da lito e biofácies, e no seu padrão de distribuição vertical e lateral Flügel (2004).

3.3. Reservatórios carbonatados

No contexto das Geociências do petróleo, um **reservatório** corresponde a um corpo rochoso, poroso e permeável, com potencial para reter hidrocarbonetos, funcionam, portanto,

como rochas de armazenamento. Ou seja, após a geração e migração dos hidrocarbonetos da rocha geradora, estes são posteriormente concentrados numa rocha reservatório quando ocorrem condições propícias à sua retenção devido à presença de uma armadilha/selo.

A BS tem um conjunto diversificado de rochas reservatório, como os carbonatos oolíticos de águas rasas da Fm. Guarujá, os arenitos turbidíticos eocénicos da Fm. Marambaia e Membro Ilha Bela, da Fm. Itajaí-Açu (Chang *et al.*, 2008). Para além destas unidades, incluem-se também os carbonatos das formações Itapema e Barra Velha, que constituem os principais reservatórios da secção PS.

A porosidade e permeabilidade presente nas rochas reservatório está directamente associada aos processos deposicionais e posterior diagénese sofrida pelas rochas (Ahr, 2008). Regra geral, todas as rochas carbonatadas que apresentem boas condições de porosidade e permeabilidade são consideradas bons reservatórios.

As rochas carbonatadas apresentam uma variada gama de fácies deposicionais podendo constituir meios porosos de elevada complexidade. Ao contrário dos reservatórios siliciclásticos, que são tipicamente sistemas de porosidade singular, normalmente do tipo interpartícula e de natureza relativamente uniforme (homogénea), os reservatórios carbonatados apresentam frequentemente sistemas de porosidade múltipla que acentuam as heterogeneidades petrofísicas dos reservatórios (*e.g.* Choquette & Pray, 1970; Lucia, 1995; Kupecz *et al.*, 1997; Moore, 2001; Flügel, 2004; Mazzullo, 2004; Schlager, 2005; Gomes & Alves, 2007). Os reservatórios carbonatados apresentam maior diversidade na textura, composição das partículas e, sobretudo, nos processos e efeitos diagenéticos, bem como na variabilidade de pequena escala de todas as propriedades.

3.4. Propriedades importantes das rochas no estudo de reservatórios

As propriedades das rochas mais importantes num reservatório de hidrocarbonetos são a **porosidade** e a **permeabilidade**, as quais dependem fundamentalmente da textura, mineralogia, composição e *fabric* da rocha (Ahr, 2008).

As características de um reservatório dependem da presença de poros no interior da rocha, do seu arranjo espacial, e da forma como estão interconectados por “pontes”, constituindo zonas de estrangulamento ou “gargantas” formando canais mais ou menos tortuosos. O tamanho destes canais, por onde vai ocorrer, preferencialmente, a percolação de fluidos, depende do tamanho e forma dos grãos e cristais. O tamanho, forma, arranjo e distribuição dos canais de poros têm grande impacto na produtividade e eficiência de

recuperação de hidrocarbonetos de uma rocha reservatório, devendo por isso ser incluídos na diferenciação do tipo de porosidade (Wardlaw & Cassan, 1978; Kopaska-Merkel, 1994 – *apud* Flügel, 2004) (Fig. 3.1).

Segundo diversos autores (*e.g.* Choquette & Pray, 1970; Tucker & Wright, 1990; Kupecz *et al.*, 1997; Moore, 2001; Flügel, 2004; Ahr, 2008), e utilizando a síntese de Azerêdo (2016), **porosidade (Φ)** define a capacidade de armazenamento de fluidos pela rocha, correspondendo ao volume de vazios existentes por unidade de volume de rocha, ou seja, o parâmetro que indica a quantidade de espaços vazios num determinado volume de rocha, podendo estes poros estar ou não interconectados entre si. Dentro do conceito de porosidade este pode ter diferentes significados, tais como, porosidade absoluta que é a razão entre o volume de todos os poros existentes nos interstícios da rocha, estando estes conectados ou não entre si, e o volume da rocha; porosidade efectiva que corresponde à fracção da porosidade total que está interconectada, isto é, que permite o fluxo de fluidos e é capaz de transmitir fluido; porosidade residual que corresponde aos poros não conectados entre si e/ou isoldados na rocha.

A análise da porosidade é fundamental na caracterização de reservatórios, no entanto é uma tarefa mais complexa e heterogénea quando se tratam de rochas carbonatadas, comparando com as siliciclásticas. A porosidade é controlada pelas fácies deposicionais, isto é, pela composição/textura primárias dos sedimentos e pela sua evolução precoce condicionada pelos próprios ambientes deposicionais e, posteriormente, pelos processos diagenéticos. No primeiro caso, a distribuição das características da porosidade e das características das fácies apresentam correspondência e são coincidentemente mapeáveis, enquanto que na diagénese (desde processos quase sin-deposicionais a, sobretudo, pós-deposicionais) não existe correlação entre a distribuição das características da porosidade e das características das fácies, ou existindo esta é apenas parcial. A porosidade pode ser primária ou secundária: a primária forma-se durante o estágio pré-deposicional (*e.g.* poros intrapartícula em foraminíferos, corais ou oóides) e durante o estágio deposicional, porosidade deposicional (*e.g.* porosidade interpartícula, porosidade de crescimento), já a porosidade secundária é formada durante a diagénese e em qualquer altura depois da deposição (Flügel, 2004) (Fig. 3.1).

Seleção por fabric		Sem seleção por fabric		
Primária		Interpartícula	BP	
		Intrapartícula	WP	
		Fenestrae	FE	
		Abrigo	SH	
		Trama de crescimento	GF	
Secundária		Intercristalina	BC	
		Mórdica	MO	
			Fratura	FR
			Canal*	CH
			Vuggy*	VUG
			Cavernosa*	CV
* O termo CV aplica-se a poros de grandes dimensões do tipo CH ou VUG				
Com ou sem seleção por fabric				
Brecha	Perfuração	Cavada	Dessecação	
BR	BO	BU	SK	

Figura 3.1 – Classificação da porosidade segundo Choquette & Pray (1970) (baseado em Moore, 2001).

A **permeabilidade** determina a capacidade de um fluido passar pelos poros de uma rocha, sendo medida como a velocidade a que o fluido passa através do sedimento ou da rocha. Esta é calculada pela Lei de Darcy e normalmente expressa em *milidarcy*. Está fortemente relacionada com o tamanho e a forma das “gargantas” de poros, mas também com a área de superfície específica dentro do espaço do poro (Etris *et al.*, 1988 – *apud* Flügel, 2004). O tamanho da “garganta” do poro é inversamente proporcional à pressão capilar (Wardlaw & McKellar, 1981; Kopaska-Merkel & Friedman, 1988 – *apud* Flügel, 2004). Os caudais dependem fortemente da distribuição dos poros, isto é, poros interpartícula e intercristais devem propiciar maior permeabilidade do que poros do tipo molde ou intrapartícula. A geometria dos poros, especialmente o tamanho e a forma das interconecções entre poros adjacentes, corresponde ao principal condicionante da permeabilidade. Esta diminui durante a diagénesis devido à compactação e cimentação (Flügel, 2004). A permeabilidade tem um papel bastante importante nos reservatórios carbonatos, pois indica a capacidade que a rocha reservatório tem para transmitir fluidos, tanto dentro do reservatório como ao longo do canal de migração com o qual conecta com a rocha geradora.

3.5. Diagéne

Os sedimentos logo após a sua deposição sofrem um conjunto de processos que os modificam e, de forma progressiva, os transformam em rocha compacta. A **diagéne** abrange todas essas modificações e transformações sofridas logo após o soterramento até ao início do metamorfismo incipiente. O conjunto de processos diagenéticos podem ocorrer, ou não, de forma independente, resultando num aumento e/ou redução da porosidade primária das rochas (Ahr, 2008).

No entanto, a diagéne depende de alguns factores (intrínsecos e extrínsecos) que determinam quais os processos diagenéticos actuantes, e qual a sua duração, distribuição e intensidade de acção, são estes:

- ❖ **Factores intrínsecos**, estão associados à composição mineralógica original, textura, porosidade, permeabilidade, composição química do fluido intersticial deposicional primário, conteúdo em argila e tipo de matéria orgânica presente.

- ❖ **Factores extrínsecos**, correspondem à pressão (litostática, hidrostática e dos poros) que é determinante para o movimento dos fluidos numa bacia; temperatura que funciona, frequentemente, como catalisador de reacções que ocorrem durante a evolução diagenética da rocha; fluidos intersticiais, que devido ao seu quimismo e quantidade/fluxo vão ter um papel preponderante na diagéne.

Segundo Flügel (2004), o tempo envolvido na formação de porosidade secundária (diagéne) pode ser bastante extenso, distinguindo-se 3 estágios de evolução distintos, inicialmente definidos, por Choquette & Pray (1970): eodiagéne, mesodiagéne e telodiagéne (Fig. 3.2).

- ❖ **Eodiagéne**, ocorre perto da superfície, nesta fase com os processos diagenéticos a actuarem durante um intervalo de tempo relativamente curto, entre a deposição dos sedimentos e a sua litificação dentro da zona de processos relacionados com a superfície e de migração de fluidos superficiais. O limite superior desta zona corresponde à interface subaérea ou subaquática, enquanto que o limite inferior é marcado pelo local onde a água meteórica vadosa ou a água marinha cessam a sua circulação por gravitação ou convecção. Aqui, os sedimentos são mineralogicamente instáveis, e a sua porosidade é modificada por dissolução, cimentação e dolomitização. Ambientes diagenéticos activos dentro da zona

eogenética compreendem o meteórico vadoso, a zona meteórico-freática e a zona de mistura. A porosidade na zona eogenética é normalmente moderada a alta.

- ❖ **Mesodiagéne**se, corresponde ao soterramento progressivo superficial a profundo e às modificações e transformações ocorridas nesse período, ou seja, devido aos processos diagenéticos que actuam durante o soterramento, longe da zona de maior influência dos processos relacionados com a superfície. Esta zona é caracterizada por taxas inferiores na modificação da porosidade, no entanto ocorre frequentemente destruição bastante significativa da porosidade devido à compactação e aos processos com esta relacionados. A zona mesogenética corresponde, de modo grosseiro, ao ambiente diagenético de soterramento.

- ❖ **Telodiagéne**se, ocorre quando as rochas que se encontravam soterradas há tempo suficiente para estarem estáveis nessas condições, são trazidas para a superfície ou para zonas próximas dela, devido a processos de soerguimento, passando a ser afectadas por processos associados às condições superficiais. Rochas carbonatadas soterradas em profundidade e posteriormente exumadas são significativamente influenciadas por processos de dissolução e precipitação, frequentemente em associação com a formação de desconformidades (descontinuidades nas sequências estratigráficas), como pode ser visto nos sistemas paleocársicos. A carsificação modifica a porosidade e produz poros por dissolução variando em tamanho, desde espaços vazios pequenos a cavernas bastante largas.

Durante a sua história geológica, as rochas carbonatadas podem ser afectadas diversas vezes por processos mesodiagenéticos e telodiagenéticos causando modificação, destruição e renovação de construção da porosidade secundária.

Através do estudo da diagénese é possível ordenar os processos diagenéticos que actuaram ao longo do tempo, durante a evolução pós-deposicional da rocha, estabelecendo a sua cronologia relativa. Este estudo permite também identificar e avaliar a sua importância na preservação, geração ou recriação da porosidade e da permeabilidade.

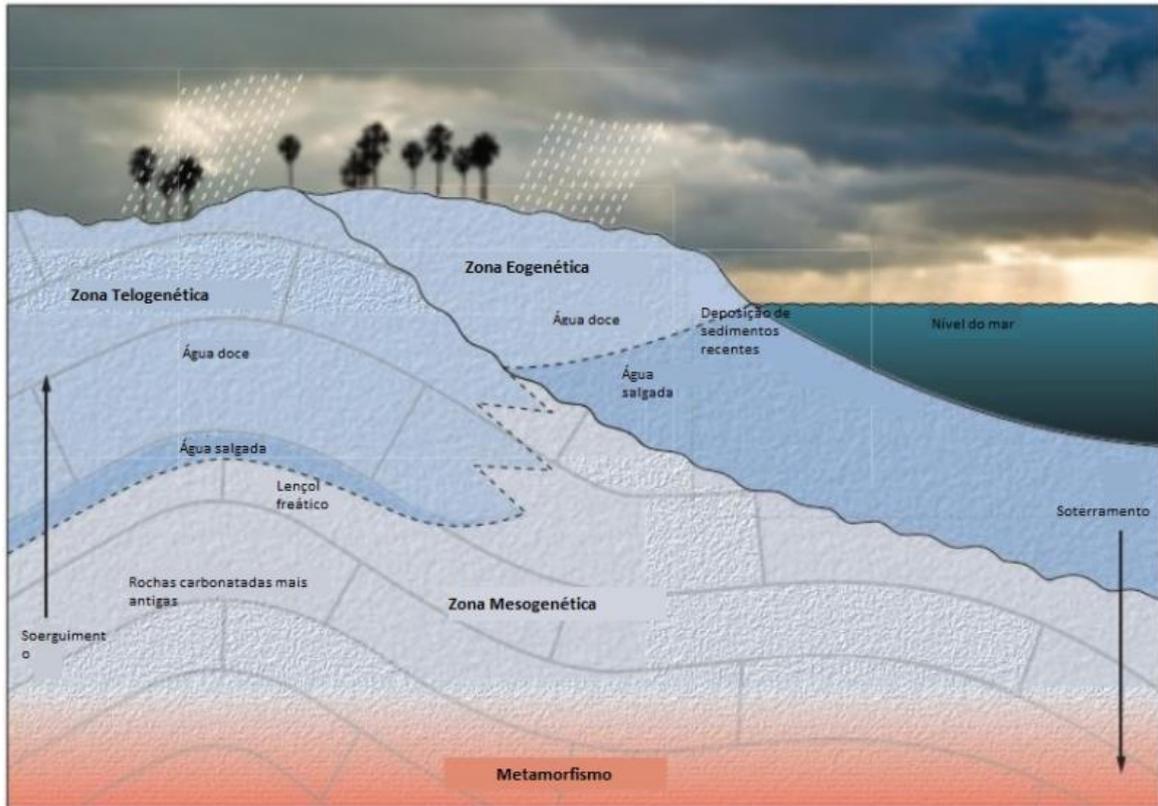


Figura 3.2 – Zonas diagenéticas (baseado em Ali *et al.*, 2010).

3.6. Processos Diagenéticos

Segundo diversos autores (*e.g.* Choquette & Pray, 1970; Tucker & Wright, 1990; Azerêdo, 1993; Kupecz *et al.*, 1997; Moore, 2001; Flügel, 2004; Ahr, 2008), os principais **processos diagenéticos** que actuam nas rochas carbonatadas, são:

- ❖ **Cimentação**, corresponde ao preenchimento sucessivo (litificação e colmatação) do espaço poroso existente na rocha, através da precipitação de minerais em poros primários ou secundários; esta precipitação requer a sobressaturação dos fluidos presentes nos poros, em relação ao mineral precipitado, e será tanto mais eficaz quanto maior for a sobressaturação, ou seja, nem sempre os espaços porosos são colmatados por completo; os cimentos podem ter várias origens, podendo ser cimentos meteóricos a marinhos (ambos, vadosos ou freáticos), para além de cimentos de soterramento; a cimentação influencia outros processos diagenéticos. Por exemplo, a ocorrência de cimentação precoce pervasiva inibe a compactação, contrariamente, a existência de pouco cimento inicial facilita os processos de compactação.

- ❖ **Neomorfismo/Recristalização**, é um processo comum nas rochas carbonatadas, considerado diferencial e localizado, ocorre com diferentes intensidades, podendo conduzir à diminuição de porosidade; ocorre quando dois minerais com a mesma composição química, mas cristalograficamente diferentes se substituem um ao outro, através de mecanismos de dissolução/re-precipitação; resulta numa mudança de textura, enquanto que a mineralogia pode, ou não, manter-se a mesma; o termo recristalização é mais restrito, e utiliza-se quando apenas existem mudanças de tamanho, forma e orientação do cristal, sem que ocorra modificação mineralógica.

- ❖ **Dissolução**, ocorre quando nos poros da rocha há presença e/ou passagem de fluidos subsaturados (em carbonato), levando à dissolução das partículas e/ou cimentos carbonatados; este processo é tanto mais eficaz, quanto maior for a subsaturação desses fluidos, em carbonatos, conduzindo à formação de porosidade secundária e aumento da porosidade inicial existente na rocha; a eficácia deste processo também é maior em ambientes meteóricos pouco profundos (contacto com águas meteóricas, salinas, ou de zonas de mistura), ambientes de soterramento (aumento da solubilidade nos contactos entre as partículas, devido ao aumento da profundidade e da pressão), e em zonas profundas do oceano onde as águas frias são subsaturadas em carbonatos; frequentemente este processo gera porosidade do tipo móldica, canalizada, vacuolar e cavernosa.

- ❖ **Compactação**, é um processo que pode ser mecânico ou químico; a compactação mecânica resulta na redução de volume através de processos físicos durante o soterramento, até determinados níveis de compressão; este processo pode conduzir ao aumento da tortuosidade dos canais porosos, aumentando também o número de estrangulamentos nesse canal; regra geral, resulta na redução tanto da porosidade como da permeabilidade das rochas; as principais evidências da sua ocorrência são a orientação, rotação, deslizamento e deformação das partículas, contactos lineares e pontuais entre partículas, presença de fragmentos fracturados e/ou comprimidos contra outros, envelopes micríticos fracturados ou deslocados, fracturação primária intra e interpartículas; a compactação química caracteriza-se pela redução acentuada do volume da rocha, controlada total ou parcialmente por processos de dissolução associados ao incremento da pressão litostática durante o soterramento,

ocorrendo, regra geral, sob condições de soterramento profundo; a principal evidência deste processo de compactação é o desenvolvimento de estruturas de dissolução sob pressão (estilólitos).

❖ **Dolomitização**, corresponde à substituição de calcite por dolomite, ou seja, um calcário e/ou o seu sedimento precursor são completa ou parcialmente substituídos por dolomite; a ocorrência de dolomite obriga à existência de uma fonte de Mg no sistema; a presença de dolomite nas rochas carbonatadas pode significar a substituição directa de calcite por dolomite, ou pode também ocorrer sob a forma de cimento dolomítico; a dolomitização pode ocorrer nas zonas mais superficiais ou em zonas profundas de soterramento; resulta, muitas vezes, em texturas “fantasmas” quando a dolomitização é pervasiva, deixando apenas perceptível no sedimento inicial que foi dolomitizado, a forma de alguns elementos aloquímicos (*e.g.* pelóides), que resistem a este processo, sendo apenas parcialmente substituídos.

❖ **Desdolomitização**, corresponde ao processo inverso à dolomitização, ou seja, substituição diagenética de dolomite por calcite; resulta, muitas vezes, na calcitização de romboedros de dolomite, ou seja, os cristais romboédricos dolomíticos passam a ser de natureza calcítica; regra geral, ocorre sob influência de águas meteóricas (com acção oxidante) e águas intersticiais de diferentes composições, em zonas próximas da superfície, no entanto pode ocorrer nos diferentes estágios diagenéticos, desde o mais precoce ao mais tardio de soterramento; afecta carbonatos marinhos, lacustres e terrestres e ocorre em ambientes diagenéticos meteóricos, e diagenéticos profundos; resulta na formação de porosidade secundária.

Note-se que combinações de vários factores podem criar diversas situações destas.

A qualidade dos reservatórios é muito variável em função da relação diferencial fácies original – efeitos diagenéticos.

Segundo Ahr (2008), os reservatórios carbonatados podem ser classificados como (Fig. 3.3): reservatórios carbonatados deposicionais; reservatórios diagenéticos; reservatórios carbonatados fracturados.



Figura 3.3 – Classificação genética para a porosidade nas rochas carbonatadas (baseado em Ahr, 2008).

3.7. Ambientes Diagenéticos

Segundo vários autores (*e.g.* Choquette & Pray, 1970; Tucker & Wright, 1990; Jordan & Wilson, 1994; Kupecz *et al.*, 1997; Moore, 2001; Ahr, 2008) e utilizando a síntese de Flügel (2004), a diagénese pode ocorrer em diversos ambientes (**ambientes diagenéticos**) (Fig. 3.4), que correspondem às zonas superficiais ou sub-superficiais afectadas por processos diagenéticos específicos e tipificados por um conjunto de critérios característicos que podem ser estudados por diferentes métodos. Os ambientes tipo são:

- ❖ **Meteórico vadoso**, que se situa acima do lençol freático, entre a superfície e a zona meteórico freática, sendo os poros nesta zona preenchidos por água doce e/ou ar. Os processos que ocorrem nesta zona podem ser subdivididos em duas zonas críticas, a zona de dissolução em que ocorre dissolução extensiva, com a remoção de aragonite e formação de *vugs*, e a zona de precipitação (próxima da superfície), onde ocorre cimentação, ainda que com pequena expressão.
- ❖ **Marinho vadoso**, que se situa acima do lençol freático, entre a superfície e a zona marinho freática, sendo os poros nesta zona preenchidos por água e/ou ar. Ocorre precipitação de aragonite e sedimentação de dolomite em *vugs*, dolomitização e formação de chertes, mas também ocorrem processos de dissolução. Note-se que a cimentação nesta zona é mais rápida do que na zona meteórica vadosa.

- ❖ **Meteórico freático**, que se situa abaixo do lençol freático e pode estender-se até algumas centenas de metros de profundidade e em que os poros estão preenchidos essencialmente por água doce. Os processos ocorrem na zona de dissolução, com a dissolução a originar porosidade do tipo *vug* e móldica. Na zona activa (parte superior do ambiente meteórico freático), ocorre dissolução de aragonite e calcite magnesiânica, cimentação rápida e diversificada, precipitação de calcite, criação de porosidade do tipo móldica e *vug*. Na zona estagnada (parte mais profunda do ambiente meteórico freático, e também em climas áridos), ocorre pouca cimentação, e há estabilização da aragonite e da calcite magnesiânica.

- ❖ **Marinho freático** (pouco profundo), que se situa em águas marinhas rasas, de fundo marinho ou exactamente abaixo destas, onde os poros se encontram preenchidos com água marinha. Em ambientes de águas menos profundas, estas encontram-se sobressaturadas em carbonatos, existindo rápida cimentação de aragonite e calcite magnesiânica, com cimentos de diversos tipos. Em ambientes de águas profundas e frias, estas estão normalmente subsaturadas em carbonatos, ocorrendo forte dissolução de aragonite e calcite em dois níveis de dissolução distintos.

- ❖ **De soterramento** (soterramento superficial e profundo), que se situa abaixo da sub-superfície onde os processos da superfície deixam de ter grande influência e estende-se até ao limite do baixo grau de metamorfismo. Os poros encontram-se preenchidos por salmouras de salinidade variada, desde salobras a alta salinidade. Desde o soterramento superficial ao profundo ocorrem processos de compactação física e química (dissolução sob pressão), cimentação, redução de porosidade, corrosão em profundidade e recriação de porosidade.



Figura 3.4 – Ambientes diagenéticos e os seus limites (baseado em Flügel, 2004).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo que aqui se apresenta foi desenvolvido seguindo um conjunto de etapas, as quais serão enumeradas em seguida.

- 1) A primeira etapa passou pela pesquisa e consulta bibliográfica relevante sobre bacias sedimentares da margem brasileira e a temática do PS, e aprofundamento de conhecimentos sobre rochas carbonatadas, em geral. Para além da análise de alguns relatórios acerca dos poços em foco.
- 2) A aquisição de dados foi a segunda etapa, e foi feita em diversas visitas ao CENPES/Petrobras para observação, descrição e registo iconográfico do material disponibilizado dos poços 1 e 2, tal como acordado. Nota para o facto de os dados utilizados no presente estudo terem carácter confidencial, portanto a localização exacta foi omitida, e os nomes dos poços alterados. Os materiais utilizados nesta segunda etapa foram dois testemunhos recuperados no poço 1 e poço 2, respectivamente, o testemunho 1 (topo: 5311m; base: 5325m; extensão vertical do testemunho: 14m; recuperado: 85%; total: 11,91m), e o testemunho 2 (topo: 5405m; base: 5441m; extensão vertical do testemunho: 36m; recuperado: 97%; total: 35,53m). Para além destes testemunhos estavam também disponíveis e foram analisadas, amostras laterais (127 relativas ao poço 1; 101 relativas ao poço 2), *plugs* (39 relativos ao testemunho 1; 143 relativos ao testemunho 2) e cerca de 140 lâminas delgadas no conjunto dos dois testemunhos. Para a aquisição dos dados utilizou-se um microscópio óptico com câmara fotográfica incorporada, o *software Axio Vision* para tratamento das fotos, um lupa binocular, uma lupa de mão e ácido (HCl 10%).

Nas observações e descrições *in loco*, geralmente, quando se fazem estudos deste tipo, que envolvem a análise petrográfica de rochas sedimentares carbonatadas utiliza-se a terminologia de Dunham (1962) (Fig. 4.1) para descrição das fácies; no entanto nestas fácies tão particulares do PS esta classificação nem sempre tem aplicabilidade. Terra *et al.* (2010) basearam-se nas classificações de Dunham (1962) (Fig. 4.1) e Embry & Klován (1971) (Fig. 4.2), adaptando-as e elaboraram um quadro de classificações mais ajustadas aos litótipos encontrados, frequentemente, nas bacias sedimentares brasileiras. Neste estudo optou-se pela utilização de uma nova classificação de fácies (caracterização e designação)

elaborada por Azerêdo *et al.* (2011b) para outros sectores do PS, apresentada no quadro de fácies (Fig. 4.3), que incorpora apenas parcialmente a terminologia de Dunham. Esta classificação permitiu diferenciar, tipificar e caracterizar em detalhe as fácies encontradas nos testemunhos agora estudados, com algumas alterações/actualizações relativamente à classificação base; são estas as tipologias de fácies que se utilizam no presente estudo, com a definição/redefinição explicitada. Relativamente à classificação da porosidade, optou-se por utilizar uma adaptação da classificação semi-quantitativa da porosidade de Ahr (2008), com os seguintes valores: nula/baixa (0-5%); moderada (>5-10%); boa (>10-15%); excelente/elevada (>15%).

Na primeira visita ao CENPES, e antes de se proceder ao estudo petrográfico, foram analisadas uma secção geológica e uma linha sísmica já interpretadas por uma equipa de especialistas da Petrogal, de forma a posicionar os poços num contexto geológico. Para além disso, analisaram-se os perfis petrofísicos (*logs* de imagem) disponibilizados, tentando-se fazer uma associação entre estes e os testemunhos, de forma a localizar possíveis zonas de maior interesse, definindo assim *a priori* os alvos iniciais.

TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					Textura deposicional não-reconhecível
Componentes originais não-ligados durante a deposição				Componentes originais ligados durante a deposição	
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)			Sem matriz, grão-suportado		
Suportado pela matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz			
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos				
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Boundstone</i>	<i>Crystalline</i>
					

Figura 4.1 – Classificação textural de rochas carbonatadas segundo Dunham, 1962 (*in* Terra *et al.*, 2010).

CALCÁRIOS ALÓCTONES					CALCÁRIOS AUTÓCTONES				
Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição (<10% grão >2 mm)				Textura deposicional não-reconhecível	Componentes originais não-ligados organicamente durante a deposição		Componentes originais ligados organicamente durante a deposição		
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)					>10% grãos >2 mm		Organismos que atuam como obstáculos	Organismos que encrustam e ligam	Organismos que constroem um arcabouço rígido
Suportado por matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz	Sem matriz, grão-suportado		Suportado pela matriz	Suportado por componentes maiores que 2 mm			
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos								
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Crystalline</i>	<i>Floatstone</i>	<i>Rudstone</i>	<i>Bafflestone</i>	<i>Bindstone</i>	<i>Framestone</i>
									

Figura 4.2 – Classificação textural de rochas carbonatadas, largamente utilizada em áreas de ocorrência de calcários bioconstruídos, segundo Embry & Klovan, 1971 (in Terra *et al.*, 2010).

Fácies	Descrição sucinta
F1	Calcário/calcário argiloso com textura laminar pouco marcada; pode incluir laminações microbianas finas, mas predominam laminações sedimentares.
F2A	Estromatolítica mais típica, francamente laminar (podendo incluir leitos grumosos/micropelóidicos).
F2B	Colunar/Arborescente (podendo incluir grumos ou esferulitos intersticiais).
F2D	Domas (basicamente semelhante a F2A em que é reconhecível morfologia em doma, por vezes com grumos).
F3	<i>Grainstones/packstones</i> (e mais raramente <i>rudstones</i>) intraclásticos, cujos clastos são predominantemente de calcário microbiano retrabalhado.
F4	Esferulítica nítida, isto é, em que os elementos figurados são exclusiva ou essencialmente esferulitos.
F5	<i>Grainstones e packstones</i> (sobretudo), mais raramente <i>rudstones/floatstones</i> , com intraclastos diversos; clastos frequentemente escuros, alguns <i>esverdeados e máficos(?)</i> ; <i>aspecto textural nitidamente mais clástico</i> .

Figura 4.3 – Classificação de fácies para o PS brasileiro (Azerêdo *et al.*, 2011b).

Esta análise começou pelo perfil de *Gamma Ray*, que permite inferir sobre a possível ocorrência de fase siliciclástica, mais concretamente a presença de fracção argilosa e/ou matéria orgânica, tendo este método por base a radioactividade total, dependente da ocorrência de minerais ricos em Urânio (em ppm), Tório (em ppm) e Potássio (em %).

Nestas sessões laboratoriais efectou-se a análise macroscópica detalhada da totalidade dos testemunhos disponíveis, com registo em fichas previamente concebidas e preparadas para o efeito (baseadas num modelo concebido no âmbito do Projecto DEDPCR, fornecido pela Petrogal, e apenas com ligeiras alterações relativamente à versão anterior); a observação dos testemunhos foi acompanhada e complementada com observação de amostras laterais e de *plugs*, e observações pontuais de microscala (lâmina delgada), o que permitiu a identificação e caracterização das fácies, e também uma primeira abordagem relativamente a eventuais tendências de associações de fácies e possíveis padrões de ciclicidade, apontaram-se particularidade petrográficas e alguns eventos singulares. Procedeu-se também a uma primeira análise diagenética, tendo-se identificado os principais processos reconhecíveis à macro/mesocscala e alguns dos seus produtos/efeitos nas diferentes fácies. Posteriormente, fez-se de forma sistemática o estudo petrográfico de todas as lâminas delgadas disponíveis relativas aos dois testemunhos e respectivo registo fotográfico específico.

- 3) A terceira etapa inicia o tratamento dos dados recolhidos no CENPES, com a elaboração, recorrendo a *software* de desenho gráfico e ilustração (*CoreIDRAW*), das fichas descritivas para os testemunhos 1 e 2, com os diversos elementos de análise (fácies, processos diagenéticos, textura, porosidade, tipo de porosidade, ocorrências de óleo e outros aspectos relevantes), contendo em paralelo fotografias dos testemunhos (não disponibilizadas nesta dissertação) e tendo-se também inserido fotografias de lâminas delgadas em intervalos pertinentes. Estas fichas resultaram da transposição e maturação da informação recolhida no CENPES para documentos/ficheiros específicos, detalhando os aspectos descritivos e aplicando um código gráfico (cores, siglas) com vista a realçar visualmente os aspectos mais significativos e a facilitar a definição de padrões deposicionais, diagenéticos, de caracterização de porosidade, etc. As fichas foram elaboradas caixa a caixa, perfazendo um total de 53 caixas (14 correspondentes ao testemunho 1; 39

correspondentes ao testemunho 2). Os resultados do processo de caracterização de alta resolução encontram-se ilustrados, caixa a caixa, nos Anexos (I.2 a I.54), apresentando-se também os *logs* correspondentes a cada testemunho nos Anexos (I.55 a I.58).

A descrição mais pormenorizada das notas expeditas resultantes da observação directa anteriormente referida, consistiu na caracterização/individualização das fácies (definição, critérios de diferenciação, exemplos-padrão), numa abordagem complementar focada no reconhecimento e interpretação da variabilidade de fácies e das associações faciológicas preferenciais, mas também dos eventuais padrões evolutivos (transições entre fácies, ciclos) e na análise diagenética detalhada (reconhecimento dos processos, grau de desenvolvimento, apreciação do impacto nas diferentes fácies e controlo destas sobre a intensidade dos processos, cronologia, exemplos-padrão), bem como a estimativa da componente argilosa ao longo dos testemunhos. Isto proporcionou um nível de detalhe muito específico, tendo-se sentido a necessidade de apresentar uma síntese descritiva em conjuntos de 5 caixas para cada um dos testemunhos, de forma a facilitar a leitura e interpretação dos resultados, não tendo isso um verdadeiro significado de afinidade sedimentológica, ou dos processos existentes; quando necessário é feita nota de destaque para aspectos particulares a salientar em cada grupo de 5 caixas.

- 4) Interpretação dos resultados obtidos, definição de alguns “produtos-síntese” (*e.g.* proporções relativas estimadas das fácies; frequência de ocorrência e intensidade dos processos diagenéticos e da argilosidade; tipos de porosidade mais comuns e a sua relação com as diferentes fácies; padrões evolutivos), recorrendo aos *softwares Excel e CorelDRAW*, o que facilitou a análise estatística dos dados permitindo assim uma sistematização da informação e funcionando como suporte a algumas das observações feitas.

5. CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA E SÍNTESE DESCRITIVA DOS TESTEMUNHOS

5.1. Caracterização das fácies

No conjunto dos dois testemunhos analisados as unidades presentes são todas carbonatadas. Em termos litológicos genéricos correspondem a calcários, calcários dolomíticos/dolomitos e calcários argilosos, por vezes silicificados e/ou com nódulos de sílex.

Neste estudo foram adoptadas essencialmente as **fácies-tipo (F)**, originalmente distinguidas e definidas para outro sector do PS por Azerêdo *et al.* (2011b), tal como anteriormente referido, tendo-se verificado a quase total aplicabilidade aos casos agora estudados, mediante pequenos ajustes e desenvolvimentos. Apresentam-se de seguida (Fig. 5.1) as diferentes fácies com a respectiva caracterização e actualização para o caso presente.

Fácies 1 (F1) – Calcário argiloso com estrutura laminada fina incipiente a nítida, existindo um predomínio de laminações silto-argilosas (Fig. 5.2A e 2B); ocasionalmente, as laminações também podem ser microbiais. Por vezes ocorrem esferulitos de pequenas dimensões, películas de matéria orgânica e resíduos argilo-ferruginosos.

Fácies 2 (F2) – Calcário fundamental ou predominantemente formado por estruturas *in-situ* interligadas, de morfologias específicas diversas, incluindo feições do tipo estromatolítico; estas estruturas indiciam aparentes afinidades entre si (*vide obs.*). Neste sentido, adopta-se para esta fácies uma designação conjunta mais lata (F2) e distinguem-se 4 tipos mais específicos: F2A, F2B, F2BT, F2B2, que podem existir isoladamente ou associando-se em diversas combinações. *Obs.: A terminologia a aplicar a este tipo textural interpretado como formado in-situ suscita discussão em si mesma e quanto à génese (processos abióticos versus bióticos). Esta discussão é feita mais adiante (vide capítulo 8).*

Fácies 2A (F2A) – Estrutura claramente laminada (planar, ondulante, crenulada), por vezes evocando feição estromatolítica, podendo incluir intercalações grumosas ou micropeloidais e pequenos esferulitos (Fig. 5.2C). É comum alguma componente argilosa. De forma esporádica, esta fácies inclui raros ostracodos e/ou moldes de ostracodos, *coated grains* e, num único nível, foi reconhecido um exemplar de carófito. Pode ocorrer em bandas sucessivas desenvolvidas, ou apenas reduzida a finas películas intersticiais muito porosas na

trama de outras fácies, sobretudo na da F2B. Existe cimento/matriz micrítica, e cimentos/preenchimentos por material cristalino de natureza calcítica e dolomítica (frequente).

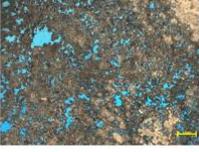
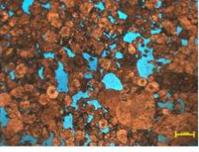
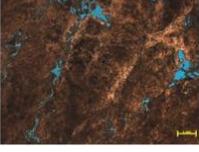
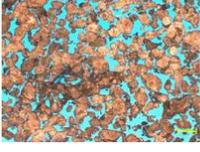
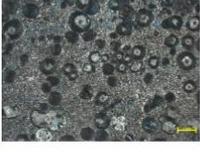
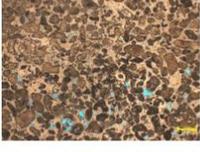
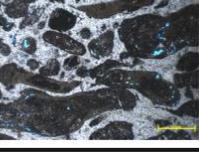
Fácies	Descrição sucinta	Fotomicrografias identificadoras
F1	Calcário argiloso com estrutura laminada fina incipiente a nítida, existindo um predomínio de laminações silto-argilosas.	
F2	F2A: Estrutura claramente laminada (planar, ondulante, crenulada), por vezes evocando feição estromatolítica, podendo incluir intercalações grumosas ou micropeloidais e pequenos esferulitos.	 
	F2B: Estrutura colunar/arborescente/digitiforme, que pode ser ramificada (denominação geral <i>shrubs</i>).	  
	F2BT: Estrutura colunar/arborescente/digitiforme, que pode ser ramificada (definidora da F2) bastante bem desenvolvida e preservada, exuberante.	 
	F2B2: Estrutura do tipo <i>micro-shrubs</i> , em que estes parecem apresentar uma orientação/disposição preferencial planar, definindo bandas.	
F3	<i>Grainstones</i> e <i>packstones</i> (mais raramente <i>rudstones/floatstones</i>) intraclásticos, sendo estes desde clastos bem definidos a fragmentos irregulares, de dimensões variadas e maioritariamente correspondendo às estruturas constituintes da F2B.	
F4	<i>Grainstones</i> e <i>packstones</i> esferulíticos, cujos elementos são, portanto, exclusiva ou predominantemente esferulitos.	
F5	<i>Grainstones</i> e <i>packstones</i> (mais raramente <i>rudstones</i>) exibindo evidências claras de retrabalhamento, sendo compostos por intraclastos frequentemente escuros, com arranjo textural heterogêneo mas, em geral, compacto.	
F6	<i>Grainstones/rudstones</i> e <i>packstones/floatstones</i> oncólitos, englobando oncóides bem individualizados, grãos e estruturas oncólitas e elementos agregados, incluindo zonas de estrutura laminar, com intraclastos associados.	  

Figura 5.1 – Quadro de fácies representativo dos testemunhos estudados. As ilustrações das fácies são apresentadas em maior detalhe mais adiante.

Fácies 2B (F2B) – Estrutura colunar/arborescente/digitiforme, que pode ser ramificada (denominação geral *shrubs*) (Fig. 5.2D e 2E). Pode apresentar-se com aspecto robusto, em que componentes e morfologias se mostram bem delineados; ou mais finamente estruturada, com um *framework* “rendilhado” muito poroso; ou, ainda, parcialmente quebrada e/ou com fragmentos amalgamados/colapsados. Pode incluir esferulitos, revestimentos esferulíticos, revestimentos micríticos (*coatings*) e, mais raramente, ostracodos e/ou pequenos moldes de ostracodos. É comum ocorrência heterogênea de outras fácies intersticiais na trama principal ou em lentículas/faixas, em geral F2A ou F3. Existe cimento/matriz micrítica e/ou argilosa e mais do que uma geração de cimentos/preenchimentos por material cristalino de natureza calcítica, dolomítica (frequente) e, mais raramente, siliciosa.

Fácies 2BT (F2BT) – Estrutura colunar/arborescente/digitiforme, que pode ser ramificada, definidora desta F2 bastante bem desenvolvida e preservada, exuberante (T=típica) (Fig. 5.2F). Ocorrência pontual de F2A ou F3 intersticiais na trama principal ou em lentículas/faixas.

Fácies 2B2 (F2B2) – Estrutura do tipo “*micro-shrubs*”, em que estes parecem apresentar uma orientação/disposição preferencial planar, definindo bandas (Fig. 5.3A). Ocorre esporadicamente em leitos intercalares na F2B e na F2A. Esta fácies inclui raros esferulitos.

Fácies 3 (F3) – *Grainstones* e *packstones* (mais raramente *rudstones/floatstones*) intraclásticos, sendo estes desde clastos bem definidos a fragmentos irregulares, de dimensões variadas e maioritariamente correspondendo às estruturas constituintes da F2B (Fig. 5.3B e 3C). Inclui também, ocasionalmente, *coated grains*, pelóides, oncóides e/ou clastos oncolitizados, esferulitos. Os clastos estão muitas vezes agregados/interligados por “pontes” micríticas ou formadas por cristais romboédricos de dolomite, outras vezes amalgamados, mas globalmente evidenciando uma disposição sugestiva da pré-existência de certa estruturação/organização, ou seja, uma “trama fantasma” (*vide obs.*). Ocasionalmente, esta fácies apresenta alguma componente argilosa e clastos escurecidos. Na fase de ligação ocorre micrite, cimento cristalino de natureza calcítica, dolomítica (mais frequente) ou, pontualmente, siliciosa.

Obs.: De acordo com a presente interpretação, as texturas em causa serão essencialmente diagenéticas e não deposicionais, pelo que também neste caso suscitam discussão mais adiante (vide capítulo 8.1).

Fácies 4 (F4) – *Grainstones* e *packstones* esferulíticos, cujos elementos são, portanto, exclusiva ou predominantemente esferulitos (Fig. 5.3D). Cimentos carbonatados ou siliciosos. Os esferulitos encontram-se frequentemente silicificados, mais raramente, podem estar oncolitizados e/ou revestidos. Embora os esferulitos mais ou menos dispersos ocorram em várias das fácies, a F4, como tal, aparece em geral isoladamente, com algumas exceções.

Fácies 5 (F5) – *Grainstones* e *packstones* (mais raramente *rudstones*) exibindo evidências claras de retrabalhamento, sendo compostos por intraclastos frequentemente escuros, com arranjo textural heterogêneo, mas, em geral, compacto (Fig. 5.3E); predominam clastos micríticos sem estrutura, a que se associam pelóides, grãos semelhantes aos comuns na F3 mas de aspecto mais remobilizado e alterado, menos frequentemente ocorrem oncóides e clastos oncolitizados, muito raros bioclastos. Existe matriz argilosa ou argilo-carbonatada e cimento silicioso ou carbonatado.

Fácies 6 (F6) – *Grainstones/rudstones* e *packstones/floatstones* oncolíticos, englobando oncóides bem individualizados, grãos e estruturas oncolitizadas e elementos agregados, incluindo zonas de estrutura laminar, com intraclastos associados e, mais raramente, pelóides (Fig. 5.3F). Os elementos oncolíticos têm dimensões desde submilimétricas a vários milímetros, com a estrutura concêntrica laminar bem a moderadamente desenvolvida, embora frequentemente afectada por dissolução intrapartícula; por vezes, o estágio avançado desta resulta em porosidade móldica, sendo a origem reconhecível pela coexistência com oncóides mais preservados. A fase de ligação pode apresentar micrite e/ou cimento cristalino dolomítico, observando-se pontualmente cimento vadoso gravítico (calcítico) e cimento silicioso. Esta F6 quase só ocorre no testemunho relativo ao poço 1.

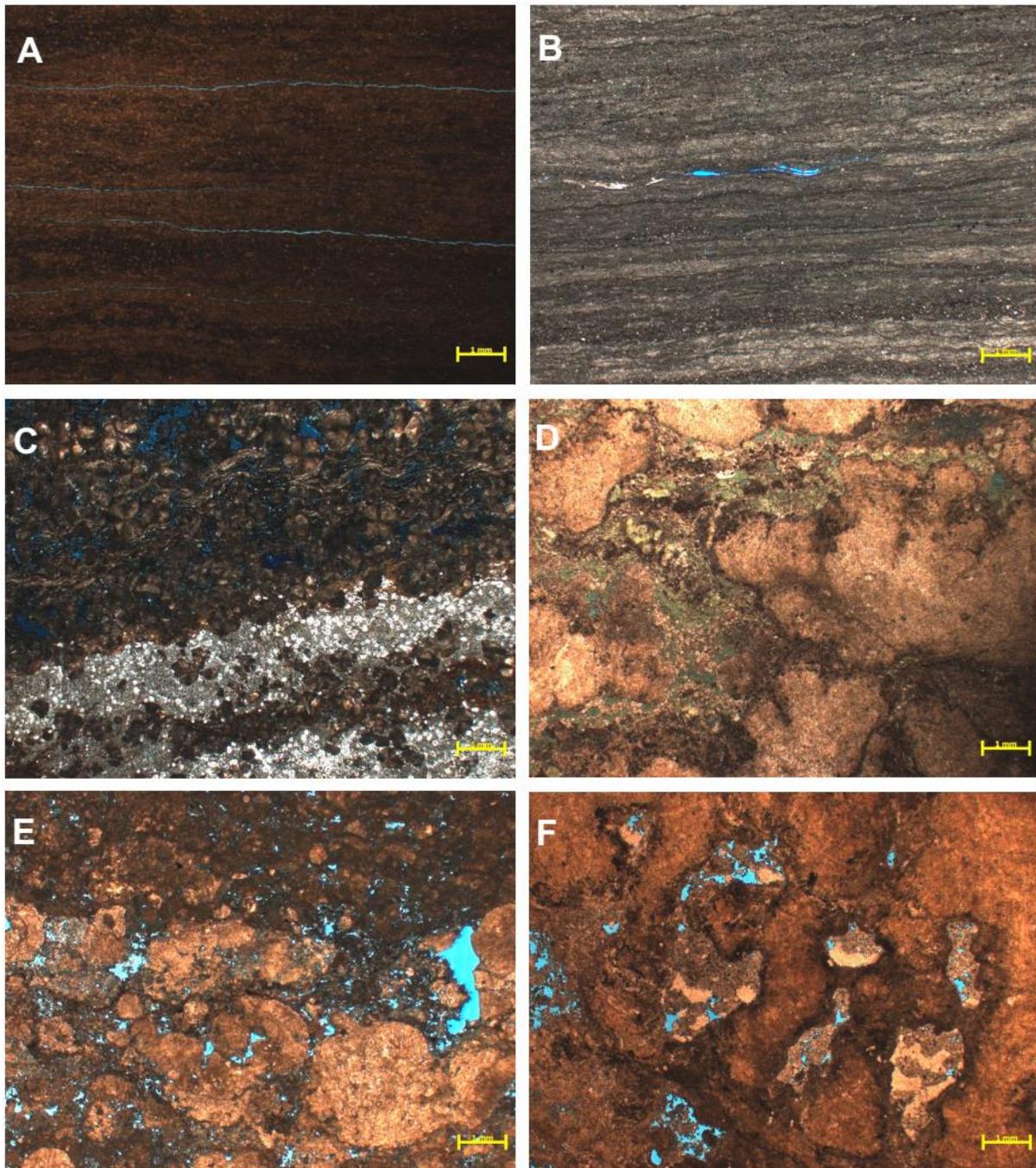


Figura 5.2 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das fácies (F) diferenciadas: **A.** F1, calcário argiloso com laminação planar suave (2_5427,85m). **B.** F1, calcário com menor teor argiloso do que em A, laminação marcada planar e crenulada (2_5436,55m). **C.** F2A, estrutura laminada ondulante e planar, pequenos esferulitos e zonas silicificadas (1_5319,55m). **D.** F2B, mostrando morfologias de *shrubs*, alguns parcialmente compactados/fragmentados (2_5433,60m). **E.** F2B com passagem no topo a F3 algo argilosa (2_5430,50m). **F.** F2BT, evidenciando claramente *shrubs* com morfologias bem desenvolvidas e preservadas (2_5421,05m).

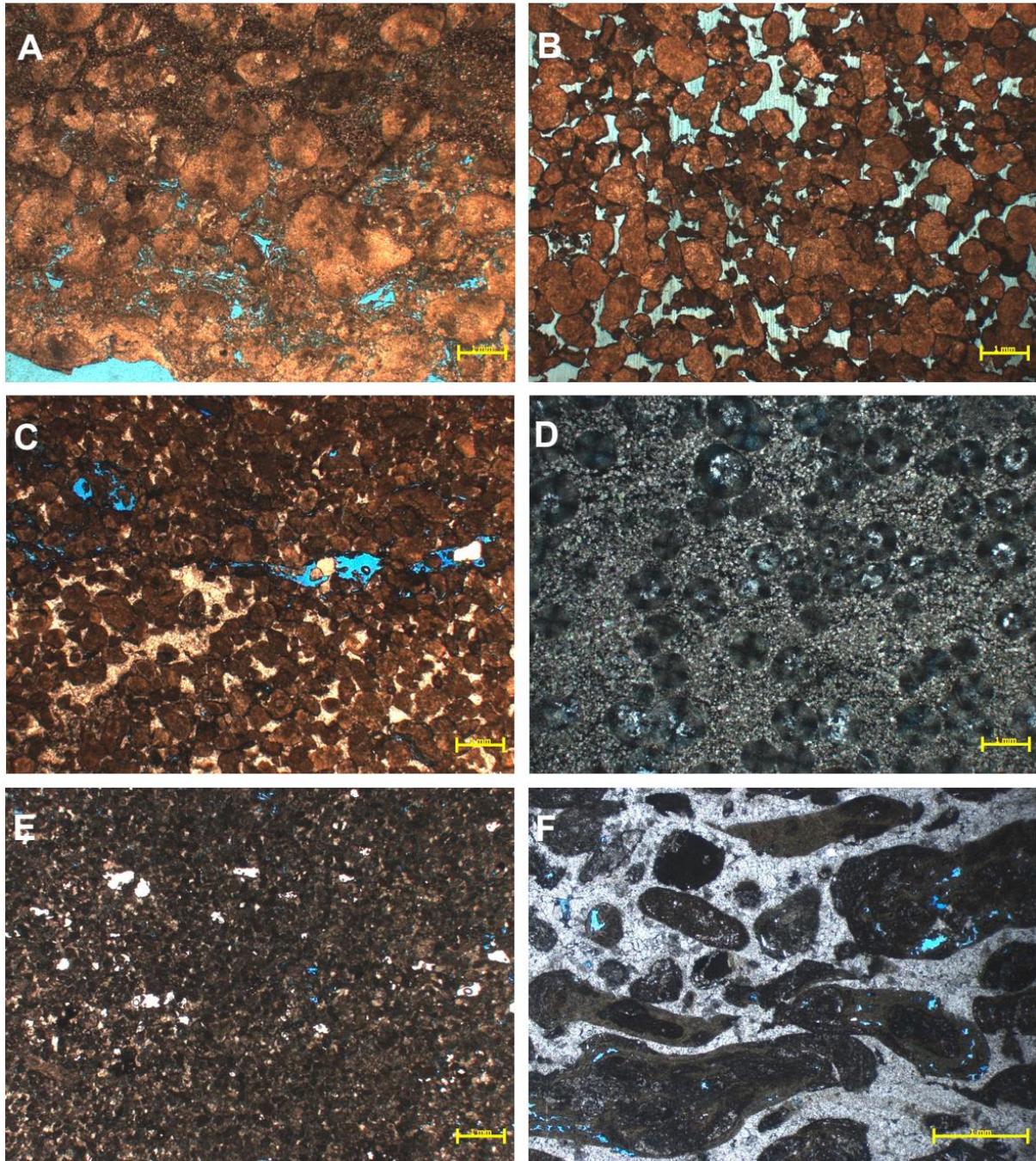


Figura 5.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das fácies (F) diferenciadas: **A.** F2B2 (“*micro-shrubs*” disposição preferencial em bandas), com esferulitos dispersos e F2A, esta mais na base (2_5420,50m). **B.** F3, *grainstone* a *packstone* intraclástico, clastos maioritariamente correspondendo a estruturas da F2B (*vide também C*), ainda com trama de F2B reconhecível (2_5428,00m). **C.** F3 (*vide também B*) (1_5321,25m). **D.** F4, *grainstone* esferulítico, silicificado (2_5418,65m). **E.** F5, *packstone* com intraclastos frequentemente escuros (1_5315,95m). **F.** F6, *rudstone* oncolítico, com estruturas oncolíticas grandes e cimento dolomítico silicificado (1_5315,30m).

5.2. Síntese descritiva dos testemunhos

Tal como referido anteriormente, a descrição dos dois testemunhos é aqui apresentada através de conjuntos de 5 caixas, sendo estas descrições obviamente complementadas pelas fichas individuais ilustradas e apresentadas, caixa a caixa, nos Anexos I.2 a I.54. Apresentam-se também os *logs* correspondentes a cada um dos testemunhos nos Anexos I.55 a I.58.

5.2.1. Testemunho 1

Caixas 1 a 5 (5311,00m – 5315,35m) (vide Anexos I.2 a I.6)

Em termos faciológicos, existe um predomínio das Fácies 2BT e 2B, com algumas passagens da Fácies 3; identificaram-se também as Fácies 5 e 6, principalmente na porção inferior do intervalo (caixas 4 e 5), com F5 predominante na última caixa, e algumas passagens F2A e F3.

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como nódulos silicificados associados a F3 (caixa 1), ou como cimento silicioso associado a F3 (caixa 3) e a F6 (caixas 4 e 5).
- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F5 (caixas 1 e 5) e a F6 (caixa 5), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixa 5).
- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas, ocasionalmente pode ocorrer disseminada (caixa 1).
- Intervalo no qual é possível identificar bastante **fracturação**, várias famílias de fracturas, abertas na sua maioria, por vezes parcialmente abertas.
- **Dissolução:** preferencialmente associada a F2B e F2BT, sendo menos presente nas Fácies 3, 5 e 6.
- **Desdolomitização:** associada a F5 (caixas 1 e 5).
- **Compactação:** pouco presente, no entanto quando ocorre está associada às Fácies 3 e 6.
- **Brechificação:** associada a F5 (caixa 5).
- **Cimentação:** pode ser carbonatada microcristalina calcítica associada a F2B/F3 (caixas 1 e 4), F2BT e F3 (caixa 2); carbonatada microcristalina calcítica e/ou micrítica associada a F2B/F3 (caixa 3), F2B e F6 (caixa 4), F3, F5 e F6 (caixa 5); siliciosa associada a F3 e F5 (caixa 1), F3 (caixa 3), F6 (caixas 4 e 5); cimentação parece ocorrer preferencialmente associada às Fácies 2B/3, 5 e 6, menos associada à Fácies 2BT; por vezes, é possível identificar mais do que uma fase de cimentação (caixa 1).
- **Argilosidade:** associada à Fácies 2A (caixa 5).

Neste intervalo, a **porosidade** associada a F2B e F2BT é normalmente boa a excelente, com algumas passagens mais fechadas de porosidade baixa a moderada (zonas cimentadas/recristalizadas); na base do intervalo a porosidade é maioritariamente baixa a moderada, localmente boa.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 3: identificou-se F3 com alguma componente oncolítica.
- Caixa 4: identificou-se F6 (fácies oncolítica), com alguns pelóides.
- Caixa 5: identificou-se F5 com alguma componente oncolítica; F6 na base.

Caixas 6 a 10 (5315,35m – 5319,85m) (vide Anexos I.7 a I.11)

Em termos faciológicos, na porção superior do intervalo (caixas 6, 7 e topo da 8) há um predomínio das Fácies 6, 5 e 3, e na base da caixa 8 identifica-se a Fácies 2B com passagens 2B2; na porção inferior do intervalo (caixas 9 e 10) a Fácies dominante passa a ser a 2B com passagens 2B2, zonas dominadas pelas Fácies 5 e 6, e passagens F3 enquanto que na base predomina a Fácies 2A.

Quanto aos processos diagenéticos, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como cimento silicioso associado às Fácies 3, 5 e 6, mas também como nódulos/bandas silificadas associadas às Fácies 2A e 2B; possivelmente formando uma “capinha” siliciosa quando associada à Fácies 2B (caixa 9).
- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F3 (caixa 7), F3 e F6 (caixa 8), eventualmente a F2A (caixa 10), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 8 e 10).
- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.
- Intervalo no qual é possível identificar bastante **fracturação**, várias famílias de fracturas, abertas na sua maioria, por vezes parcialmente abertas.
- **Dissolução:** preferencialmente associada a F2B e F2A, ocorrendo também nas Fácies 3, 5 e 6.
- **Compactação:** ocorre preferencialmente associada às Fácies 3, 5 e 6.
- **Brechificação:** associada a F6 (caixas 6 e 7), F2B (caixas 8 e 9), F5 (caixa 9).
- **Cimentação:** pode ser micrítica e/ou carbonatada microcristalina calcítica associada a F5 e F3 (caixa 6), F6 e F3 (caixa 7); siliciosa associada a F6 (caixas 6, 7), F6, F5 e F3 (caixa 9); dolomítica associada a F3 (caixa 7); micrítica e/ou dolomítica associada a F6 e F3 (caixa 8); carbonatada microcristalina calcítica/micrítica/dolomítica

associada a F2A (caixa 10); cimentação parece ocorrer preferencialmente associada às Fácies 3, 5 e 6.

Neste intervalo, a **porosidade** é muito variável de baixa (dominante) a excelente; nas Fácies 2B e 2A a porosidade parece ser mais elevada (boa a excelente), com algumas passagens baixa a moderada; associada à Fácies 2A é possível identificar também uma grande variação de porosidade, verificando-se que nas zonas mais dissolvidas restam apenas alguns grumos (caixas 9 e 10).

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 6: identificou-se F6 (fácies oncolítica).
- Caixa 7: identificou-se F6; F3 com alguns oncóides e/ou clastos oncolitizados.
- Caixa 8: identificou-se F6.
- Caixa 9: identificou-se F6; F2B e F2A com alguns esferulitos associados.
- Caixa 10: identificou-se F2A com alguns esferulitos associados.

Caixas 11 a 14 (5319,85m – 5322,93m) (vide Anexos I.12 a I.15)

Em termos faciológicos, na porção superior do intervalo (caixa 11), identificaram-se as Fácies 2A e 2B, com uma transição para a fácies oncolítica (F6), e também com a Fácies 3 associada; na porção intermédia e inferior deste intervalo (caixas 12, 13 e 14) foi possível identificar a Fácies 3 com algumas passagens 2A e 5.

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação**: ocorre como nódulos silicificados associados às Fácies 2A e 2B (caixa 11), para além de estar presente como cimento silicioso associado a F3 (caixas 12 e 13) e F6 (caixa 11).
- **Dolomitização**: ocorre como cimento dolomítico associado a F3 (caixa 12).
- **Recristalização**: ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.
- Intervalo no qual é possível identificar bastante **fracturação**, várias famílias de fracturas, abertas na sua maioria, por vezes parcialmente abertas.
- **Dissolução**: preferencialmente associada a F2A e algumas zonas de F3, F5 e F6.
- **Compactação**: ocorre preferencialmente associada às Fácies 3, 5 e 6.
- **Brechificação**: associada a F6 (caixa 11), F3 (caixas 12, 13 e 14), F5 (caixa 13).
- **Cimentação**: pode ser carbonatada microcristalina calcítica e micrítica associada a F6 (caixa 11), F3 (caixa 12); carbonatada microcristalina calcítica associada a F3 (caixa 13); siliciosa associada a F6 (caixa 11) e F3 (caixas 12 e 13); dolomítica

associada a F3 (caixa 12); cimentação parece ocorrer preferencialmente associada às Fácies 3 e 6.

- **Argilosidade:** associada às Fácies 2A (caixa 11) e 3 (caixas 12 e 13).

Neste intervalo, a **porosidade** é maioritariamente baixa, localmente moderada a boa, principalmente nas zonas mais actuadas por processos de dissolução e fracturação.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 11: identificou-se F6 (fácies oncolítica).

5.2.2. Testemunho 2

Caixas 1 a 5 (5405,00m – 5409,50m) (vide Anexos I.16 a I.20)

Em termos faciológicos, existe um predomínio das Fácies 2B e 2A, com passagens da Fácies 3; identificaram-se com alguma regularidade as Fácies 5 e 3; e menos presente neste intervalo identificou-se a Fácies 1.

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como bandas/nódulos silicificados associados a F3 (caixas 1 e 3), F2A e F2B (caixa 3), F2B e F2BT (caixa 4), F2B (caixa 5); prováveis “capinhas” siliciosas associadas a F2B (caixas 3, 4 e 5); leitos/bandas com fracturação sin-sedimentar (fracturas fechadas) associados a F2A e F2B2 (caixa 4).

- **Dolomitização:** ocorre como cimento (dolomitização de cimento carbonatado microcristalino calcítico) associado a F2B (caixa 2), originando uma textura cristalina.

- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.

- **Fracturação:** associada à silicificação intensa que ocorre na F2A (caixa 4), sob a forma de pequenas fendas e falhas sin-sedimentares.

- **Dissolução:** ainda que pouco expressiva nas 3 primeiras caixas deste intervalo, está preferencialmente associada a F2B e algumas zonas de F3, ocorrendo com menor expressão em F2A, F2B2, F2BT, F5 e F1.

- **Compactação:** pouco presente, mas ocorre preferencialmente associada às Fácies 3 e 5.

- **Cimentação:** pode ser micrítica associada a F5, F1, F2B, F2A e F3 (caixa 1), F3, F5, F2B e F3 (caixa 2); dolomítica associada a F2B (caixa 2); siliciosa associada a F3 (caixas 1 e 3), F5 (caixa 2), F2B (caixas 4 e 5); carbonatada micrítica e/ou microcristalina calcítica associada a F1, F3 e F2A (caixa 3), F2A e F2B2 (caixa 4), F1 e F2A (caixa 5).

- **Argilosidade:** presente em todo o intervalo, sendo mais importante nas 4 primeiras caixas; na caixa 1 ocorre em várias Fácies (5, 1, 2A e 3), enquanto que no resto do intervalo está normalmente associada a F1 e F2A.

Neste intervalo, a **porosidade** nas porções superior e intermédia (caixas 1, 2 e 3) é nula a baixa, aumentando na parte inferior (caixas 4 e 5) onde predominam as Fácies 2B com passagens da Fácies 3; normalmente associado às Fácies 1 e 2A a porosidade é mais baixa devido à componente argilosa existente nestas fácies.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 1: identificou-se F3 constituída por pelóides e intraclastos escuros.
- Caixa 2: identificou-se calcário completamente dolomitizado (protólito talvez seja a Fácies 5); identificou-se também F5 constituída por pelóides e intraclastos, e o que parecem ser alguns clastos oncolitizados.
- Caixa 3: identificou-se F3 constituída por pelóides e intraclastos escuros.
- Caixa 5: no topo e associado a F1 identificam-se algumas estruturas de escape de fluidos; identificaram-se também estilólitos associados a F2B.
- F2A, regra geral, ocorre com esferulitos associados.

Caixas 6 a 10 (5409,50m – 5414,00m) (vide Anexos I.21 a I.25)

Em termos faciológicos, identificou-se o predomínio das Fácies 2B e 2BT, com passagens da Fácies 3 e zonas onde ocorrem as Fácies 2A e 2B2; localmente F3 pode mesmo ser dominante (caixa 8).

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como nódulos e/ou “capinhas” de sílica associadas a F2B (caixas 6, 7, 8, 9 e 10) e F2BT (caixa 9); parecem “cobrir” porções de F2B.
- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F2B (caixas 7, 9 e 10), F2B/ F3 e F2BT (caixa 8), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 7, 8, 9 e 10).
- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.
- **Fracturação:** associada a bandas de precipitação tardia de carbonatos, sendo possível identificar fendas/fracturação vertical (caixa 7).
- **Dissolução:** preferencialmente associada a F2B, F2BT e F3.
- **Desdolomitização:** associada a F2B (caixa 7), com evidências para corrosão periférica das partículas.
- **Compactação:** ocorre normalmente associada à Fácies 3, ainda que pouco presente.

- **Cimentação:** está normalmente associada às Fácies 3 e 2B, eventualmente à Fácies 2BT (caixa 9); cimento pode ser dolomítico associado a F2B (caixas 7, 9 e 10), F2B/F3 e F2BT (caixa 8); silicioso associado a F2B (caixas 6 e 8), F2BT (caixa 9 e 10).

- **Argilosidade:** associada a F2A (caixas 6 e 9) e F2B (caixa 10).

Neste intervalo, a **porosidade** é boa a excelente, com algumas zonas baixa a moderada ou até mesmo fechadas.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 10: identificou-se F2B com laivos de argila e óleo, bem marcados.

- A Fácies F2B encontra-se bastante actuada por processos de dissolução ao longo deste intervalo, tendo estes uma importância bem vincada no aumento da porosidade, originando *frameworks* F2B do tipo “rendilhado” (F2B muito corroída, mas que mantém uma espécie de rede) e F2B do tipo “quasi-F3” (F2B muito dissolvida com as partículas carbonatadas a estarem quase individualizadas) (caixa 6 apresenta estes dois tipos bem diferenciados); F2B quando muito dissolvida e sem a actuação de processos diagenéticos que prejudiquem a porosidade (cimentação, silicificação, recristalização, compactação, presença de fracção argilosa), apresenta uma porosidade muito boa a excelente, enquanto que quando a Fácies 2B se apresenta mais estruturada/organizada/compacta parece apresentar porosidade inferior.

Caixas 11 a 15 (5414,00m – 5418,45m) (vide Anexos I.26 a I.30)

Em termos faciológicos, na porção superior do intervalo (caixas 11 e 12), há um predomínio das Fácies 2B e 2BT com passagens da Fácies 3, e por vezes com 2A (com esferulitos associados); no restante intervalo (caixas 13, 14 e 15) existe uma alternância de Fácies (1, 2A, 2B/3 e 4).

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como nódulos/bandas silicificadas associadas a F2B (caixas 11 e 12), F2A e F3 (caixa 13); laminações associadas a F2A (caixas 12 e 13), F1 (caixa 13); esferulitos silicificados (caixa 13); bandas de “sílica-gel” associada a F4 (caixa 14); laminações/bandas e nódulos silicificados associadas a F2A, F1 e F4 (caixa 15).

- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F2B/F3 (caixa 11), F2B e F2A (caixas 12 e 14), F2A (caixa 13), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 11, 12, 13 e 14).

- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.

- **Fracturação:** associada à presença de sílica com brechificação sin-sedimentar, pequenas fendas de colapso (caixa 15).
- **Dissolução:** pouco actuante na porção intermédia e na base do intervalo (caixas 13, 14 e 15), preferencialmente associada a F2B/F3, ocorrendo também em F2A e com menor expressão em F1 e F4.
- **Compactação:** pouco presente, mas principalmente associada a F3 e F2A.
- **Brechificação:** associada à presença de sílica (caixa 15).
- **Cimentação:** muito associada a F2B/F3, eventualmente F2A e F1; o cimento pode ser dolomítico associado a F2B/F3 (caixa 11), F2B e F2A (caixas 12 e 14), F2A (caixa 13); silicioso associado a F2B (caixa 11); carbonatado microcristalino calcítico associado a F2B e F2A (caixas 12 e 14), F1 e F2A (caixa 13), F2A e F4 (caixa 15); eventualmente micrítico associado a F2B e F2A (caixas 12 e 14), F1 e F2A (caixa 13), F1 (caixa 15).
- **Argilidade:** associada principalmente a F1 e F2A, eventualmente F4.

Neste intervalo, a **porosidade** é muito variável, desde fechada a excelente; as melhores zonas em termos de porosidade estão associadas às Fácies 2B/3, enquanto que as piores zonas estão associadas a Fácies mais argilosas (F1, F2A e F4).

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 12: identificou-se F2B com pequenos ostracodos e pequenos moldes de ostracodos; existem evidências para uma possível evolução diagenética de F2A para F3? (argila é removida ficando apenas os grumos e os esferulitos?).
- Caixa 13: identificou-se F2A com ostracodos.
- Caixas 14 e 15: foi possível identificar F4, existindo em algumas zonas acomodações espessas de esferulitos (F4) e noutras zonas ocorre F4 juntamente com laminações argilosas (F1), em que os esferulitos parecem cair para este sedimento; identificou-se uma espécie de “sílica-gel” onde parecem “boiar” os esferulitos.
- Caixa 15: ocorrência de leitos/bandas de sílica associados a F1, com brechificação sin-sedimentar e fendas de colapso.
- F1 e F2A, regra geral, com esferulitos associados.
- Na lâmina delgada de uma amostra lateral correspondente à profundidade 5416,25m, foi identificado um exemplar de carófito (girogónito) associada a F2A.

Caixas 16 a 20 (5418,45m – 5422,95m) (vide Anexos I.31 a I.35)

Em termos faciológicos, na porção superior do intervalo (caixas 16 e 17) é possível identificar uma alternância de Fácies 2B, 2BT, 2A, 1 e 4; no restante intervalo há um predomínio das Fácies 2BT, 2B2, 2A e 2B, localmente com passagens da Fácies 3 e uma zona de domínio da Fácies 5 (caixa 19).

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre principalmente como leitos/bandas silicificadas (nos quais pode ocorrer fracturação/brechificação), eventualmente como nódulos silicificados e mais raramente como cimento; regra geral, quando em nódulos/bandas e associada a F2B parece constituir uma “capinha” siliciosa (caixas 16 e 20); localmente pode afectar apenas alguns elementos carbonatados, tais como os esferulitos (caixa 16) embora, neste caso, os cortéxes periféricos e a fase de ligação não se encontram silicificados; estrutura F2BT revestida por sílica (caixa 17); algum cimento silicioso associado a F2BT (caixa 18), F2B (caixa 20); nódulos/bandas silicificadas (“sílica-gel”?) associadas a F2A e F2BT (caixa 19), nota-se também na transição entre F2A-FBT nódulos para onde parecem “cair” as partículas carbonatadas – *micro-shrubs* e esferulitos (caixa 19); leitos associados a F2A (caixa 19); nódulos associados a F5 (caixa 19).
- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F2B e F4 (caixa 16), F2B (caixa 17), F2B2, F2BT e F2A (caixa 18), F2B, F2BT, F5 e F2A (caixa 19), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 16, 17, 18 e 19).
- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.
- **Fracturação:** ocorre em nódulos/bandas silicificadas associadas a F2B e F2A (caixa 16), F2BT (caixa 17), F2B (caixa 20), F2A (caixa 19).
- **Dissolução:** preferencialmente associada a F2B, F2BT e algumas zonas de F3, ocorrendo também em F2A e F5 e com menor expressão em F1 e F4.
- **Compactação:** associada a F4 (caixa 16), zonas de F3 (caixa 20), F2B (caixa 17) e aos esferulitos na F2B2 (caixa 18).
- **Brechificação:** associada à presença de nódulos de sílica (caixa 16).
- **Cimentação:** pode ser dolomítica associada a F2B e F4 (caixa 16), F2B (caixa 17), F2B2, F2BT e F2A (caixa 18), F2B, F2BT, F5 e F2A (caixa 19); carbonatada microcristalina calcítica e/ou micrítica associada a F1 e F2A (caixa 17); mais raramente pode ser siliciosa associada a F2BT (caixa 17) e F2B e F2BT (caixa 20); carbonatada microcristalina calcítica associada a F2B (caixa 20).

- **Argilosidade:** preferencialmente associada a F1 e F2A, eventualmente F2B e F4.

Neste intervalo, na porção superior (caixas 16 e 17), a **porosidade** é maioritariamente baixa, sendo apenas moderada a boa nas zonas onde ocorre F2B e algumas passagens F3; no restante intervalo a porosidade é moderada a excelente, sendo mais elevada nas zonas onde ocorre F2B e F2BT, e algumas passagens F3, eventualmente moderada também em zonas de F2A onde a componente argilosa tenha sido dissolvida (caixa 19).

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 16: identificou-se F4 com esferulitos oncolitizados e outros revestidos; F2B com esferulitos e *coated grains*.
- Caixa 17: identificou-se F2BT representada no topo por um corpo individualizado, revestido por sílica e argila na “cúpula”.
- F2A, F2B e F2B2 com esferulitos associados.

Caixas 21 a 25 (5422,95m – 5427,40m) (vide Anexos I.36 a I.40)

Em termos faciológicos, o intervalo é dominado pela Fácies 2B com algumas passagens das Fácies 3 e 2A, na base do intervalo (caixa 25) ocorre também F4.

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como nódulos silicificados, possivelmente formando “capinhas” siliciosas associadas a F2B (caixa 23); bandas/leitões silicificados (“sílica-gel”?) associados a F4 (caixa 25); cimento associado a F2B (caixa 21).
- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F2B/F3 (caixas 22, 24 e 25), F2B/F3 e F2A (caixa 23), F2A e F4 (caixa 25), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 22, 23, 24 e 25).
- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.
- **Dissolução:** associada principalmente a F2B/F3 e F2A, ocorrendo também associada a F4.
- **Desdolomitização:** associada a F2B/F3 (caixa 24).
- **Compactação:** ainda que pouca, está principalmente associada a F3.
- **Cimentação:** associada a F2B, zonas de F3, F2A e F4; cimento pode ser silicioso associado a F2B (caixa 21); dolomítico associado a F2B/F3 (caixas 22, 24 e 25), F2B/F3 e F2A (caixa 23), F2A e F4 (caixa 25); eventualmente algum cimento micrítico associado a F2A e F4 (caixa 25).
- **Argilosidade:** associada preferencialmente a F2A e F4.

Neste intervalo, a **porosidade** é maioritariamente moderada a excelente, com as zonas mais porosas a estarem associadas a F2B e às passagens F3.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- F2A com esferulitos.
- F2B num estágio avançado de dissolução, muito próximo da Fácies 3 (“*quasi-F3*”).

Caixas 26 a 30 (5427,40m – 5431,90m) (vide Anexos I.41 a I.45)

Em termos faciológicos, a porção superior deste intervalo (caixa 26) apresenta uma alternância entre as Fácies 2A, 2B e 1, com passagens da Fácies 3, enquanto que no restante intervalo há um predomínio da Fácies 2B com passagens das Fácies 3 e 2A, existindo algumas zonas de 2A, 2BT e mais raramente 3.

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** em bandas/leitos e nódulos silicificados, principalmente associada a F2A (caixas 26 e 28), ocorrendo também em F1, com fracturação associada; contacto F2A/F2B encontra-se silicificado, com algumas partículas carbonatadas inclusive esferulitos a “cair” para esta espécie de “sílica-gel” (caixa 28); silicificação intensa originando uma textura cristalina que acaba por mascarar o protólito, provavelmente F2B (caixa 28).
- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F2B (caixas 26 e 28), F2BT, F2B e F2A (caixa 27), F2A (caixa 28), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 26, 27 e 28).
- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas; por vezes, os próprios contactos entre zonas F2B/F3 encontram-se recristalizados (caixas 29 e 30).
- **Fracturação:** associada a faixas de carbonatação tardia (caixas 28 e 29) e a ocorrência de silicificação (caixa 26).
- **Dissolução:** associada a F2B e F2BT, com passagens F3, ocorrendo também associada a F2A e F1.
- **Compactação:** associada principalmente às zonas de F3.
- **Cimentação:** micrítica associada a F1 e F2A (caixa 26), eventualmente associada a F2B (caixa 26), F2A (caixas 27 e 28); dolomítica associada a F2B (caixas 26 e 28), F2BT, F2B e F2A (caixa 27), F2A (caixa 28); carbonatada microcristalina calcítica associada a F2B (caixas 27, 28 e 30); siliciosa (caixa 28).
- **Argilosidade:** associada principalmente a F2A e F1, muito localmente a F2BT.

Neste intervalo, a **porosidade** nas porções superior e intermédia (caixas 26, 27 e 28) é baixa a boa, podendo localmente ser fechada (caixa 26); as zonas mais porosas estão associadas a F2B com passagens F3, e correspondem à porção inferior do intervalo (caixas 29 e 30), sendo a porosidade maioritariamente excelente, com algumas passagens de porosidade moderada.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 26: identificou-se calcite fascicular, o que pode sugerir uma interpretação errada da possível existência de esferulitos; identificou-se também F2A com ostracodos associados.
- Caixa 28: identificaram-se pontualmente *coated grains* e ostracodos associados a F2A.
- F2A e F2B com esferulitos associados.
- F2B apresenta-se em diferentes estágios de evolução, desde o F2B em que a estrutura é aglomerada/compacta, a F2BT em que a estrutura é mais organizada/típica, a F2B “*quasi-F3*” com a estrutura muito dissolvida e as partículas quase individualizadas.

Caixas 31 a 35 (5431,90m – 5436,35m) (vide Anexos I.46 a I.50)

Em termos faciológicos, na porção superior deste intervalo, há um claro predomínio da Fácies 2B (caixa 31), com passagens da Fácies 2A e uma zona 2BT, enquanto que na caixa 32 há um predomínio de F1 e F2BT, com passagens F2A e ainda zonas F2B e F2B2; na porção intermédia e inferior do intervalo (caixas 33, 34 e 35), há um predomínio da Fácies 2B, com passagens F3 e F2A e zonas F2BT, F2B2 e F6, enquanto que na base do intervalo volta a dominar a fácies 1, identificando-se também F3 com intercalações F5.

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como nódulos/bandas silicificadas associadas a F2B (caixas 31, 32 e 35), formando possíveis “capinhas” siliciosas, apresentam-se também fracturadas; nódulos/laminações siliciosas associadas a F1, com as zonas mais espessas a apresentarem fracturação associada (caixas 32 e 35); nódulos silicificados associados a F3, com muita fracturação nestas zonas (caixa 35).
- **Dolomitização:** ocorre como cimento dolomítico associado a F2B (caixa 31), F1, F2A, F2B2 e F2BT (caixa 32), F2B e F2B2 (caixa 33), F2B, F2BT, F6 e F3 (caixa 34), F1 e F3 (caixa 35), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 31, 32, 33, 34 e 35).
- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.

- **Fracturação:** associada a bandas silicificadas e bandas de carbonatação secundária (caixa 31), bandas e nódulos silicificados (caixas 32, 34 e 35).
- **Dissolução:** associada a F2B e F2BT, com passagens F3, ocorrendo também associada a F2A e F2B2 e com menor expressão associada a F1 e F3.
- **Desdolomitização:** associada a F2B e F2B2 (caixa 33), F2B, F2BT, F6 e F3 (caixa 34).
- **Compactação:** associada a F2BT, com as partículas a apresentarem contactos suturados (caixa 32).
- **Brechificação:** associada a F2B (caixa 33).
- **Cimentação:** dolomítica associada a F2B (caixa 31), F1, F2A, F2B2 e F2BT (caixa 32), F2B e F2B2 (caixa 33), F2B, F2BT, F6 e F3 (caixa 34), F1 e F3 (caixa 35); eventualmente carbonatada microcristalina calcítica F1, F2A, F2B2 e F2BT (caixa 32); micrítica associada a F2B, F1 e possivelmente F3 (caixa 35).
- **Argilosidade:** associada a F1, F2A, F2BT e F2B.

Neste intervalo, a **porosidade** varia de moderada a excelente, com algumas zonas de porosidade baixa, principalmente associadas a F1.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- Caixa 33: identificou-se uma zona de porosidade maioritariamente baixa associada a F2B, no entanto isto pode dever-se ao facto de o óleo ter permanecido dentro dos poros, não permitindo que a aferição da porosidade seja a mais correcta.
- Caixa 34: identificou-se F6.
- F1 com esferulitos (caixas 31 e 35).

Caixas 36 a 39 (5436,35m – 5440,60m) (vide Anexos I.51 a I.54)

Em termos faciográficos, na porção superior do intervalo (caixas 36 e 37) há um predomínio da Fácies 2B, com algumas zonas com Fácies 1 e uma passagem 2B2; na porção inferior do intervalo (caixas 38 e 39) há um claro domínio da Fácies 2A, com passagens da Fácies 2B.

Quanto aos processos diagenéticos e à argilosidade, verifica-se o seguinte:

- **Silicificação:** ocorre como bandas/leitões silicificados associados a F1; nódulos silicificados associados a F2B, F2A (caixa 36).
- **Dolomitização:** é muito intensa em todo o intervalo, ocorrendo como cimento dolomítico associado a F1, F2B e F2B2 (caixa 36), F2B (caixa 37), F2A (caixas 38 e 39), mas também como dolomitização das partículas calcíticas (caixas 36, 37, 38 e 39).

- **Recristalização:** ocorre preferencialmente como zonas/bandas recristalizadas.
- **Fracturação:** essencialmente associada aos leitos siliciosos (caixa 36), eventualmente aos nódulos siliciosos (caixa 39).
- **Dissolução:** muito localizada e com pouca expressão, associada a F2B, F2A e F1.
- **Cimentação:** dolomítica associada a F1, F2B e F2B2 (caixa 36), F2B (caixa 37), F2A (caixas 38 e 39); eventualmente algum cimento micrítico associado a F1 (caixa 36), e identificam-se associados a F2A alguns restos de esteira micrítica que não terão sofrido dolomitização (caixas 38 e 39).
- **Argilidade:** associada a F1 e F2A.

A **porosidade** é baixa ao longo de todo o intervalo.

Existem ainda alguns aspectos que são importantes salientar:

- F1 com esferulitos associados.

6. VARIABILIDADE DE FÁCIES, ASSOCIAÇÕES FACIOLÓGICAS E PADRÕES EVOLUTIVOS

Neste capítulo apresenta-se uma abordagem complementar da caracterização faciológica, focada no reconhecimento e interpretação da variabilidade de fácies (proporções relativas estimadas das fácies), e das associações faciológicas preferenciais, mas também dos eventuais padrões evolutivos (transições entre fácies, ciclos) identificados nos dois testemunhos estudados.

6.1. Variabilidade de fácies

6.1.1. Testemunho 1

O testemunho 1 apresenta uma menor diversidade de fácies (Fig. 6.1), quando comparado com o testemunho 2 (Fig. 6.2), não tendo sido identificadas as Fácies 1, 2B2 e 4. F6 apresenta uma grande expressão neste testemunho, sendo uma das fácies dominantes, a par da F3; é comum encontrar-se F3 de forma isolada, no entanto esta aparece muitas vezes associada a F2B; de resto, as fácies apresentam proporções similares, ainda que numa apreciação de conjunto as Fácies F2 (F2A/F2B/F2BT) tenham alguma expressão, com cerca de 43% do total das fácies identificadas.

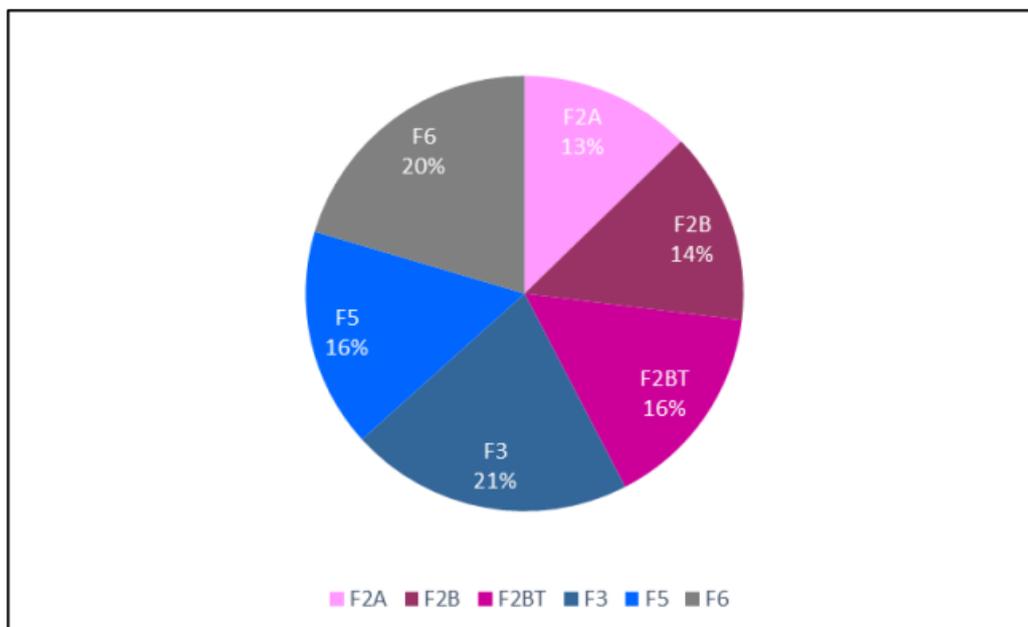


Figura 6.1 – Gráfico com as proporções relativas estimadas para as diferentes fácies identificadas no testemunho 1. *Obs.: A percentagem de F3 no gráfico indica apenas a sua ocorrência isolada, no entanto esta fácies encontra-se estreitamente associada a F2B, pelo que pode na realidade apresentar uma ocorrência mais significativa.*

6.1.2. Testemunho 2

O testemunho 2 apresenta uma grande diversidade de fácies (Fig. 6.2). F2B é a fácies dominante, com uma grande expressão neste testemunho, evidenciando-se também que a fácies 3 aparece na maioria das vezes associada à Fácies 2B, sendo muito provavelmente um sub-produto desta, o que sugere uma origem preferencialmente diagenética (*vide capítulo 8.1*), e por consequência igualmente importante. No entanto, a sua ocorrência de forma mais isolada é pouco expressiva; a terceira Fácies mais importante é a 2A; numa apreciação de conjunto as Fácies F2 (F2A/F2B/F2BT/F2B2) são dominantes, com cerca de 84% do total das fácies identificadas.

Note-se que a abundância relativa da Fácies 3 corresponde apenas a zonas de maior desenvolvimento desta fácies que, por isso, conseguem ser facilmente distinguidas no registo sedimentológico. No entanto, grande parte das ocorrências de F3 estão associadas a F2B, como passagens/intercalações milimétricas a centimétricas. Ou seja, apesar de no gráfico da Fig. 6.2 a proporção de F3 ser baixa, na verdade a proporção com que esta fácies aparece no testemunho é bastante superior, estando no conjunto das fácies mais dominantes.

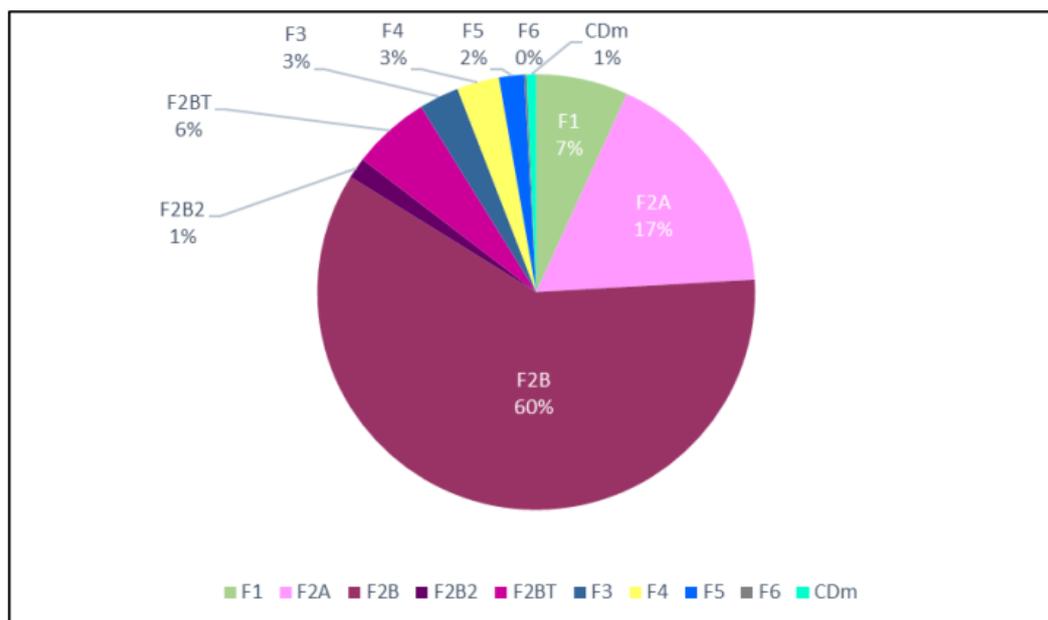


Figura 6.2 – Gráfico com as proporções relativas estimadas das diferentes fácies identificadas no testemunho 2.

Obs.: A percentagem de F3 no gráfico indica apenas a sua ocorrência isolada, no entanto esta fácies encontra-se estreitamente associada a F2B, pelo que pode na realidade apresentar uma ocorrência mais significativa.

6.2. Associações de fácies

6.2.1. Testemunho 1

São identificadas associações preferenciais de fácies, reconhecíveis quer a macroskala (testemunho) quer a microscala (lâmina), existindo claramente associação muito comum, ao longo dos intervalos estudados relativamente ao testemunho 1 (Fig. 6.3), entre: F2B e F3; F6 e F3. Com menor frequência: F2B e F2B2; F3 e F2A; F5 e F3.

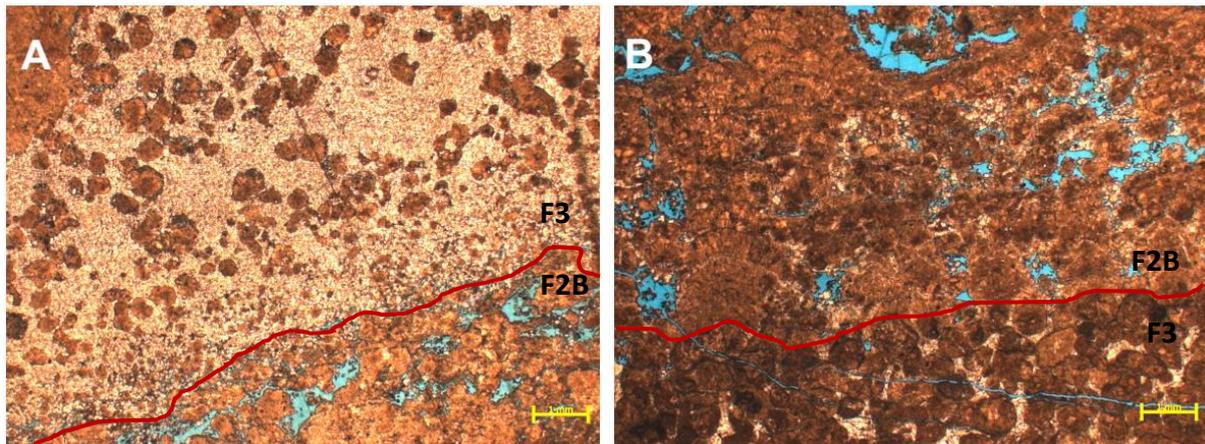


Figura 6.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das associações de fácies mais comuns: **A.** Transição F2B – F3, com F3 a apresentar-se muito cimentada (1_5311,65m). **B.** Transição F2B – F3, com F2B já algo dissolvida, zona de F3 cimentada (1_5313,05m).

6.2.2. Testemunho 2

Relativamente ao testemunho 2 (Fig. 6.4) as associações preferenciais são entre: F2B e F3; F2B e F2A; F2B, F2A e F3; F2A aparece também muitas vezes associada a F2BT e a F2B2. De modo menos nítido e mais descontínuo, há alguma associação entre: F3 e F5; F2B e F2B2.

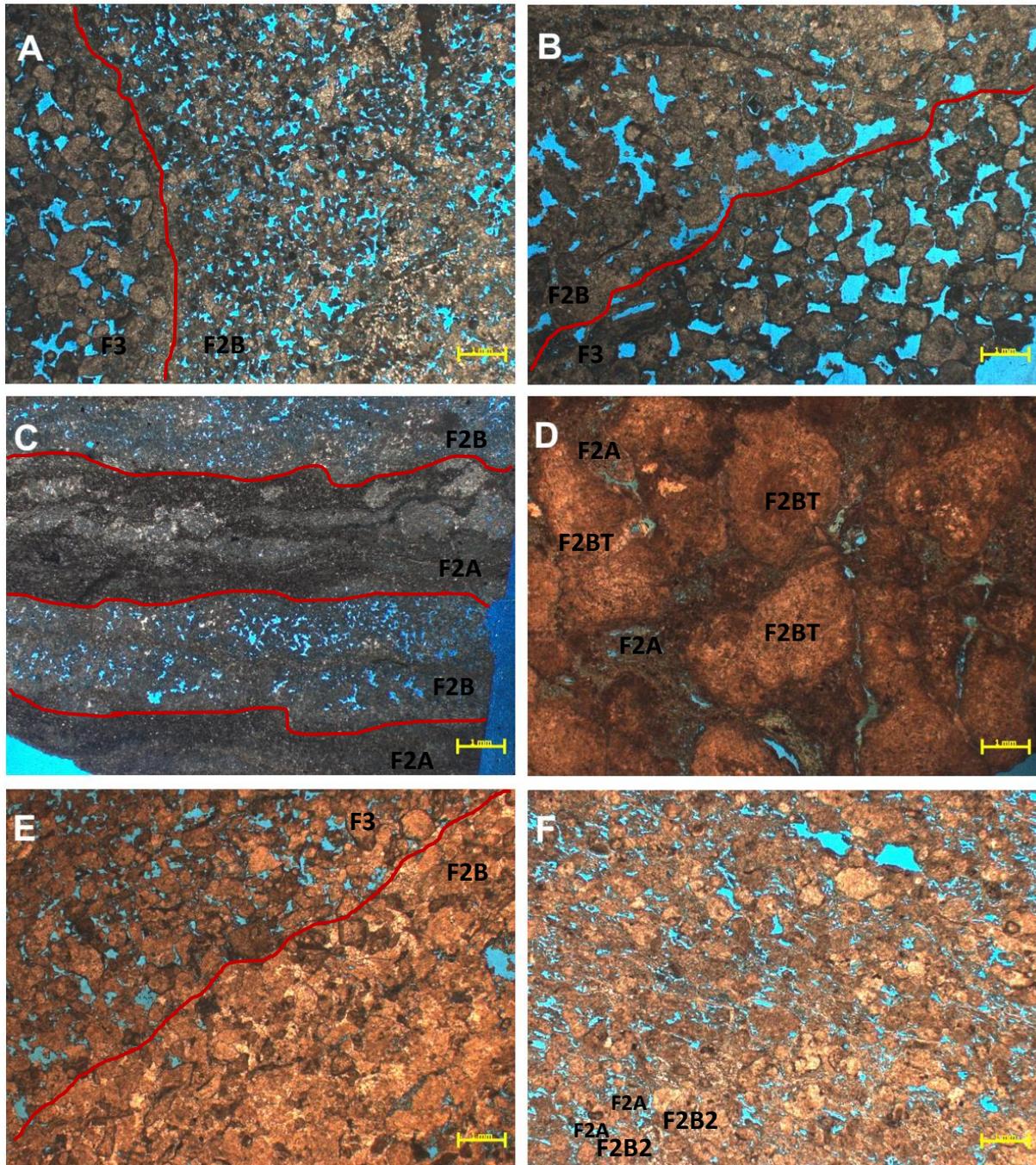


Figura 6.4 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos das associações de fácies mais comuns: **A.** Transição F2B – F3 (2_5409,40m). **B.** Transição F2B – F3, com alguns laivos argilosos, possivelmente películas de F2A (2_5409,70m). **C.** Transição F2B – F2A, passagens cíclicas (2_5417,15m). **D.** F2BT com restos intersticiais de F2A (2_5428,40m). **F.** Transição F2B – F3 (2_5432,05m). **G.** F2B2 com passagens de F2A associadas (2_5433,30m).

6.3. Sucessão dos padrões faciológicos

Foram reconhecidos e interpretados padrões evolutivos ao longo dos dois testemunhos (*vide Anexo I.59*), com as fácies a apresentarem sequências de evolução e transição entre elas, sugerindo alguma ritmicidade paleoambiental. Identificaram-se 3 fases distintas: a **fase inicial** (FI – cor verde), reconhecida pelo predomínio da Fácies 2A (caracterizada pelo aspecto laminar das estruturas, podendo por vezes evocar feição estromatolítica), é interpretada como a fase que antecede a edificação/desenvolvimento de estruturas carbonatadas colunares/arborescentes; **fase de crescimento** (FC – cor vermelha), reconhecida pelo predomínio das Fácies 2B, 2BT e 2B2 (caracterizadas pela grande expressão de estruturas colunares/arborescentes, que podem apresentar um aspecto robusto, mais finamente estruturado, ou ainda parcialmente quebrado e/ou com fragmentos amalgamados/colapsados), e interpretada como a fase de edificação e desenvolvimento das estruturas carbonatadas colunares/arborescentes; **fase de transição** (FT – cor amarela), esta fase é a mais heterogénea das três fases apresentadas, isto porque pode estar associada a diversas Fácies (F1, F4, F5 e F6), sendo normalmente reconhecida por corresponder a eventos muito particulares no registo sedimentar de uma sequência, esta pode ser identificada antes ou depois de qualquer uma das outras duas fases, bem como intercalando uma mesma fase. Note-se que devido ao carácter diagenético da Fácies 3 (*vide capítulo 8.1*), esta pode estar incluída em qualquer uma das fases, no entanto é mais comum encontrá-la na fase de crescimento, associada à Fácies 2B. Esta interpretação apresenta-se sob a forma de *mini-logs* (*vide Anexo I.59*), nos quais se identificaram as diferentes fases e as fácies a que estas se associam, apresentando-se também um desenho esquemático representativo e, quando possível, as fotomicrografias das lâminas delgadas correspondentes.

Nota para as cores das fácies utilizadas nos *mini-logs* que são as mesmas que foram utilizadas nas fichas descritivas (*vide Anexo I.1*).

7. CARACTERIZAÇÃO DIAGENÉTICA

Neste capítulo trata-se da análise diagenética detalhada (reconhecimento dos processos, grau de desenvolvimento), e da apreciação do impacto da diagénese nas diferentes fácies, nomeadamente, no que respeita a condições de porosidade (e eventualmente permeabilidade), e o controlo destas fácies sobre a intensidade dos processos, bem como a estimativa da componente argilosa ao longo dos testemunhos.

7.1. Processos diagenéticos e argilosidade

7.1.1. Testemunho 1

Relativamente ao testemunho 1 (Tab. 7.1), os processos diagenéticos mais frequentes e com maior grau de desenvolvimento são a fracturação, dissolução, cimentação e silicificação. A recristalização também é um processo frequente, mas apresenta um grau de desenvolvimento moderado. Já a compactação, dolomitização e brechificação são processos menos recorrentes, tal como a presença de fracção argilosa. A desdolomitização é o processo menos significativo.

Tabela 7.1 – Tabela que mostra a ocorrência e intensidade dos diferentes processos diagenéticos e da argilosidade, identificados no testemunho 1.

Porção	Caixa	Sil	Dol	Rec	Frac	Diss	Desdol	Com	Brec	Cim	Argilosid
Sup.	1										
	2										
	3										
	4										
	5										1
	6										
	7										
Infer.	8										
	9										1
	10										3
	11										2
	12										3
	13										2
	14										

		Legenda			
Sup.	Superior	Sil	Silicificação		1 Pouco presente
Infer.	Inferior	Dol	Dolomitização		2 Presença moderada
		Rec	Recristalização		3 Muito presente
		Frac	Fracturação		
		Diss	Dissolução		
		Desdol	Desdolomitização		
		Com	Compactação		
		Brec	Brechificação		
		Cim	Cimentação		
		Argilosid	Argilosidade		

- **Silicificação** é uma constante ao longo do testemunho 1 (Tab. 7.1), este processo apresenta uma intensidade moderada a baixa e, regra geral, ocorre sob a forma de nódulos/bandas silicificadas afectando preferencialmente as Fácies 2A e 2B, mas também como cimento silicioso afectando principalmente F3, F5 e F6 (Fig. 7.1).

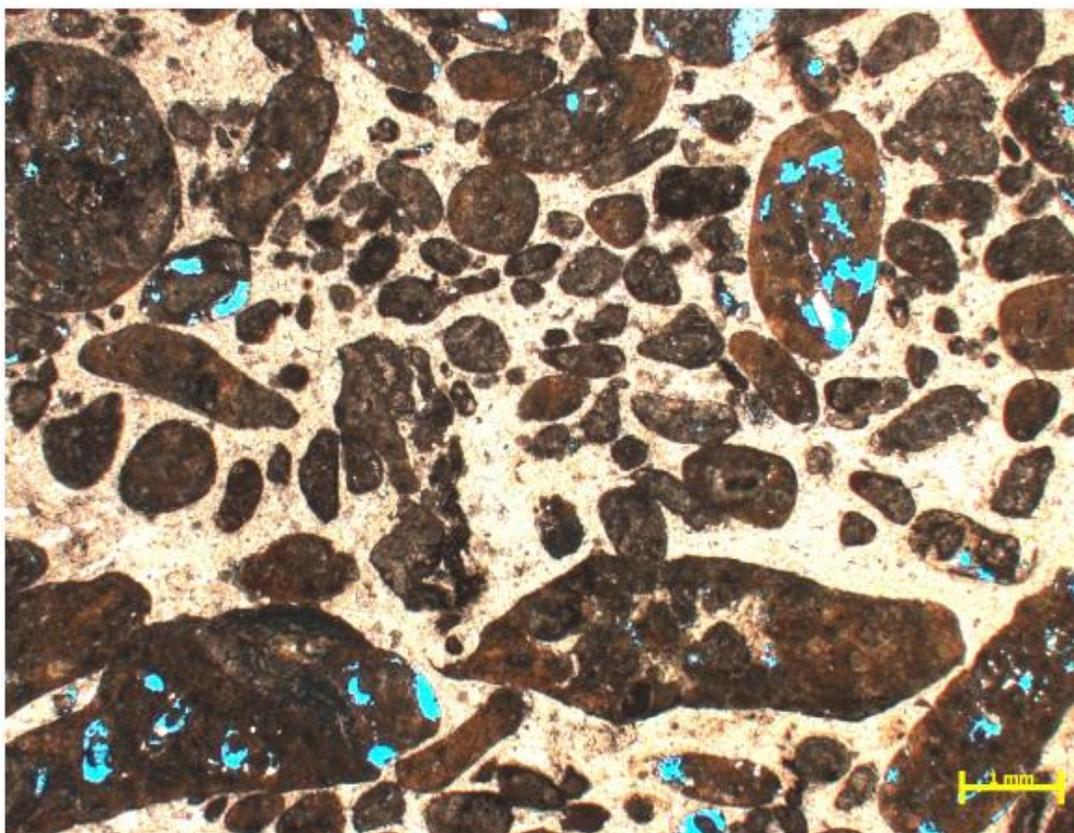


Figura 7.1 – Fotomicrografia das unidades estudadas mostrando um exemplo representativo de processos diagenéticos na seguinte fácies (F): F6 com a fase de ligação completamente silicificada (1_5315,60m).

- **Dolomitização** ocorre ocasionalmente ao longo do testemunho 1 (Tab. 7.1) (comparando com o testemunho 2, tem uma presença muito menos significativa), este processo apresenta uma intensidade baixa a moderada, e ocorre essencialmente como cimento dolomítico associado a F3, F5 e F6, mais ocasionalmente pode também afectar partículas calcíticas de forma mais intensa (Fig. 7.2).

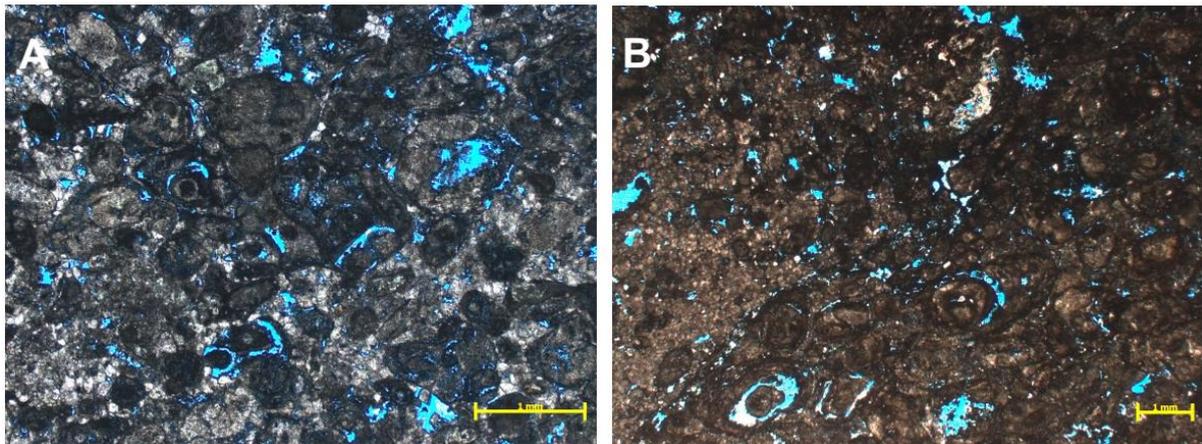


Figura 7.2 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F6 com cimento dolomítico (eventualmente, substituindo cimento calcítico microcristalino pré-existente) e alguma dolomitização das partículas calcíticas, é também possível identificar a ocorrência de desdolomitização através da presença de *rhombs* calcíticos (1_5316,40m). **B.** F6 com cimento dolomítico e alguma dolomitização das partículas calcíticas, é também possível identificar a ocorrência de desdolomitização através da presença de *rhombs* calcíticos (1_5317,00m).

- **Recristalização** é também uma constante ao longo do testemunho 1 (Tab. 7.1), este processo apresenta uma intensidade baixa, raramente moderada (apenas na porção inferior do testemunho), ocorre como zonas/bandas recristalizadas, podendo ocasionalmente ocorrer de forma disseminada.

- **Fracturação** ocorre em todo o testemunho 1 (Tab. 7.1), sendo um processo que apresenta uma intensidade elevada, raramente moderada; identificam-se várias famílias de fracturas, abertas na sua maioria, por vezes, parcialmente abertas; aparece recorrentemente associada a todas as fácies.

- **Dissolução** é um processo muito comum ao longo do testemunho 1 (Tab. 7.1), com uma intensidade moderada a elevada, mais raramente baixa; este processo está associado preferencialmente a F2, F2BT e F2A (Fig. 7.3) e, com menor expressão, a F3, F5 e F6.

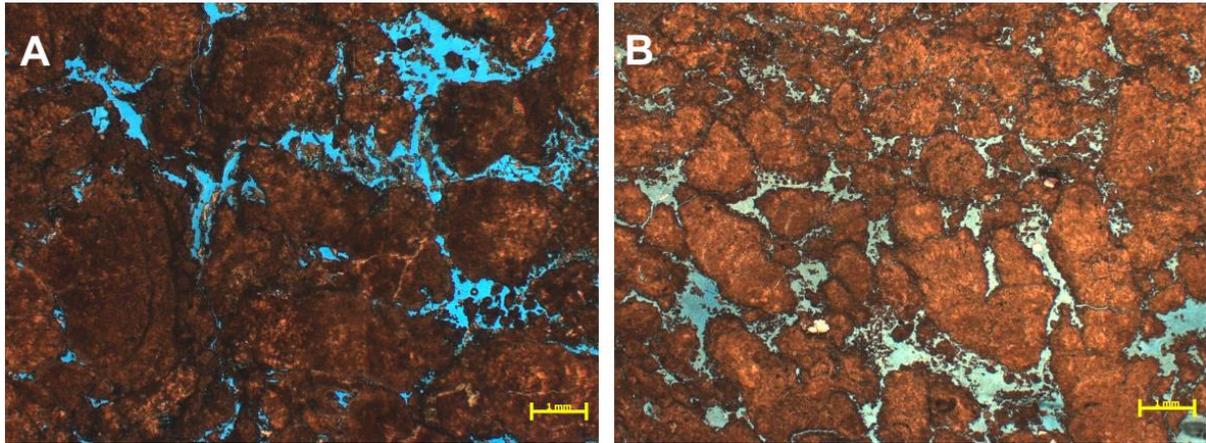


Figura 7.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F2BT com zonas muito dissolvidas originando porosidades dos tipos VUG, BP, WP, GF; é possível identificar alguns restos de F2A, possivelmente já bastante dissolvida (1_5313,35m). **B.** F2BT constituída por arbustos digitiformes (“*micro-shrubs*”), identificam-se zonas muito dissolvidas originando porosidades dos tipos VUG, BP, WP, GF; é possível identificar alguns restos de F2A, possivelmente já bastante dissolvida (1_5313,60m).

- **Desdolomitização** ocorre raramente, apenas na porção superior do testemunho 1 (Tab. VII.1), identificando-se preferencialmente em zonas de ocorrência mais intensa de dolomitização (Fig. 7.2).
- **Compactação** é um processo identificado com alguma frequência, principalmente na porção inferior do testemunho 1 (Tab. 7.1). Apresenta uma intensidade moderada a baixa, associado preferencialmente a F3, F5 e F6 (Fig. 7.4).

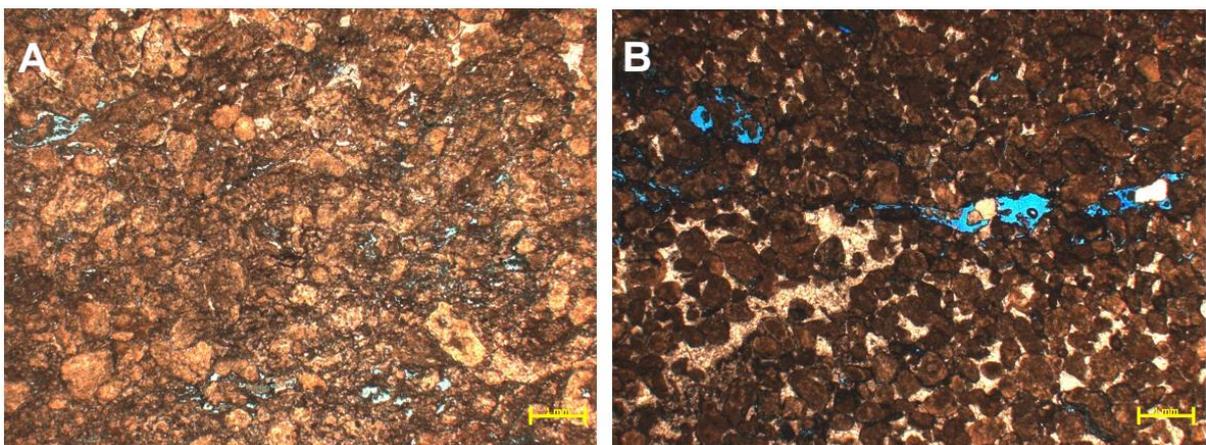


Figura 7.4 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F3 constituída por fragmentos carbonatados, provavelmente de origem F2B/F2BT, identificam-se contactos suturados; ocorrência de laivos argilosos associados a F2A (1_5321,55m). **B.** (1_5321,25m) F3 constituída por fragmentos carbonatados, provavelmente de origem F2B/F2BT, mas também alguns oncóides e clastos oncolitizados; identificam-se contactos suturados.

- **Brechificação** ocorre preferencialmente na porção inferior do testemunho 1 (Tab. 7.1), sendo um processo que apresenta uma intensidade baixa, por vezes moderada e mais raramente elevada, associado principalmente a F3, F5 e F6. Menos frequentemente associado a F2B.

- **Cimentação** é uma constante ao longo do testemunho 1 (Tab. 7.1) e apresenta uma intensidade variável, baixa a moderada, mais raramente elevada; na porção superior a cimentação é menos frequente do que na porção inferior do testemunho; preferencialmente associada a F3, F5 e F6, eventualmente F2B, menos recorrentemente associada a F2A e F2BT (Fig. 7.5).

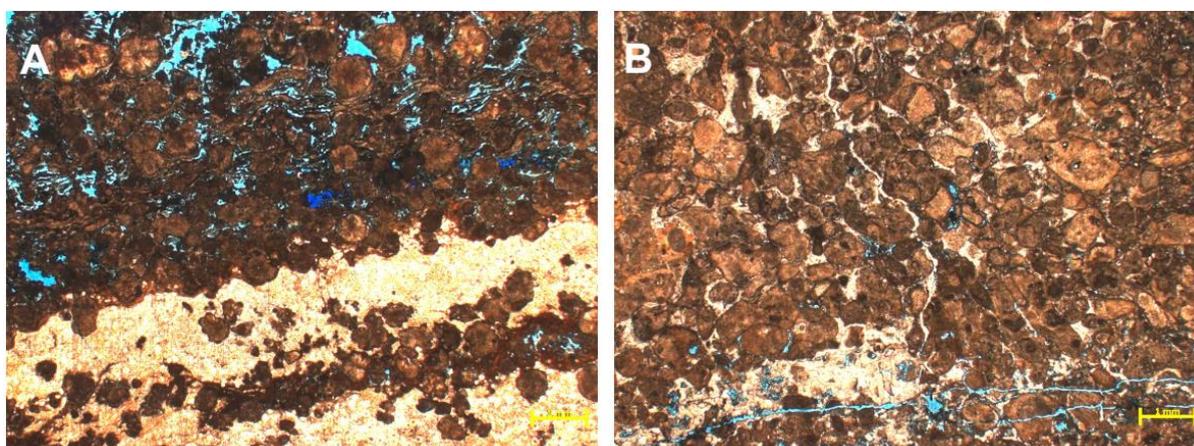


Figura 7.5 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F2A com zonas distintas, uma bastante dissolvida, restando apenas alguns laivos de F2A e alguns esferulitos, e outra zona onde apenas é possível identificar alguns esferulitos e grumos carbonatados, estando esta zona cimentada por um cimento silicioso (1_5319,55m). **B.** F6 com F3, sendo possível identificar oncóides, clastos oncolitizados e outros fragmentos carbonatados, ocorrência de cimentação siliciosa provavelmente a substituir o cimento carbonatado pré-existente (1_5318,45m).

- **Argilosidade** com fraca ocorrência neste testemunho 1, ocorre preferencialmente na porção inferior, estando associada a F2A, eventualmente a F3 (Fig. 7.4).

7.1.2. Testemunho 2

Relativamente ao testemunho 2 (Tab. 7.2), os processos diagenéticos mais frequentes e com maior grau de desenvolvimento são a dissolução, cimentação, dolomitização, silicificação e recristalização, bem como a presença de fracção argilosa. A compactação, desdolomitização e fracturação são processos menos recorrentes. A brechificação é o processo menos significativo.

Tabela 7.2 – Tabela que mostra a ocorrência e intensidade dos diferentes processos diagenéticos e argilosidade, identificados no testemunho 2.

Porção	Caixa	Sil	Dol	Rec	Frac	Diss	Desdol	Com	Brec	Cim	Argilosid
Sup.	1	1		1		1				3	3
	2	2	1			1				3	2
	3	2				1		1		2	2
	4	2			1	2				2	2
	5	2				2		1		1	1
	6	1				3		1		1	1
	7	1	1		1	3	1	1		1	
	8	1	3		1	2				3	
	9	1	2		1	2				2	1
	10	1	3	1		1				3	2
	11	1	3	1		1			1	1	1
	12	3	3	1		1			1	2	2
	13	3	2	1		1			1	3	3
Inter.	14	2	1	1	1	1		1	2	2	2
	15	3		1	1	1		1	3	3	3
	16	2	1	1	1	1		1	2	2	2
	17	2	1						1	1	1
	18	3	3			3			1	3	3
	19	1							1	1	1
	20	1							1	1	1
	21	1							1	1	1
	22		1								
	23	1	3						1	1	1
	24		3					1		1	
25	2	3						1	2	2	
26	3	1	1	1	1			1	3	3	
Infer.	27	3	1	1	1	1			1	3	3
	28	2	1	1	1	1			1	2	2
	29	1				1		1		1	1
	30					1				1	
	31	1	1	1		1				1	1
	32	3	3	1		1			1	3	3
	33		3	1		1	1		1	3	
	34	1	3	1		1	1			1	1
	35	2	2	1	1	1				2	2
	36	2	3	1		1				2	2
	37		3	1		1					
	38	3	3	1		1				3	3
39	3	3	1	1	1				3	3	

Legenda							
Sup.	Superior	Sil	Silicificação	1	Pouco presente	1	Pouco presente
Inter.	Intermédia	Dol	Dolomitização	2	Presença moderada	2	Presença moderada
Infer.	Inferior	Rec	Recristalização	3	Muito presente	3	Muito presente
		Frac	Fracturação				
		Diss	Dissolução				
		Desdol	Desdolomitização				
		Com	Compactação				
		Brec	Brechificação				
		Cim	Cimentação				
		Argilosid	Argilosidade				

- **Silicificação** é uma constante ao longo do testemunho 2 (Tab. 7.2), sendo um processo que apresenta uma intensidade baixa a moderada, podendo, localmente, ser elevada; regra geral, ocorre sob a forma de nódulos/bandas silicificadas, afectando preferencialmente F2B, F2A e F3. Pode também aparecer como bandas/laminações siliciosas associadas a F1 e F4, como cimento silicioso, afectando principalmente F2B (Fig. 7.6) e, por vezes, afectando F2BT, F3 e F5; mais raramente podem encontrar-se contactos silicificados; identificaram-se também com alguma frequência esferulitos silicificados; nódulos/bandas silicificadas associadas a F2B, sugere-se que estas sejam “capinhas” siliciosas.

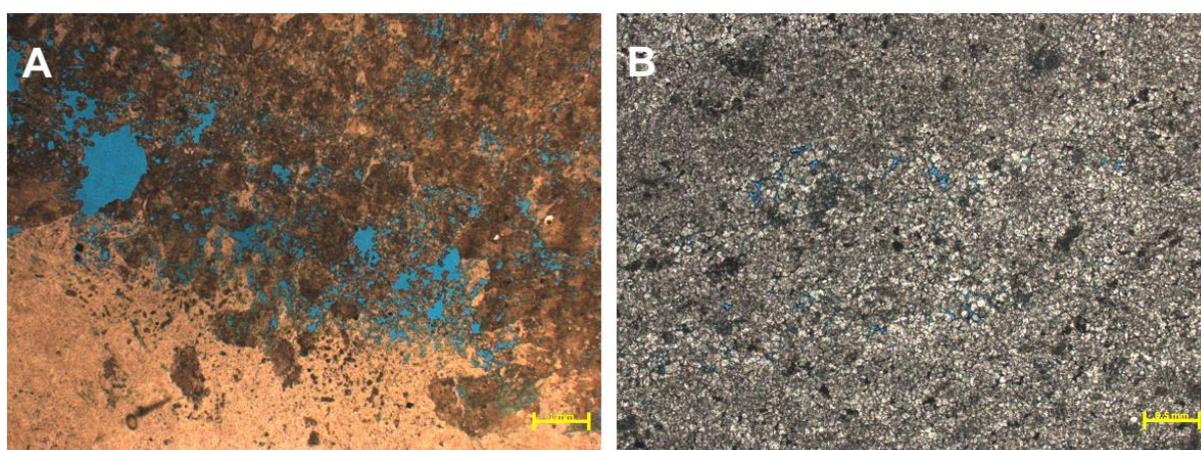


Figura 7.6 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F2B com duas zonas distintas, uma bastante dissolvida e outra completamente silicificada (2_5426,65m). **B.** Textura cristalina com silicificação intensa, o protólito talvez fosse F2B (2_5430,00m).

- **Dolomitização** aparece também regularmente ao longo do testemunho 2 (Tab. 7.2), essencialmente na porção intermédia e inferior. Este processo apresenta uma intensidade elevada a moderada; na base do testemunho a dolomitização parece mais intensa; ocorre essencialmente como cimento dolomítico associado a F2B e F2A (Fig. 7.7), com menor frequência associado a F2BT, F3 e F2B2; é comum identificar partículas calcíticas dolomitizadas.

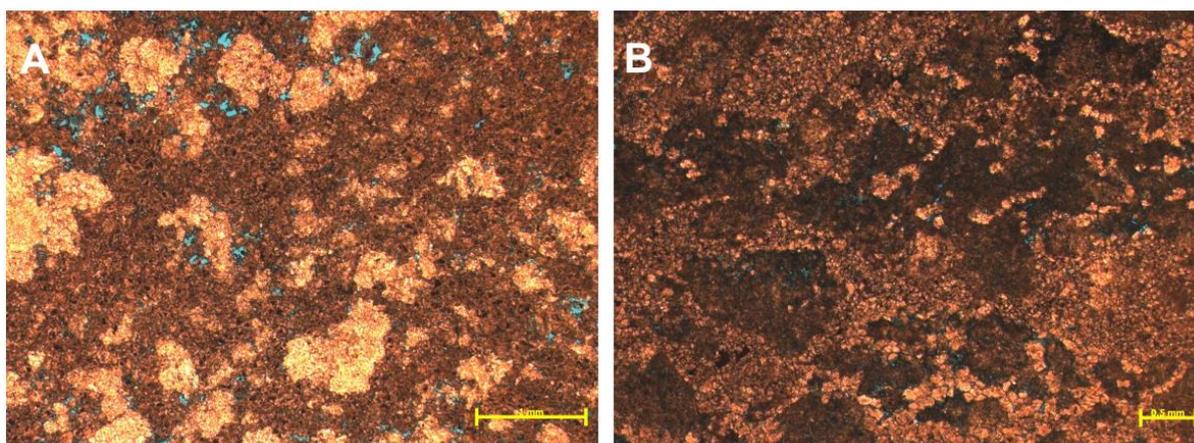


Figura 7.7 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F2B com dolomitização intensa e algumas zonas desdolomitizadas (2_5411,25m). **B.** F2B com dolomitização intensa e algumas zonas desdolomitizadas (2_5439,60m).

- **Recristalização** é também uma constante ao longo do testemunho 2 (Tab. 7.2), sendo um processo que apresenta uma intensidade baixa, por vezes moderada. Principalmente na porção inferior do testemunho, ocorre como zonas/bandas recristalizadas.

- **Fracturação** constitui um processo pouco marcante neste testemunho 2 (Tab. 7.2). Este processo apresenta uma intensidade baixa, raramente moderada ou elevada, ocorrendo preferencialmente nas porções intermédia e inferior do testemunho; fracturas estão principalmente associadas a bandas/nódulos silicificados, mas também a bandas de precipitação tardia de carbonatos; estas fracturas encontram-se maioritariamente fechadas.

- **Dissolução** é um processo muito comum ao longo do testemunho 2 (Tab. 7.2), apresentando uma intensidade variável, desde baixa a elevada, sendo mais intensa na porção intermédia e superior do testemunho; está associada preferencialmente a F2B/F3, F2A e F2BT, menos frequentemente também associada a F1, F4, F5 e F2B2 (Fig. 7.8).

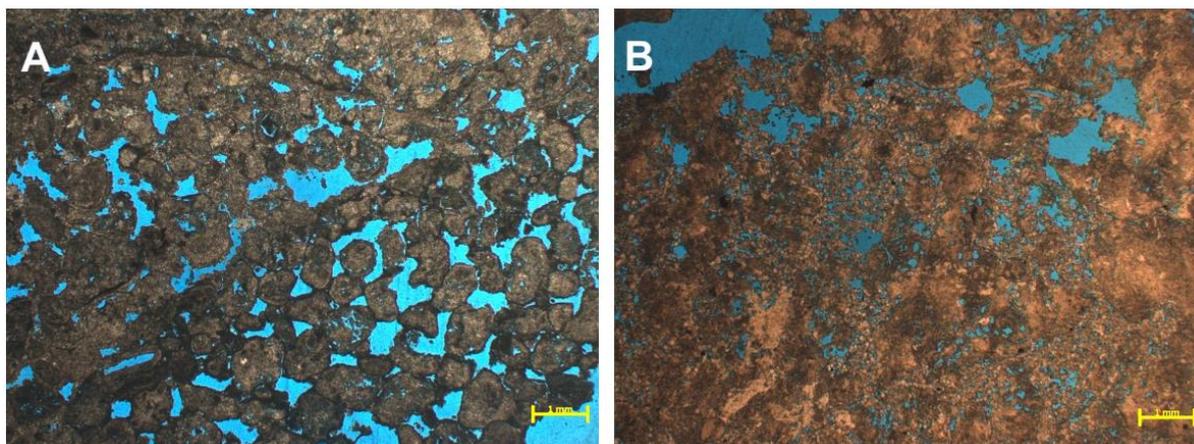


Figura 7.8 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F2B com transição para F3, são identificadas algumas películas de F2A, a dissolução é intensa originando porosidade excelente (2_5409,70m). **B.** F2B muito dissolvida/corroída com porosidade excelente (2_5426,65m).

- **Desdolomitização** ocorre raramente, mas preferencialmente na porção intermédia e inferior do testemunho 2 (Tab. 7.2), associada tanto ao cimento como às partículas calcíticas que foram dolomitizadas (Fig. 7.7).

- **Compactação** é um processo pouco recorrente, ocorrendo principalmente nas porções superior e intermédia do testemunho 2 (Tab. 7.2), apresentando uma intensidade normalmente baixa, associando-se preferencialmente a F3, F5 e F4 (Fig. 7.9).

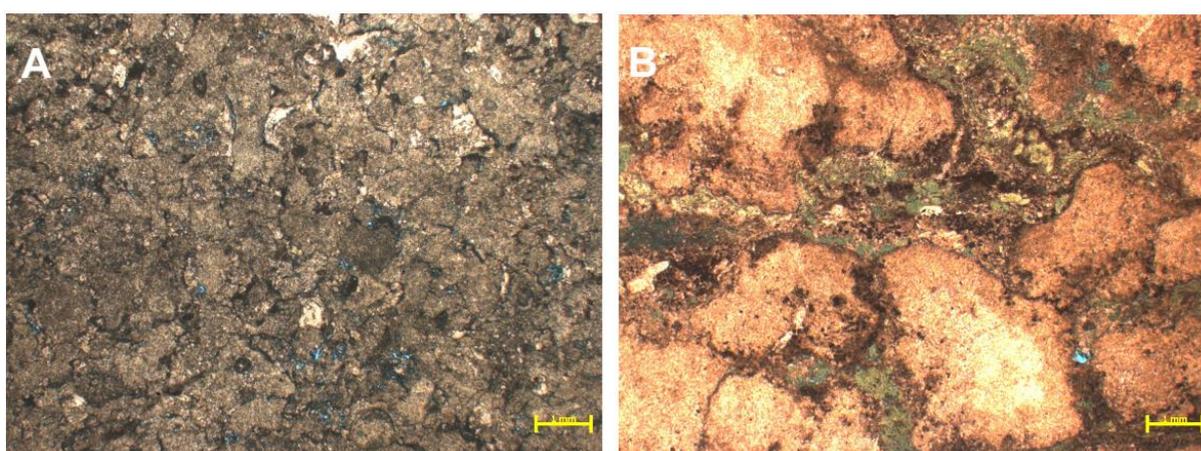


Figura 7.9 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F2B com partículas muito amalgamadas, formando um *framework* compacto, identificam-se alguns contactos suturados (2_5413,85m). **B.** F2BT com as partículas a apresentarem evidências de ocorrência de compactação, identificando-se contactos suturados; presença de fracção argilosa (2_5433,60m).

- **Brechificação** é um processo muito raro ao longo do testemunho 2 (Tab. 7.2), apresentando tipicamente uma intensidade baixa, estando associado principalmente à presença de nódulos/bandas de sílica.

- **Cimentação** é uma constante ao longo do testemunho 2 (Tab. 7.2), sendo um processo que apresenta uma intensidade muito variável, desde baixa a elevada, raramente nula; ocorre com menor intensidade na porção intermédia do testemunho; preferencialmente associado a F2B, F2A e F1 (Fig. 7.10), alguma a F2BT/F3 e, mais raramente, associada a F2B2, F4, F5 e F6.

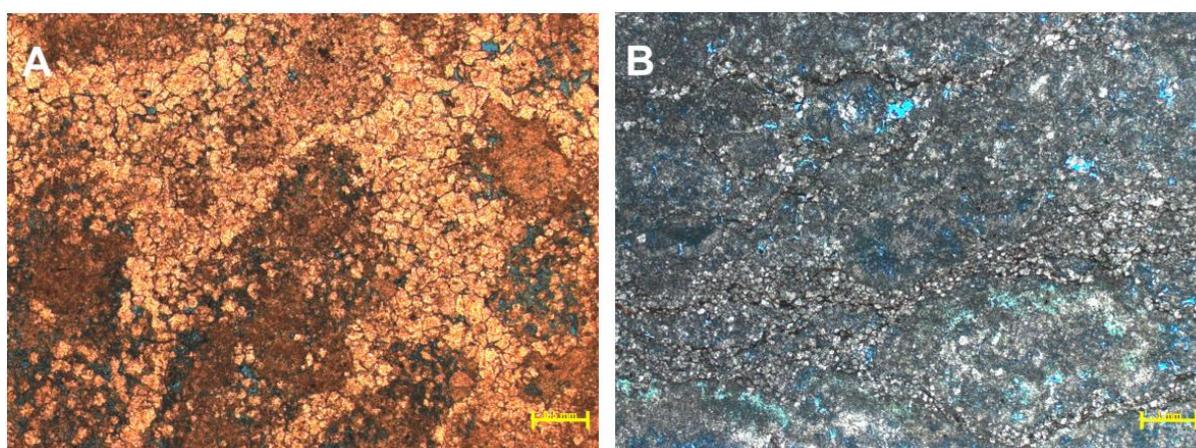


Figura 7.10 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos dos processos diagenéticos nas diferentes fácies (F): **A.** F2B com cimentação dolomítica intensa entre os *shubs*, sendo possível identificar pelo menos duas fases de cimentação distintas (2_5438,95m). **B.** F2B com F2A intersticial e com cimentação dolomítica associada (2_5418,95m).

- **Argilosidade** bastante presente ao longo do testemunho 2 (Tab. 7.2), ocorrendo preferencialmente associada a F2A e F1, eventualmente associada a F2B, F2BT e F4 (Fig. 7.9B).

7.2. Porosidade e a sua afinidade faciológica

7.2.1. Testemunho 1

Relativamente ao testemunho 1, as Fácies 2B, 2BT e 2A são as mais favoráveis ao desenvolvimento de porosidade significativa (em geral, boa a excelente), por vezes (moderada a boa), no entanto a porosidade associada à Fácies 2A é muito variável; as Fácies 3, 5 e 6, por sua vez são as menos favoráveis à ocorrência de porosidade significativa; zonas menos porosas parecem ser controladas preferencialmente pela ocorrência de cimentação, silicificação,

recristalização e, menos recorrentemente, alguma compactação e argilosidade (estes dois últimos são mais influentes na porção inferior do testemunho).

Quanto aos diferentes tipos de porosidade encontrados e a sua afinidade com as diferentes fácies (Tab. 7.3), salientam-se os seguintes aspectos:

- Porosidade do tipo **vuggy (VUG)** é frequente em todas as fácies identificadas no testemunho 1 (Fig. 7.11).

- Porosidade do tipo **interpartícula (BP)** tem afinidade com as Fácies 2B, 3, 5 e 6, pois estas fácies são constituídas maioritariamente por partículas/fragmentos; relativamente à Fácies 2B este tipo de porosidade encontra-se preferencialmente associada à F2B “rendilhada” e “*quasi-F3*”.

- Porosidade do tipo **intrapartícula (WP)** tem afinidade com as Fácies 2B, 2BT, 3, 5 e 6; relativamente à Fácies 2B parece ter maior tendência para as fácies denominadas “deposicionais”, ou seja, F2B compacta/robusta e F2BT (Fig. 7.11).

- Porosidade do tipo **trama de crescimento (GF)** tem afinidade com as Fácies 2B e 2BT; normalmente associada às fácies ditas “deposicionais”, pois nas fácies “diagenéticas” quando ainda é possível identificar a trama, esta corresponde apenas a restos da trama inicial, ou seja, trata-se na verdade de uma “trama fantasma”.

- Porosidade do tipo ***fenestrae e pseudo-fenestrae?* (FE)** tem afinidade com a Fácies 2A (Fig. 7.11).

- Porosidade do tipo **canal (CH)** é frequente em todas as fácies identificadas no testemunho 1, devido à fracturação intensa, verificando-se que muitos dos canais identificados ramificam a partir de fracturas maiores (Fig. 7.11).

- Porosidade do tipo **fractura (FR)** é muito frequente em todas as fácies identificadas no testemunho 1.

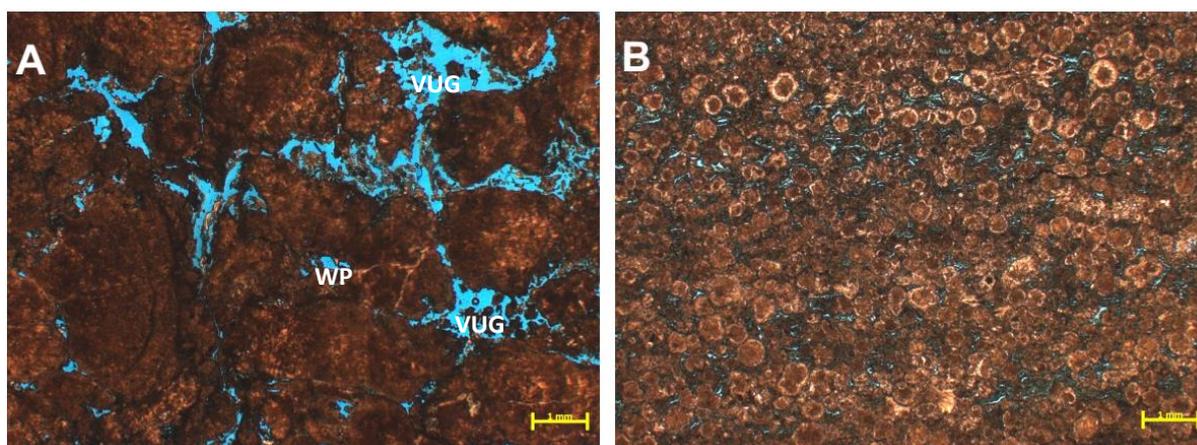


Figura 7.11 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da porosidade em algumas fácies (F): **A.** Porosidade boa, VUG, localmente CH e WP em F2BT (1_5313,35m). **B.** Porosidade baixa, FE e VUG em F2A (1_5319,40m).

Tabela 7.3 – Tabela que mostra os tipos de porosidade mais comuns associados às diferentes fácies, no testemunho 1.

Fácies	Tipos de porosidade mais comuns						
	VUG	BP	WP	GF	FE	CH	FR
F2A							
F2B							
F2BT							
F3							
F5							
F6							

Legenda	
BP	Interpartícula
WP	Intrapartícula
GF	Trama de crescimento
FE	Fenestrae
CH	Canal
FR	Fractura

7.2.1. Testemunho 2

Relativamente ao testemunho 2, as Fácies 2B e 2BT, ambas com passagens da Fácies 3, parecem ser as mais favoráveis ao desenvolvimento de porosidade; a porosidade associada a F2A, ainda que muito variável, é também importante; as Fácies 1, 4 e 5 são as menos favoráveis à ocorrência de porosidade significativa; zonas menos porosas parecem ser controladas preferencialmente pela ocorrência de cimentação, silicificação, recristalização, argilosidade, e menos recorrentemente alguma compactação.

Quanto aos diferentes tipos de porosidade encontrados e a sua afinidade com as diferentes fácies (Tab. 7.4), salientam-se os seguintes aspectos:

- Porosidade do tipo **vuggy (VUG)** é frequente em todas as fácies identificadas no testemunho 2 (Fig. 7.12).

- Porosidade do tipo **interpartícula (BP)** tem afinidade com as Fácies 2B, 2B2, 3, 4, 5 e 6, pois estas fácies são constituídas maioritariamente por partículas/fragmentos; relativamente à Fácies 2B este tipo de porosidade encontra-se preferencialmente associada à F2B “rendilhada” e “quasi-F3”, podendo também ser identificada com alguma regularidade na F2B2 como porosidade inter- (“*micro-shrubs*”) (Fig. 7.12).

- Porosidade do tipo **intrapartícula (WP)** tem afinidade com as Fácies 2B, 2BT, 3, 4, 5 e 6; relativamente à Fácies 2B parece ter maior tendência para estar associada às fácies ditas “deposicionais”, ou seja, F2B compacta/robusta e F2BT.

- Porosidade do tipo **trama de crescimento (GF)** tem afinidade com as Fácies 2B, 2BT e 2B2; normalmente associada às fácies ditas “deposicionais”, pois nas fácies “diagenéticas” quando ainda é possível identificar a trama, esta corresponde apenas a restos da trama inicial, ou seja, trata-se na verdade de uma “trama fantasma” (Fig. 7.12).

- Porosidade do tipo **fenestras e pseudo-fenestras? (FE)** tem afinidade com a Fácies 2A.

- Porosidade do tipo **canal (CH)** tem afinidade com a Fácies 1 e 2A.

- Porosidade do tipo **cavernosa (CV)** tem afinidade com a Fácies 2B, quando esta se encontra muito dissolvida/corroída (Fig. 7.12).

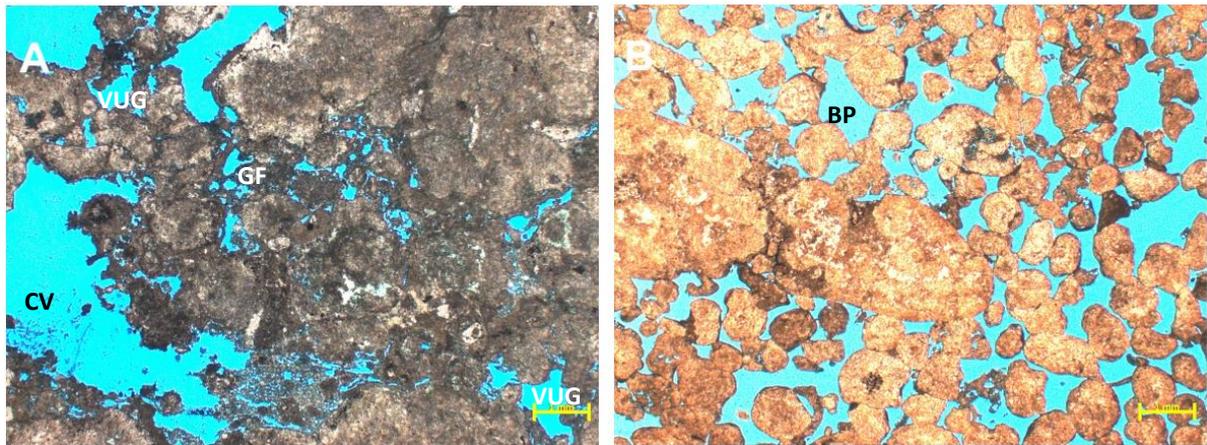


Figura 7.12 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da porosidade em algumas fácies (F): **A.** Porosidade excelente, GF, VUG e CV em F2B (2_5412,35m). **B.** Porosidade excelente BP em F3 (2_5423,65m).

Tabela 7.4 – Tabela que mostra com os tipos de porosidade mais comuns associados às diferentes fácies, no testemunho 2.

Fácies	Tipos de porosidade mais comuns						
	VUG	BP	WP	GF	FE	CH	CV
F1							
F2A							
F2B							
F2BT							
F2B2							
F3							
F4							
F5							
F6							

Legenda	
BP	Interpartícula
WP	Intrapartícula
GF	Trama de crescimento
FE	Fenestrae
CH	Canal
CV	Cavernosa

8. INTERPRETAÇÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS

De acordo com o que já é bem conhecido, através dos trabalhos de diversos autores (*e.g.* Muniz, 2013; Wright & Barnett, 2014, 2015, 2017; Tosca & Wright, 2015; Szatmari & Milani, 2016, Wright & Tosca, 2016), as formações carbonatadas que constituem os reservatórios do PS brasileiro (bacias de Santos e Campos), originaram-se em ambiente deposicional não-marinho, fundamentalmente em lagos alcalinos e de salinidade variável. Estes lagos seriam alimentados por terrenos vulcânicos (Wright, 2012). Segundo Muniz & Bosence (2015), na Bacia de Campos, em alguns sectores do ambiente lacustre podiam associar-se zonas transicionais com leques aluviais de sedimentação terrígena.

No estudo aqui apresentado, o registo paleontológico é fraco; foram apenas identificados alguns ostracodos de pequenas dimensões, maioritariamente carapaças e alguns moldes internos, no entanto destaca-se uma única ocorrência de carófito (girogónito), em níveis associados à Fácies 2A, bem como outros possíveis fragmentos de carófito, ainda que com algumas reservas, o que parece suportar a génese da formação carbonatada em estudo (Fm. Barra Velha) num ambiente deposicional não-marinho. Comparando com outros trabalhos do PS brasileiro (*e.g.* Azerêdo *et al.* 2011b; Muniz & Bosence, 2017), em que os ostracodos aparecem com alguma frequência referidos em diferentes intervalos, a presença de carófitas não era reconhecida.

A maioria das fácies carbonatadas identificadas e caracterizadas apresentam singularidades, no que respeita à sua estrutura, morfologia e textura, sendo muito diferentes das fácies anteriormente conhecidas e documentadas no registo geológico, ou com afinidades morfológicas aparentes com alguns tipos particulares (microbialitos, tufos, travertinos), no entanto é frequente a ausência de sinais inequívocos de génese biótica ou abiótica, deixando uma panóplia de incertezas e questões de debate sobre estas rochas. Os principais focos de dúvida e que podem ser interpretados de diversas maneiras relacionam-se com:

- ❖ **Processos genéticos bióticos e/ou abióticos:** inicialmente, assumiu-se que as unidades carbonatadas tinham, regra geral, génese biótica, sendo classificadas genericamente como microbialitos, o que resultou na adopção generalizada da expressão “Microbialitos do Pré-Sal” (*e.g.* Dias, 2005; Carminatti *et al.*, 2008, 2009; Terra *et al.*, 2010; Wright, 2012). No entanto, trabalhos mais recentes (Wright & Barnett, 2014, 2015) propõem um modelo abiótico para a génese destas rochas carbonatadas baseado em ciclos de raseamento do lago, saturação de elementos (Ca, Mg, SiO₂) e variações de pH da água, sendo fracas as evidências de actividade

microbial. A dificuldade em demonstrar a existência de carbonatos microbianos é um indicador das condições extremas do lago (*e.g.* pH muito elevado), prevalecendo a ideia de que mesmo presentes, as comunidades microbianas não induzem a precipitação de carbonatos como normalmente fazem. Segundo Wright & Barnett (2015), a Fm. Barra Velha parece apresentar fracas evidências de actividade microbial, identificando-se apenas algumas estruturas que se assemelham aos estromatólitos mais clássicos; laminitos microbiais de estrutura planar; oncóides. Através deste estudo foi possível verificar isso mesmo, através da Fácies 2A que apresenta uma estrutura claramente laminada, por vezes, evocando feição estromatolítica, e com várias Fácies (3, 4, 5) a apresentarem oncóides e partículas oncolitizadas na sua constituição. Os travertinos da zona de Tivoli (Itália) apresentam *fabrics* e morfologias semelhantes aos *shrubs* encontrados nos reservatórios do PS, *offshore* do Brasil e Angola (Erthal *et al.*, 2017). Contudo, não se verificam as características normalmente associadas a este tipo de carbonatos, sugerindo-se que as semelhanças texturais com os travertinos abióticos possam reflectir um processo de precipitação semelhante, mas não necessariamente associado ao mesmo ambiente deposicional (Wright & Barnett, 2015). Nos travertinos originados a partir de fontes hidrotermais, é a desgaseificação, enquanto os fluidos são descarregados para a superfície, que desencadeia a precipitação carbonatada, no entanto é rara a presença de estruturas de escape de fluidos nos testemunhos estudados (identificado apenas na caixa 5 do testemunho 2, estando associadas a F1). Segundo Wright & Barnett (2014), não são conhecidos análogos além das bacias contemporâneas do Atlântico Sul, e assumindo uma origem simplesmente microbial para estes carbonatos, seria expectável encontrarem-se outros exemplos no registo estratigráfico. Deve, por isso, ter ocorrido algo bastante incomum neste sistema fechado das bacias do Atlântico Sul, com uma interação única entre características fisiográficas do lago, mas também geoquímicas, climatológicas e eventualmente de algumas comunidades microbiais.

- ❖ **Configuração topográfico-batimétrica dos lagos**, com a existência de dois modelos-padrão: lagos com gradientes margem-zona profunda acentuados e compartimentação em blocos elevados e sub-bacias; lagos pouco profundos de substrato suave e quase uniforme, sem diferenciação pronunciada em sub-sectores (*e.g.* Wright & Tosca, 2016; Wright & Barnett, 2017). Segundo Wright & Barnett

(2017), a Fm. Barra Velha não se terá desenvolvido em plataformas carbonatadas de alto relevo, uma vez que o relevo da base do sal terá origem maioritariamente estrutural e pós-Barra Velha (em termos de origem), não estando relacionado com plataformas de alto relevo e com o lago profundo, sendo a hipótese de ambiente deposicional de lago raso e fechado a mais aceite. Neste estudo os indicadores paleobatimétricos são escassos, no entanto a ocorrência muito frequente de passagens graduais/interdigitações entre as diferentes fácies, sugere uma certa proximidade espacial entre estas.

- ❖ **Esferulitos e questões relacionadas com a sua génese e significado**, dada a ocorrência frequente destes componentes no registo geológico: no PS brasileiro, estes apresentam muitas vezes dimensões superiores a 1mm, e por vezes níveis de espessura decimétrica, características que os diferenciam de outras partículas esferulíticas conhecidas em carbonatos de diversas origens, nomeadamente nos carbonatos tipicamente associados a tapetes microbiais (Wright & Barnett, 2014), ou noutras litologias carbonatadas como é o caso dos travertinos e tufos (Chafetz *et al.*, 2018). A ocorrência destas partículas tanto no seio de uma matriz argilosa (estevensítica), como descrito por diversos autores (*e.g.* Muniz & Bosence, 2015; Wright & Barnett, 2015; Saller *et al.*, 2016), como noutras zonas sem quaisquer indícios da presença desta componente argilosa também levanta algumas questões relacionadas com a sua génese (Chafetz *et al.*, 2018). Numa tentativa de recriação em laboratório da génese destes componentes, Mercedes-Martin *et al.* (2016) perceberam que o mecanismo mais fácil para deposição de esferulitos começa com a existência de uma solução (“sílica-gel”) sobressaturada em silicatos magnesianos, com presença de ácidos orgânicos específicos; mais tarde (Mercedes-Martin *et al.* 2017), concluem que a nucleação dos esferulitos ocorre na interface sedimento-água, em zonas litorais, impulsionada pela alcalinidade elevada, hidroquímica rica em Ca-Mg e presença de substâncias coloidais de origem microbiana. No presente estudo foi possível verificar a ocorrência de bandas evocativas de material precursor do tipo “sílica-gel” associadas a F4 (fácies esferulítica), muitas vezes, com os esferulitos a parecerem “boiar/flutuar” neste “gel matricial”, outras vezes ocorrendo acumulações espessas de F4, que podiam ter ainda alguns restos de fracção argilosa presente. Mais raramente, a “sílica-gel” estava associada a F2A e F2BT, verificando-se que tanto os esferulitos como os “*micro-shrubs*” aparentavam

“flutuar” neste “gel”. Os aspectos mencionados parecem estar de acordo com o postulado em diversos trabalhos (*e.g.* Wright & Barnett, 2014, 2015) nos quais se defende que a geoquímica do lago, com águas muito alcalinas, ricas em Mg, levaria primeiramente à precipitação de minerais de argila magnesianas, mas também à precipitação de géis nos quais nucleariam esferulitos, e a partir dos quais se podem ter desenvolvido os *shrubs* calcíticos, graças a mudanças relativas de pH e da razão Mg/Ca na água. Segundo Wright & Barnett (2014), estas variações de pH no lago, quando mais acentuadas, dão origem ao crescimento de nódulos de sílica, sugerindo que a diminuição do pH acabe por desencadear a precipitação de sílica, num meio mais ácido. Neste estudo verificou-se a ocorrência, frequente, de nódulos de sílica a formar uma espécie de “capinha” na parte superior da estrutura das Fácies 2B/2BT, o que pode marcar essa cessação de crescimento das estruturas calcíticas por mudança de pH do meio, e crescimento de nódulos (“capinhas”) de sílica. Segundo Rogerson *et al.* (2017), os depósitos carbonatados lacustres com fácies esferulíticas apesar de pouco entendidos, representam a chave para se perceber a importância económica das unidades mesozóicas do PS no Atlântico Sul. Uma grande barreira para o estudo desta fácies únicas e espectaculares, prende-se com o facto de existirem poucos análogos e afloramentos de depósitos lacustres com uma componente esferulítica tão importante.

Tendo em conta os trabalhos anteriormente referenciados e uma vez que o principal foco deste trabalho passa pela caracterização faciológica e diagenética, não se irá propor um possível modelo do ambiente deposicional das unidades carbonatadas de acordo com as diferentes fácies identificadas, ainda que não se possam negligenciar alguns aspectos importantes reconhecidos e que mesmo sem entrar em estudos pormenorizados permitem corroborar, do ponto de vista geral, que o sector da secção em foco terá persistido num ambiente lacustre predominantemente alcalino, com algumas variações de pH, salinidade e eventualmente do nível de base/da coluna de água, ainda que neste caso se trate de uma variação pouco acentuada, tendo-se mantido um meio relativamente pouco profundo.

A combinação do estudo macroscópico (testemunho) com o estudo microscópico (lâmina delgada) foi crucial para a interpretação e integração dos resultados faciológicos e diagenéticos, e para perceber como a diagénese influenciou as características actualmente verificadas nas litofácies identificadas.

No que respeita aos **processos diagenéticos** e à **argilidade**, e à forma como estes se relacionam com as diferentes fácies, destaca-se que:

- ❖ A **silicificação** está muito presente nos dois testemunhos; associada preferencialmente a F2A e F2B sob a forma de nódulos/bandas, F3, F5 e F6 como cimento, F1 e F4 como laminações/bandas; esferulitos muitas vezes silicificados; contactos de transições entre fácies por vezes silicificados; forma possíveis “capinhas siliciosas” que marcam o final do crescimento de *shrubs* calcíticos.

- ❖ A **dolomitização** é um processo que ocorre com maior frequência no testemunho 2, e também com maior intensidade, quando comparado com o testemunho 1; está principalmente associada às Fácies 2A, 2B, 3, 5 e 6, apresentando um impacto algo variável - por um lado pode fechar zonas porosas quando ocorre de forma mais intensiva e/ou como cimento; no entanto, dada a sua susceptibilidade a favorecer eventuais processos de dissolução, pode também gerar porosidade; assim sendo, considera-se que este processo é muito dependente da combinação com outros processos diagenéticos, assim como do seu tempo de actuação e intensidade.

- ❖ A **recristalização** é um processo que ocorre com frequência na maioria das fácies, facto que poderá estar relacionado com o aumento da profundidade e da temperatura.

- ❖ A **fracturação** também é um processo com comportamentos distintos nos dois testemunhos estudados, estando muito presente no testemunho 1, com várias famílias de fracturas, que se exibem preferencialmente abertas, por vezes, parcialmente abertas. No testemunho 2 ocorre normalmente associado a bandas/nódulos silicificados e a bandas de precipitação tardia de carbonatos. Este processo pode estar associado ao intenso falhamento que ocorreu na região resultado do processo extensional que deu origem à bacia; numa fase mais tardia, pode ser também resultado da descompressão local devido à movimentação do sal (halocinese).

- ❖ A **dissolução** parece, muitas vezes, associada à ocorrência de fracturação, principalmente no testemunho 1; estas fracturas podem ter funcionado como corredores preferenciais de percolação de fluidos que promovem a ocorrência de

dissolução, devido às suas características corrosivas. Apesar de ser um processo que ocorre com maior frequência associado às Fácies 2B, 2BT, 2B2, 2A e 3, sugere-se que a ocorrência de dissolução seja principalmente controlada pela assinatura diagenética inicial, e não pelas litofácies (*e.g.* nas zonas silicificadas este processo é muito menos eficiente do que quando ocorre em zonas dolomitizadas, que são mais susceptíveis). As Fácies 1, 4, 5 e 6 foram as menos susceptíveis a sofrer processos de dissolução, encontrando-se frequentemente cimentadas, silicificadas, recristalizadas e, por vezes, com alguma compactação associada. Sugere-se que estas fácies possam funcionar, muitas vezes, como barreiras/selos ao fluxo dos hidrocarbonetos, no entanto estas também podem funcionar como zonas de canalização da progressão lateral dos fluidos, ou seja, canalizando-os e acumulando-os em fácies mais susceptíveis (e por isso, mais porosas) que sejam lateralmente próximas.

- ❖ A **desdolomitização** é um processo pouco presente, sendo mais evidente em litofácies que tenham sido alvo de dolomitização intensa.
- ❖ A **compactação** é um processo com registos diferentes; ocorre com alguma frequência no testemunho 1, mas está menos presente no testemunho 2. Restringe-se quase exclusivamente à compactação mecânica, sendo possível perceber que existem fácies mais susceptíveis a este processo diagenético do que outras, normalmente, está associada às fácies de textura granulo-suportada (*grainstones* e *packstones*), que são as fácies dominantes no testemunho 1. No entanto, para além do controlo imposto pelas fácies-tipo, sugere-se também um certo controlo da assinatura diagenética inicial das fácies, pois a ocorrência de cimento é um agente inibidor da ocorrência de compactação.
- ❖ A **cimentação** é um processo muito comum em ambos os testemunhos, identificando-se cimentos micríticos, calcíticos, dolomíticos e siliciosos. Associa-se por norma e como expectável às fácies granulo-suportadas, eventualmente também a F2A e F2B. E como já foi anteriormente referido pode influenciar outros processos diagenéticos.

- ❖ A **argilosidade** apresenta frequências distintas nos dois testemunhos estudados, verificando-se que no testemunho 1 a componente argilosa é menos significativa, enquanto no testemunho 2 a componente argilosa é muito importante. Está, normalmente, associada às Fácies 1 e 2A, podendo também associar-se às Fácies 2B, 3 e 4.

Quanto ao *timing* de actuação destes processos apresenta-se em seguida um quadro no qual se relacionam os diferentes estágios diagenéticos, com os processos diagenéticos e os respectivos ambientes diagenéticos (Fig. 8.1).

Estágios diagenéticos	Processos diagenéticos	Ambientes diagenéticos		
		Meteórico vadoso	Meteórico freático	Soterramento
Eodiagéne	Dissolução	.....	
	Cimentação	.....	
	Dolomitização		.....
	Silicificação		.....
Mesodiagéne	Recristalização		.....
	Dissolução		.....	.....
	Dolomitização (?)		.....
	Cimentação		.....
	Fracturação (?)			.....
Telodiagéne	Dissolução		.....
	Fracturação		.....
	Dolomitização (?)		.....
	Silicificação (?)		.....

Figura 8.1 – Quadro com a cronologia relativa dos processos diagenéticos nos dois testemunhos.

Da análise sedimentológica efetuada, fica clara a actuação multifásica de fluidos com diferentes características, frequentemente corrosivos, mas noutros casos, promotores tanto de processos de recristalização como de dolomitização (para além da provável génese precoce de dolomite *quasi*-primária a partir das águas do lago), quer ainda, possivelmente de silicificação (para além, igualmente, da provável precipitação de sílica a partir das águas do lago, quando as condições de pH fossem favoráveis). Sugere-se que estes fluidos possam ter aproveitado a

presença de fracturas para canalizar o seu fluxo, podendo-se pensar também que a percolação de óleo nos reservatórios tenha ocorrido da mesma maneira. Assim sendo, zonas próximas de fracturas, ou zonas muito fracturadas, podem ser mais susceptíveis à ocorrência de processos diagenéticos influenciados pelas características dos fluidos percolantes. Esta influência talvez seja mais notória no testemunho 1, que apresenta fracturação importante, enquanto que o testemunho 2 não apresenta grandes evidências da ocorrência deste processo.

A origem dos fluidos pode estar relacionada com a actividade vulcânica que ocorreu nesta área durante a evolução extensional associada à génese da bacia, tal como descrito por Moreira *et al.* (2007). As características químicas dos fluidos circulantes (enriquecidos em elementos/iões: Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^-), fruto de emissões vulcânicas fissurais e/ou reacções de alteração do substrato vulcânico. Podem também existir fluidos que se relacionem com a actividade hidrotermal (ainda que não existam sinais inequívocos para aferir esta hipótese), e que terão sido responsáveis pelos processos de dolomitização, silicificação e dissolução/corrosão identificados.

8.1. Fácies deposicionais *versus* fácies diagenéticas

Sugere-se que a **diagénese** tenha tido um papel fundamental nas características actualmente evidenciadas nas fácies carbonatadas.

A Fácies 2B é a que apresenta um leque de características morfológico-estruturais mais diversificado (Fig. 8.2), e que se sugere estarem associadas à sua génese, preferencialmente deposicional ou diagenética (*vide também Azerêdo et al.*, 2018):

- ❖ **Fácies deposicionais** – F2B “maciça”, apresenta uma estrutura maciça, compacta/aglomerada, pouco organizada, sem grande edificação aparente; F2BT, apresenta-se claramente edificada, com *shrubs* organizados e bem desenvolvidos; F2B2, apresenta “*micro-shrubs*” com um certo alinhamento, evidenciando alguma organização.

- ❖ **Fácies diagenéticas** – F2B “rendilhada”, apresenta uma estrutura bastante dissolvida/corroída, formando uma espécie de renda/rede em que as partículas carbonatadas se encontram ligadas, muitas vezes, por “pontes” micríticas/dolomíticas; F2B “*quasi-F3*”, apresenta uma estrutura ainda mais dissolvida/corroída, com as partículas a estarem ligadas apenas por contactos pontuais, por vezes, algumas “pontes” dolomíticas.

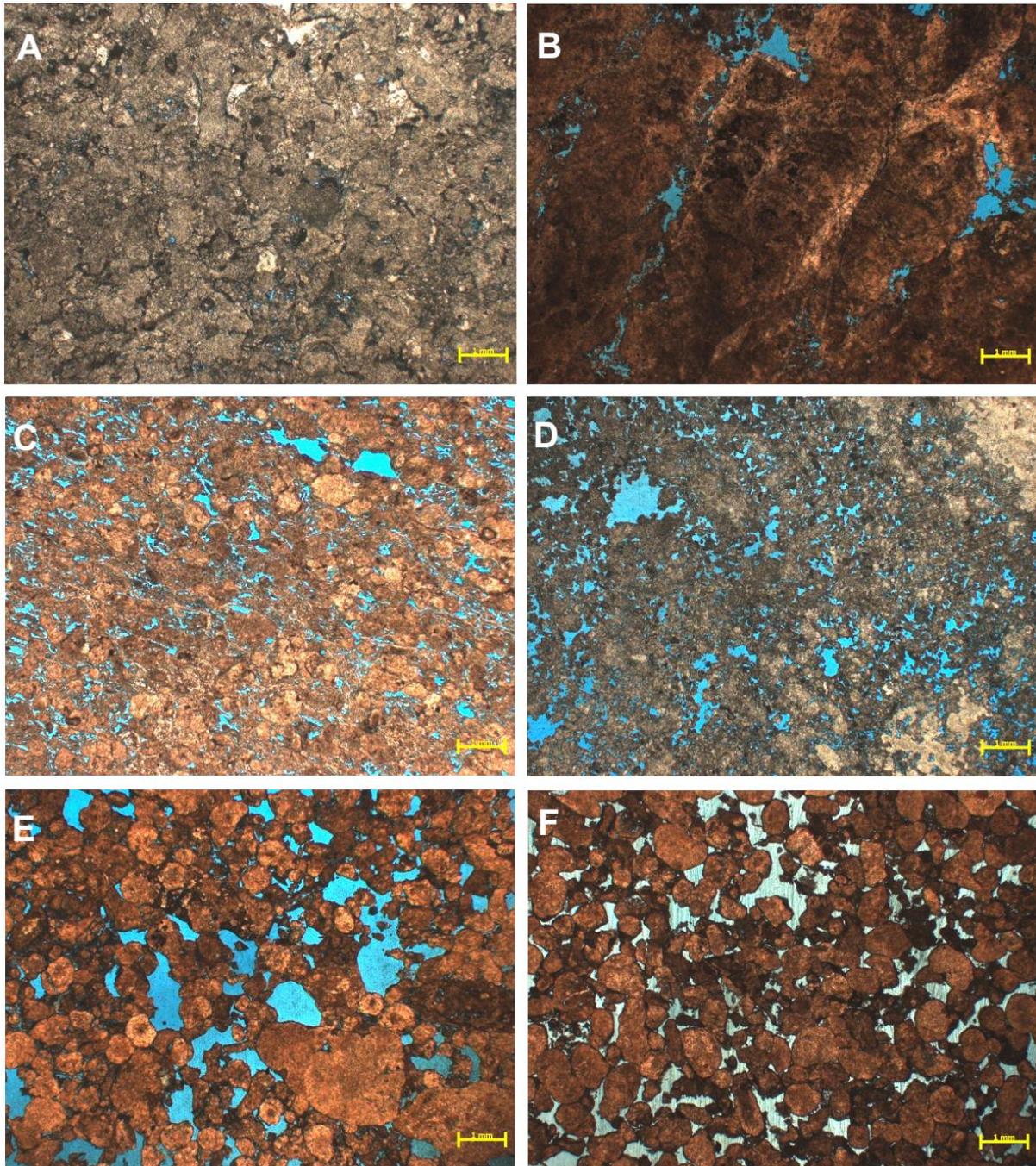


Figura 8.2 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da variedade morfológico-estrutural associada à Fácies 2B: **A.** F2B “maciça”, compacta/aglomerada e sem edificação aparente (2_5413,85m). **B.** F2BT com uma estrutura claramente edificada, *shrubs* organizados e bem desenvolvidos (2_5420,80m). **C.** F2B2 com os “*micro-shrubs*” a apresentarem um certo alinhamento, evidenciando alguma organização. (2_5433,30m). **D.** F2B “rendilhada”, com a estrutura bastante dissolvida/corroída, formando uma espécie de renda/rede, e as partículas carbonatadas encontram-se ligadas por o que parecem ser “pontes” dolomíticas (2_5409,10m). **E.** F2B “*quasi-F3*”, com uma estrutura muito dissolvida/corroída, as partículas encontram-se ligadas apenas por contactos pontuais e algumas “pontes” dolomíticas (2_5431,45m). **F.** F3 com uma estrutura muito dissolvida/corroída, identificando-se ainda algumas partículas ligadas por contactos pontuais e algumas “pontes” dolomíticas (2_5428,00m).

A continuação da actuação dos processos diagenéticos (dissolução/corrosão), nas fácies ditas “diagenéticas”, leva ao desenvolvimento da Fácies 3 (Fig. 8.2), uma vez que esta não parece corresponder a uma textura granulo-suportada deposicional. Ou seja, não parece resultar de deposição e cimentação de material granular mobilizado, mas sim de um pseudo-*fabric* desse tipo, adquirido diageneticamente, ao longo de diferentes estágios de evolução da dissolução, pelo esboroamento e dissolução/corrosão dos *shrubs* das Fácies 2B, 2BT e, eventualmente 2B2 (Fig. 8.3) - resultando em *grainstones/packstones* (e seus equivalentes mais grosseiros) diagenéticos e não deposicionais (Azerêdo *et al.*, 2018). Algumas evidências que parecem suportar esta interpretação são:

- ❖ Disposição sugestiva da pré-existência de uma certa estruturação/organização primária, ou seja, de uma “trama fantasma” elaborada *in-situ*, independentemente dos processos envolvidos serem bióticos ou abióticos (Fig. 8.2D e 2E).
- ❖ Observa-se frequentemente a passagem progressiva das Fácies 2B e 2BT, mais robustas, para a Fácies 2B mais finamente estruturada e bastante corroída (“rendilhada”; “*quasi-F3*”); e, como estágio mais avançado de dissolução e esboroamento, à textura residual que origina a Fácies 3 (Fig. 8.2).
- ❖ Existência clara de pontes intergranulares, constituídas por micrite ou por mosaico cristalino de cristais romboédricos de dolomite, as quais sugerem ser o que ficou diageneticamente preservado do material matricial original, provavelmente associação F2B/F2A, pois são frequentes também na F2A.

A definição da génese da Fácies 3 (Fig. 8.3) pode ser muito relevante para a dedução da distribuição espacial expectável dos diferentes tipos de reservatório (Azerêdo *et al.*, 2018).

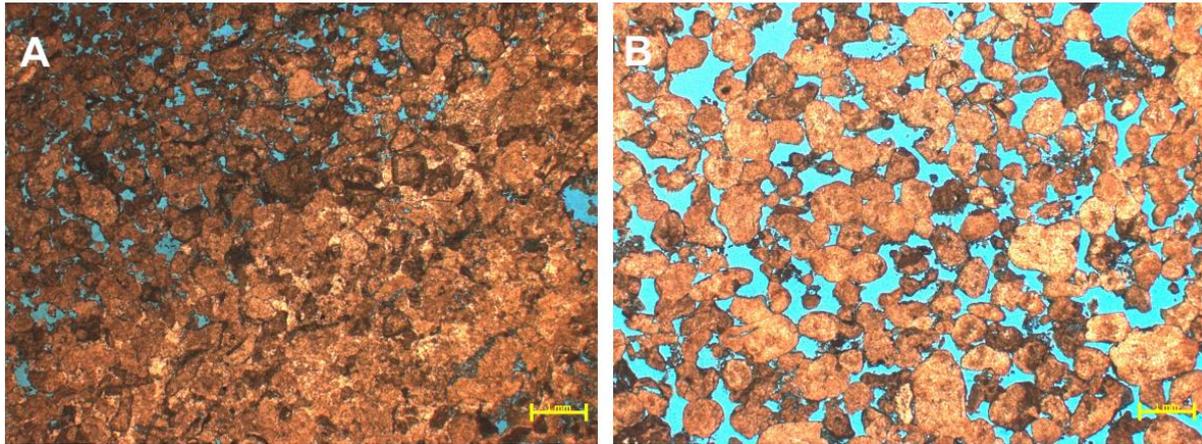


Figura 8.3 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da possível origem da Fácies 3: **A.** F2B “maciça”, compacta/aglomerada e sem edificação aparente e passagem para uma zona superior com F2B “quasi-F3” e F3 (2_5432,05m). **B.** F3 representado por um *grainstone* composto por partículas carbonatadas, provavelmente o que resta de uma Fácies 2B “maciça” (2_5423,95m).

8.2. Tipologia da porosidade *versus* qualidade do reservatório

Segundo Wright & Tosca (2016), as unidades com *shrubs* são as que apresentam a melhor qualidade para reservatório. Neste estudo verificou-se que as Fácies 2B e 2BT são realmente as mais favoráveis em termos de porosidade e, portanto, as que apresentam melhor qualidade para fácies reservatório. A Fácies 2B2 apresenta, no geral, porosidade relativamente mais baixa que as duas fácies anteriores, já as Fácies 2A e 3 apresentam porosidade bastante variável, com grande influência dos processos de dissolução. As Fácies 5 e 6 também apresentam alguma variabilidade mas, no geral, a porosidade associada a estas fácies é baixa. As fácies menos porosas são as Fácies 1 e 4.

No que respeita à porosidade e à sua relação com as diferentes fácies identificadas e caracterizadas neste estudo:

- ❖ As fácies mais porosas apresentam evidências de geração de intensa porosidade do tipo *vuggy* (**VUG**) (Fig. 8.4), com a Fácies 2B a apresentar frequentemente *vugs* de maiores dimensões, resultando na ocorrência de porosidade do tipo **cavernosa** (**CV**). Este tipo de porosidade é o mais comum em todas as fácies, provavelmente sugerindo-se que não seja *facies-selective*.
- ❖ Os tipos de porosidade, **interpartícula** (**BP**) e **intrapartícula** (**WP**), são também muito frequentes (Fig. 8.4)., apresentando uma certa afinidade de ocorrência nas fácies granulo-suportadas, apesar de ocorrerem também associadas às Fácies 2B,

2BT e 2B2, sugerindo-se uma possível relação com as diferentes susceptibilidades das partículas à ocorrência de dissolução. Existem evidências de associação preferencial da porosidade do tipo interpartícula às fácies “diagenéticas” de 2B, ou seja, F2B “rendilhada” e F2B “*quasi-F3*”, enquanto que a porosidade do tipo intrapartícula se associa às Fácies 2B “maciça” e 2BT.

- ❖ A porosidade do tipo **trama de crescimento (GF)** está normalmente associada às Fácies 2B, 2BT e 2B2 (Fig. 8.4), no entanto, no que respeita à Fácies 2B, não parece ocorrer nas fácies denominadas “diagenéticas”, pois nestas apenas resta uma “trama fantasma”, ou seja, este tipo de porosidade é menos evidente quando o grau de dissolução/corrosão é muito elevado.
- ❖ A Fácies 2A caracteriza-se por apresentar uma grande heterogeneidade em termos de porosidade/permeabilidade, com a porosidade a ser frequentemente do tipo *fenestrae* e *pseudo-fenestrae* (**FE**) (Fig. 8.4), ou do tipo canal, paralela às laminações, resultando em diferenças na porosidade efectiva, maior numa determinada orientação, favorecendo a canalização dos fluidos em determinada direcção, daí as diferenças de porosidade/permeabilidade verticais e horizontais associadas a esta fácies. Muitas vezes associada a esta fácies ocorre fracção argilosa, o que também pode prejudicar a porosidade, no entanto, tal como constatado neste estudo e, segundo Wright & Barnett (2014), a fracção argilosa é mais facilmente dissolvida, restando um *pseudo-fenestrae* (porosidade) e pontes dolomíticas, para além dos *rhombs*. Por vezes, na Fácies 2B2 também é possível identificar-se porosidade do tipo *fenestrae* (talvez devido a possíveis condicionamentos da coluna de água?).
- ❖ A porosidade do tipo **canal (CH)** parece ser *fabric-selective*, muitas vezes, relacionada com a dissolução preferencial tardia de cimento pré-existente ou da matriz, com afinidade de ocorrência associada às Fácies 1 e 2A. Sugere-se que este tipo de porosidade também possa estar associado à ocorrência de fracturação, com os canais a constituírem ramificações das famílias de fracturas/falhas principais.
- ❖ A porosidade do tipo **fractura (FR)** identifica-se preferencialmente no testemunho 1 afectando todas as fácies, não sendo *facies-selective*. No testemunho 2, a

fracturação parece associada a bandas de carbonatação tardias, e a zonas silicificadas.

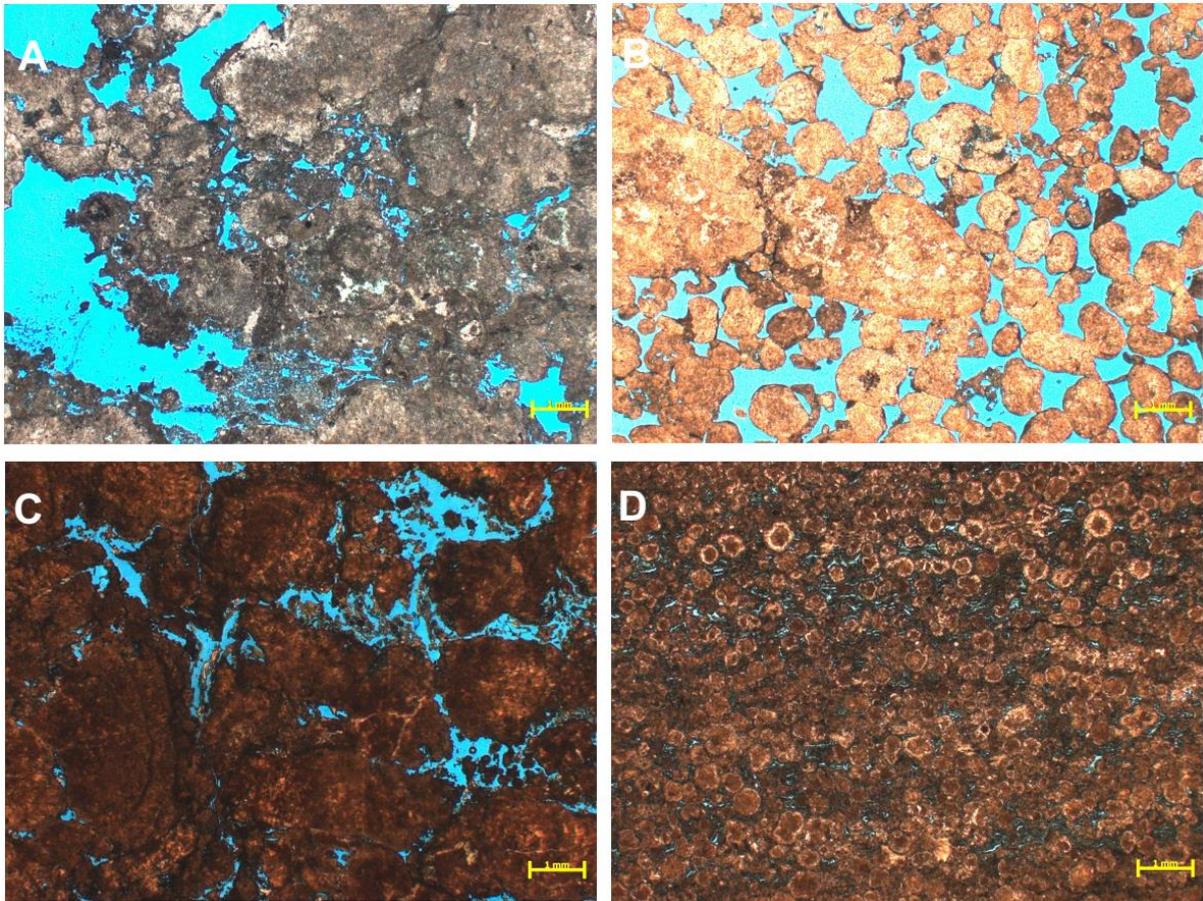


Figura 8.4 – Fotomicrografias das unidades estudadas mostrando exemplos representativos da porosidade nas fácies (F) mais porosas: **A.** Porosidade excelente, GF e VUG em F2B (2_5412,35m). **B.** Porosidade excelente BP em F3 (2_5423,65m). **C.** Porosidade boa, VUG, localmente CH e WP em F2BT (1_5313,35m). **D.** Porosidade baixa, FE e VUG em F2A (1_5319,40m).

As zonas de porosidade mais elevada, parecem ser aquelas em que se identificaram, predominantemente, processos de dissolução, fracturação e dolomitização, enquanto que os intervalos com menor expressão em termos de porosidade parecem estar associados a zonas em que os processos dominantes foram a cimentação, silicificação, recristalização, compactação e/ou presença de fracção argilosa.

A heterogeneidade identificada nestes reservatórios carbonatados associa-se à presença frequente de F2A intersticial na trama de outras fácies, especialmente na Fácies 2B, assim como a presença de intercalações/lentículas milimétricas ou centimétricas de fácies mais fechadas (F3, F4, F5 e F6), mas também devido à ocorrência relativamente frequente de alguma componente argilosa, resultando em anisotropias frequentes e irregularmente distribuídas.

Tendo em conta a grande influência da diagénese nas propriedades das rochas importantes no estudo de reservatórios, nomeadamente, porosidade e permeabilidade, sugere-se que os reservatórios carbonatados sejam reservatórios essencialmente diagenéticos (isto, segundo a classificação proposta por Ahr, 2008).

8.3. Interação do CO₂ com o reservatório

Outra questão que é necessário ter em consideração quando se trabalha no PS brasileiro, é a presença de CO₂ nos reservatórios, que na BS tem papel de destaque, principalmente nos poços em foco neste estudo, onde as concentrações são acima da média (Gaffney, Cline & Associates, 2010). O excesso de CO₂ nos reservatórios pode eventualmente conduzir à formação de porosidade secundária, devido à reacção entre este gás e os fluidos percolantes, algo que pode estar relacionado com a importante dissolução identificada nos testemunhos estudados. No entanto, sem certezas quanto a esta causa-efeito, pois para isso seriam necessários outro tipo de estudos. Na verdade estas concentrações de CO₂ podem ter vários efeitos nos reservatórios, podendo contribuir para a formação de HCO₃⁻, aumentando assim a alcalinidade do meio, e favorecendo a precipitação de carbonato, ou por outro lado caso o CO₂ se mantenha dissolvido num fluido, pelo menos em certo intervalo de concentrações, tornará esse fluido mais ácido e assim, mais corrosivo, originando porosidade por dissolução e potenciando a ocorrência de silicificação, pois a acidez do meio também favorece a precipitação de sílica.

Ou seja, apesar de não se poder dizer com certezas qual a influência directa de quantidades anómalas de CO₂ nos reservatórios, sugere-se, com alguma reserva, que a dissolução intensa e a ocorrência de silicificação nas unidades carbonatadas possam ser em parte produto da grande presença deste gás.

9. CONCLUSÕES

No presente trabalho de análise sedimentológica e faciológica de dois poços (poços 1 e 2), com foco nos reservatórios carbonatados da Formação Barra Velha, enquadrada no Pré-Sal da Bacia de Santos, foram identificadas e caracterizadas 6 fácies principais (F1, F2, F3, F4, F5 e F6), com alguns subtipos associados à Fácies 2, que apresenta um conjunto de morfologias específicas diversas, (ao contrário das restantes fácies, das quais se diferenciam as Fácies 2A, 2B, 2BT e 2B2), tendo-se definido: **Fácies 1 (F1)**, calcário argiloso com estrutura laminada fina incipiente a nítida, existindo um predomínio de laminações silto-argilosas; **Fácies 2 (F2)**, calcário fundamental ou predominantemente formado por estruturas *in-situ* interligadas, com um conjunto de morfologias específicas diversas: Fácies 2A (F2A), estrutura claramente laminada (planar, ondulante, crenulada), por vezes evocando feição estromatolítica, podendo incluir intercalações grumosas ou micropeloidais e pequenos esferulitos; Fácies 2B (F2B), estrutura colunar/arborescente/digitiforme, que pode ser ramificada (denominação geral *shrubs*); Fácies 2BT (F2BT), estrutura colunar/arborescente/digitiforme, que pode ser ramificada, definidora desta F2 bastante bem desenvolvida e preservada, exuberante (T=típica); Fácies 2B2 (F2B2), estrutura do tipo “*micro-shrubs*”, em que estes parecem apresentar uma orientação/disposição preferencial planar, definindo bandas; **Fácies 3 (F3)**, *grainstones* e *packstones* (mais raramente *rudstones/floatstones*) intraclásticos, sendo estes desde clastos bem definidos a fragmentos irregulares, de dimensões variadas e maioritariamente correspondendo às estruturas constituintes da F2B; **Fácies 4 (F4)**, *grainstones* e *packstones* esferulíticos, cujos elementos são, portanto, exclusiva ou predominantemente esferulitos; **Fácies 5 (F5)**; *grainstones* e *packstones* (mais raramente *rudstones*) exibindo evidências claras de retrabalhamento, sendo compostos por intraclastos frequentemente escuros, com arranjo textural heterogêneo, mas, em geral, compacto; **Fácies 6 (F6)**, *grainstones/rudstones* e *packstones/floatstones* oncolíticos, englobando oncóides bem individualizados, grãos e estruturas oncolitizadas e elementos agregados, incluindo zonas de estrutura laminar, com intraclastos associados e, mais raramente, pelóides.

No que respeita à Fácies 2B, esta apresenta um leque de características morfológico-estruturais bastante diversificado, sendo possível diferenciar fácies “deposicionais” (F2B “maciça”, F2BT, F2B2) e fácies “diagénéticas” (F2B “rendilhada”, F2B “*quasi-F3*”). Verificou-se a ocorrência de transições subtis a claras de F2B “maciça”, eventualmente F2BT ou F2B2, para estruturas mais finas e menos compactas, denominadas fácies “diagénéticas” e interpretadas como estágios graduais de dissolução/corrosão da fácies original. O maior

desenvolvimento dos processos de dissolução e fragmentação deixam um *fabric* residual composto por clastos, onde ainda é possível identificar uma “trama fantasma”, naquilo que foi definido como Fácies 3.

Note-se que as fácies “diagenéticas” não integram o quadro de fácies de forma individualizada, englobando-se no conjunto da Fácies 2B, pois sugere-se que estas fácies representem “estágios de evolução diagenética” da Fácies 2B, eventualmente 2BT ou F2B2; no entanto, nem sempre é fácil reconhecer em que “estágio” se encontram estas fácies, acabando por ser mais fácil reconhecer os dois extremos desta evolução diagenética (F2B e F3). Esta interpretação, juntamente com outras singularidades identificadas neste estudo, aumentam as questões de terminologia e classificação das fácies associadas do PS brasileiro, desafiando as nomenclaturas convencionais.

O sector da secção em estudo parece ter persistido num ambiente lacustre predominantemente alcalino, com algumas variações de pH, que terão permitido a formação de argilas magnesianas, a nucleação de esferulitos, o crescimento/desenvolvimento de *shrubs* calcícticos e a ocorrência de nódulos de sílica. Possivelmente lagos de salinidade variável, pouco profundos e alimentados por terrenos vulcânicos, que influenciaram as características químicas dos fluidos circulantes. Estão ausentes quaisquer sinais inequívocos de génese biótica ou abiótica dos carbonatos, podendo estes carbonatos resultar da actuação conjunta destes dois processos, eventualmente com um a poder apresentar maior ascendente que outro. Verificou-se também a ocorrência de esferulitos, com características claramente diferentes das normalmente encontradas nos esferulitos mais comuns, estando frequentemente associados a um material que sugere uma espécie de “sílica-gel”, podendo a sua génese estar relacionada com a hidroquímica muito peculiar do lago.

Como seria expectável num estudo no qual estão em causa unidades carbonatadas, verificou-se a complexa evolução diagenética destas unidades, o que resultou numa grande heterogeneidade dos reservatórios carbonatados analisados. A combinação complexa entre variações faciológicas de alta frequência, a influência das texturas deposicionais e da diagénese multifásica terão levado às características bastante particulares evidenciadas actualmente nestes reservatórios. No entanto, sugere-se que os processos diagenéticos terão tido um papel fundamental no controlo da porosidade/permeabilidade, mais do que as fácies deposicionais, tendo em conta a grande importância destes processos no estabelecimento dos estágios de evolução diagenética da Fácies 2B, que tal como foi sugerido, culminam na fácies “residual”

F3; mas também na grande diversidade de características associadas às Fácies 2A e 3, que consoante os processos diagenéticos que actuaram nestas fácies, podem apresentar porosidades muito favoráveis, ou por outro lado, porosidade mais baixas. Os processos diagenéticos mais importantes no estabelecimento de condições de porosidade favoráveis foram a dissolução, fracturação e eventualmente a dolomitização, enquanto que os processos mais importantes para condições de porosidade desfavoráveis foram a cimentação, silicificação, recristalização e compactação; aos quais se associa também a argilosidade.

A aparente ciclicidade das fácies identificadas neste estudo, sugerindo uma certa ritmicidade paleoambiental do sistema lacustre, também foi responsável pela grande heterogeneidade identificada nestas unidades carbonatadas, sendo frequente a ocorrência de F2A intersticial na trama de outras fácies, especialmente na Fácies 2B, assim como pela presença frequente de intercalações/lentículas milimétricas ou centimétricas de fácies mais fechadas (F3, F4, F5 e F6), o que resultou em anisotropias frequentes e irregularmente distribuídas.

No entanto, distinguem-se alguns padrões comuns que levam a crer que as Fácies 2B e 2BT são as que apresentam melhores condições de porosidade e, por isso, um melhor potencial como fácies reservatório. A Fácies 2B2 apresenta, no geral, porosidade relativamente mais baixa que estas duas fácies, no entanto também apresenta boas indicações ao nível da porosidade, as Fácies 2A e 3, apresentam grandes variações laterais/verticais em termos de porosidade. Os tipos de porosidade mais frequentemente identificados foram o tipo VUG, BP, WP, GF, eventualmente FR.

Tendo em conta a grande influência da diagénese nas propriedades das rochas, importante no estudo de reservatórios, nomeadamente, porosidade e permeabilidade, sugere-se que os reservatórios carbonatados sejam reservatórios essencialmente diagenéticos (segundo a classificação de Ahr, 2008).

Este estudo destaca o papel fundamental da análise detalhada de testemunhos a diferentes escalas, desde a microscópica à macroscópica, na previsão espacial da distribuição das características do reservatório, tendências de porosidade, padrões de litofácies e na qualidade dos reservatórios, o que pode ser bastante útil em situações semelhantes de prospecção/exploração complexas.

Contudo, a margem de progresso ainda é grande e acredita-se justificar o desenvolvimento de trabalhos pormenorizados de especialidade como o aqui apresentado.

10. BIBLIOGRAFIA

- Abelha, M.** (2017). Bacia de Santos: Sumário geológico e áreas em oferta. Superintendência de definição de blocos (SDB), ANP, 3ª Rodada do Pré-Sal.
- Ali, S. A., Clark, W. J., Dribus, J. R.** (2010). Diagenesis and reservoir quality. *Oilfield Review Summer*, Schlumberger, v. 22, no. 2, p. 14-27.
- Ahr, W. M.** (2008). *Geology of carbonate reservoirs: The identification, description and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks*. John Wiley & Sons, 269 p.
- Azerêdo, A. C.** (1993). Jurássico Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica): Análise de fácies, micropaleontologia, paleogeografia. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 366 p. Inédito.
- Azerêdo, A. C.** (2016). Apontamentos das aulas teóricas da cadeira de Caracterização de Reservatórios. Ano lectivo 2015/2016. Inédito.
- Azerêdo, A. C., Duarte, L. V., Baptista, R., Vieira, S. G., Martins, M. Olho-Azul** (2011a). Microbialites from rift and sag systems: New insights into terminological and classification issues? EGU General Assembly 2011, Vienna, April/2011, Geophysical Research Abstracts, 13, EGU2011-7473.
- Azerêdo, A. C., Inês, N. F., Duarte, L. V.** (2011b). Projecto “Estudo de ambientes deposicionais e processos diagenéticos em reservatórios carbonatados”. Relatório final (confidencial). Acordo de cooperação GALP – CeGUL/FCUL – IMAR/UC, 97 p. (+ 6 anexos).
- Azerêdo, A. C., Silva, A. P., Duarte, L.V., Martins, M. Olho-Azul** (2018). Distinguishing depositional from diagenetic facies: a crucial step towards understanding unconventional carbonate reservoirs like the complex Brazil Pre-Salt. EGU General Assembly 2018, Vienna, April/2018, Geophysical Research Abstracts, Geophysical Research Abstracts, 20, EGU2018-19032, 2018.
- Cainelli, C. & Mohriak, W. U.** (1999). Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the eastern Brazilian continental margin. *Episodes*, v. 22, no. 3, p. 206-216.
- Carlotto, M. A., Silva, R. C. B., Yamato, A., Trindade, W. L., Moreira, J. L. P., Fernandes, R. A. R., Ribeiro, O. J. S., Gouveia Jr., W. P., Carminati, J. P., Qicai, D., Junfeng, Z., Silva-Telles Jr., A. C.** (2017). Libra: A newborn giant in the Brazilian Pre-Salt province. *In: Merrill, R. K., Sternbach, C. A. (Eds.), Giant fields of the decade 2000–2010. AAPG Memoir*, v. 113, p. 165–176.
- Carminatti, M., Dias, J. L., Wolff, B.** (2009). From turbidites to carbonates: Breaking paradigms in deep waters. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA.
- Carminatti, M., Wolff, B., Gamboa, L. A. P.** (2008). New exploratory frontiers in Brazil. 19th World Petroleum Congress, Madrid, Spain, Forum 01.
- Chafetz, H., Barth, J., Cook, M., Guo, X., Zhou, J.** (2018). Origins of carbonate spherulites: Implications for Brazilian Aptian Pre-Salt reservoir. *Sedimentary Geology* 365, Elsevier, p. 21-33.
- Chang, H. K., Assine, M. L., Corrêa, F. S., Tinen, J. S., Vidal, A. C., Koike, L.** (2008). Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 38, no. 2, p. 29-46.
- Chang, H. K., Kowsmann, R. O., Figueiredo, A. M. F.** (1988). New concepts of the development of east Brazilian marginal basins. *Episodes*, v. 11, p. 194-202.
- Choquette, P. W. & Pray, L. C.** (1979). Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, v. 54, no. 2, p. 207-250.
- Della Porta, G.** (2015). Carbonate build-ups in lacustrine, hydrothermal and fluvial settings: Comparing depositional geometry, fabric types and geochemical signature. *In: Bosence, D. W. J., Gibbons, K. A., Le Heron, D. P., Morgan, W. A., Pritchard, T., Vining, B. A. (Eds.), Microbial carbonates in space and time: Implications for global exploration and production. Geological Society, London, Special Publications*, p. 418, p. 17-68.

- Della Porta, G., Capezzuoli, E., de Bernardo, A.** (2017). Facies character and depositional architecture of travertine slope aprons (Pleistocene, Acquasanta Terme, central Italy). *Marine and Petroleum Geology*, v. 87, p. 171-187.
- Demercian, L. S.** (1996). A halocinese na evolução do sul da Bacia de Santos do Aptiano ao Cretácico superior. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 201 p.
- Dias, J. L.** (1998). Análise sedimentológica e estratigráfica do andar Aptiano em parte da margem leste do Brasil e no platô das Malvinas: Considerações sobre as primeiras incursões e ingressões marinhas do Oceano Atlântico Sul meridional. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 208 p.
- Dias, J. L.** (2005). Tectonic, stratigraphy and sedimentation during the Aptian along the Brazilian eastern margin. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 13, no. 1, p. 7-25.
- Dunham, R. J.** (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In: Ham, W. E. (Ed.), Classification of carbonate rocks*. Tulsa, AAPG Memoir, v. 1, p. 108-122.
- Embry, A. F. & Klovan, J. E.** (1971). A late Devonian reef tract on northeastern Banks Islands, northwest territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 19, p. 730-781.
- Erthal, M. M., Capezzuoli, E., Mancini, A., Claes, H., Soete, J., Swennen, R.** (2017). Shrub morpho-types as indicator for the water flow energy: Tivoli travertine case (Italy). *Sedimentary Geology*, v. 347, p. 79-99.
- Flügel, E.** (2004). *Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 921 p.
- Gaffney, Cline & Associates** (2010). Exame e avaliação de dez descobertas e prospectos selecionadas no play do Pré-Sal em águas profundas na Bacia de Santos, Brasil.
- Garcia, S. F. M., Danderfer Filho, A., Lamotte, D. F., Rudkiewicz, J. L.** (2012). Análise de volumes de sal em restauração estrutural: um exemplo na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 42, no. 2, p. 455-450.
- Gomes, J. S. & Alves, F. B.** (2007). O universo da indústria petrolífera – Da pesquisa à refinação. Fundação Calouste Gulbenkian, 627 p.
- Gomes, P. O., Kildonsk, W., Minken, J., Grow, T., Barragan, R.** (2008). The outer high of the Santos Basin, southern São Paulo Plateau, Brazil: Pre-Salt exploration outbreak, paleogeographic setting and evolution of the syn-rift structure. Cape Town, South Africa, AAPG International Conference and Exhibition.
- Herlinger Jr., R., Zambonato, E. E., De Ros, L. F.** (2017). Influence of diagenesis on the quality of lower cretaceous pre-salt lacustrine carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 87, p. 1285-1313.
- Jordan Jr., C. F. & Wilson, J. L.** (1994). Carbonate reservoir rocks. *In: Magoon, L.B. & Dow, W.G. (Eds.), The petroleum system – From source to trap*. AAPG Memoir, v. 60, p. 141-157.
- Kupecz, J. A., Gluyas, J., Bloch, S.** (1997). Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates. AAPG Memoir, v. 69, 311 p.
- Leyden, R., Ludwig, W. J., Ewing, J.** (1971). Structure of the continental margin of Punta del Este, Uruguay, and Rio de Janeiro, Brazil. *AAPG Bulletin* v. 55, p. 2161-2173.
- Lucia, F. J.** (1995). Rock-fabric/Petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *AAPG Bulletin*, v. 79, p. 1275-1300.
- Mazzullo, S. J.** (2004). Overview of porosity evolution in carbonate reservoirs. Search and Discovery Article #40134, Department of Geology Wichita State University, Wichita, Kansas.
- Mercedes-Martín, R. M., Brasier, A. T., Rogerson, M., Reijmer, J. J. G., Vonhof, H., Pedley, M.** (2017). A depositional model for spherulitic carbonates associated with alkaline, volcanic lakes. *Marine and Petroleum Geology*, v. 86, p. 168-191.
- Mercedes-Martín, R. M., Rogerson, M., Brasier, A. T., Vonhof, H., Prior, T. J., Fellows, S. M., Reijmer, J. J. G., Billing, I., Pedley, H. M.** (2016). Growing spherulitic calcite grains in saline, hyperalkaline lakes: Experimental evaluation of the effects of Mg-clays and organic acids. *Sedimentary Geology*, v. 335, p. 93-102.

- Milani, E. J., Brandão, J. A. S. L., Zalán, P. V., Gamboa, L. A. P.** (2000). Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, no. 3, p. 351-396.
- Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G. V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M., Neto, O. C. P.** (2007). Bacias Sedimentares Brasileiras – Cartas estratigráficas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, no. 2, p. 183-205, maio/nov. 2007.
- Mohriak, W., Szatmari, P., Anjos S. M. C.** (2008). *Sal: Geologia e Tectônica - exemplos nas Bacias Brasileiras*. Editora Beca, São Paulo, 448 p.
- Moore, C. H.** (2001). Carbonate reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. *Developments in Sedimentology*, v. 55, Elsevier, Amsterdam, 444 p. (+ 1 CD-R).
- Moreira, J. L. P., Madeira, C. V., Gil, J. A., Machado, M. A. P.** (2007). Santos Basin. *In: Conceição, H., Trella G. O. (Eds.), Stratigraphic charts. Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, no. 2, p. 531-549.
- Muniz, M. C.** (2013). Tectono-stratigraphic evolution of the Barremian-Aptian continental rift carbonates in southern Campos Basin, Brazil. PhD thesis. Royal Holloway University of London, 324 p. (+ 19 anexos).
- Muniz, M. C. & Bosence, D. W. J.** (2015). Pre-Salt microbialites from the Campos Basin (offshore Brazil): Image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates. *In: Bosence, D. W. J., Gibbons, K. A., Le Heron, D. P., Morgan, W. A., Pritchard, T., Vining, B. A. (Eds.), Microbial carbonates in space and time: Implications for global exploration and production. Geological Society, London, Special Publications*, 418 p.
- Muniz, M. C. & Bosence, D. W. J.** (2017). Reservoir layering controlled by the taphonomy and taphofacies of coquinas from the early Aptian Campos Basin, Brazil. *AAPG Datapages/Search and Discovery Article #90310, AAPG/SEG International Conference and Exhibition, London, England, October, p. 15-18.*
- Papaterra, G. E.** (2010). Pré-Sal: Conceituação geológica sobre uma nova fronteira exploratória no Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rio Janeiro, Instituto de Geociências, 81 p.
- Pereira, M. & Feijó, F.** (1994). Bacia de Santos. *Estratigráficas Bacias Sedimentares do Brasil. Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8, p. 219-234.
- Ponte, F. C. & Asmus, H.** (1976). The Brazilian marginal basins: Current state of knowlegde. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 48, p. 215-239.
- Rogerson, M., Mercedes-Martín, R. M., Brasier, A. T., McGill, R. A. R., Prior, T. J., Vonhof, H., Fellows, S. M., Reijmer, J. J. G., McClymont, E., Billing, I., Mathews, A., Pedley, H. M.** (2017). Are spherulitic lacustrine carbonates an expression of large-scale mineral carbonation? A case study from the East Kirkton limestone, Scotland. *Gondwana Research*, v. 48, p. 101-109.
- Saller, A., Rushton, S., Buambua, L., Inman, K., McNeil, R., Dickson, J. A. D.** (2016). Pre-Salt stratigraphy and depositional systems in the Kwanza Basin, offshore Angola. *AAPG Bulletin*, v. 100, p. 1135-1164.
- Schlager, W.** (2005). Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology*, Series no. 8, 200 p., Tulsa.
- Silva-Telles Jr., A. G.** (1996). Estratigrafia de sequências de alta resolução do membro Coqueiros da formação Lagoa Feia (Barremiano/Aptiano da Bacia de Campos, Brasil). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2 volumes, 268 p.
- Szatmari, P. & Milani, E.** (2016). Tectonic control of the oil-rich large igneous-carbonate-salt province of the south Atlantic rift. *Marine and Petroleum Geology*, v. 77, p. 567-596.
- Terra, G. J. S., Spadini, A. R., França, A. B., Sombra, C. L., Zambonato, E. E., Juschaks, L. C. S., Arienti, L. M., Erthal, M. M., Blauth, M., Franco, M. P., Matsuda, N. S., Silva, N. G. C., Junior, P. A. M., D'Avila, R. S. F., Souza, R. S., Tonietto, S. N., Anjos, S. M. C., Campinho, V. S., Winter, R. W.** (2010). Classificação

de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 18, no. 1, p. 9-29, nov. 2009/maio 2010.

Tosca, N. J. & Wright, V. P. (2014). The formation and diagenesis of Mg-clay minerals in lacustrine carbonate reservoirs. Search and Discovery Article #51002.

Tosca, N. J. & Wright, V. P. (2015). Diagenetic pathways linked to labile Mg-clays in lacustrine carbonate reservoirs: A model for the origin of secondary porosity in the Cretaceous Pre-Salt Barra Velha formation, offshore Brazil. Geological Society, London, Special Publications, 435 p., 20 November.

Tosca, N. J. & Wright, V. P. (2017). Diagenetic pathways linked to labile Mg-clays in lacustrine carbonate reservoirs: A model for the origin of secondary porosity in the Cretaceous Pre-Salt Barra Velha Formation, offshore Brazil. *In: Armitage et al.* (Eds.), Reservoir quality of clastic and carbonate rocks: Analysis, modelling and prediction. Geological Society, London, Special Publication, 435 p.

Tucker, M. E. & Wright, V. P. (1990). Carbonate Sedimentology. Backwell Scientific Publications, 482 p.

Wardlaw, N. C. & Cassan, J. P. (1978). Estimation of recovery efficiency by visual observation of pore systems in reservoir rocks. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 26, p. 572-585.

Wardlaw, N. C. & McKellar, M. (1981). Mercury porosimetry and the interpretation of pore geometry in sedimentary rocks and artificial models. Powder Technol., v. 29, p. 127-143.

Wright, V. P. (2011). Reservoir architectures in non-marine carbonates. Search and Discovery Article #40801, posted August 12, 2011, adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, USA, April 10-13, 2011.

Wright, V. P. (2012). Lacustrine carbonates in rift settings: the interaction of volcanic and microbial processes on carbonate deposition. *In: Garland, J., Neilson, J.E., Laubach, S.E., Whidden, K.J.* (Eds.), Advances in carbonate exploration and reservoir analysis. Geological Society, Special Publication, 370 p., p. 39-47.

Wright, V. P. & Barnett, A. J. (2014). Cyclicity and carbonate-silicate gel interactions in Cretaceous alkaline lakes. AAPG Search and Discovery Article #51011.

Wright, V. P. & Barnett, A. J. (2015). An abiotic model for the development of textures in some south Atlantic early Cretaceous lacustrine carbonates. *In: Bosence, D. W. J., Gibbons, K. A., Le Heron, D. P., Morgan, W. A., Pritchard, T., Vining, B. A.* (Eds.), Microbial carbonates in space and time: Implications for global exploration and production. Geological Society, London, Special Publications, p. 418, p. 209-219.

Wright, V. P. & Barnett, A. J. (2017). Classifying reservoir carbonates when the status quo simply does not work: A case study from the Cretaceous of the south Atlantic. AAPG Search and Discovery Article #51419, posted August 28, 2017.

Wright, V. P. & Tosca, N. J. (2016). Geochemical model for the formation of the Pre-Salt reservoirs, Santos Basin, Brazil: Implications for understanding reservoir distribution. Search and Discovery Article #51304.

11. ANEXOS

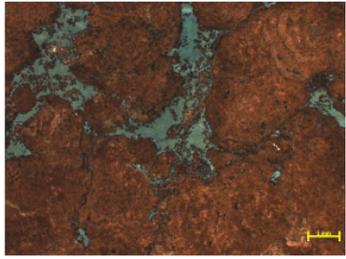
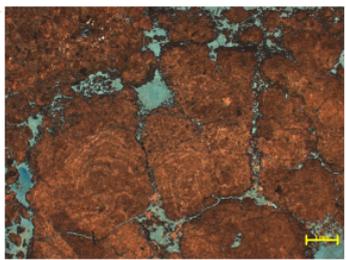
Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
F1			Baixa	BP		Mud							Níveis/Intercalações Pontualmente Exsudação Moderada Pontual	1 2 3 Posições do plug a partir das quais foram produzidas as lâminas	
F2A				WP		Wacke									
F2B					FE		Pack								
F2B2				Moderada	CV		Grain								
F2BT					GF		Bound								
F3					BC		Crist								
F4			Boa	MO											
F5				FR											
F6			Excelente	CH											
Cdm				VUG											

- Legenda**
- Sil - Silicificação
 - Dol - Dolomitização
 - P - Porosidade
 - TP - Tipo de Porosidade
 - BP - Interpartícula
 - WP - Intrapartícula
 - FE - Fenestrae
 - CV - Cavernosa
 - GF - Trama de crescimento
 - BC - Inter cristalina
 - MO - Mórdica
 - FR - Fractura
 - CH - Canal
 - VUG - Vugolar
 - O - Ocorrências de óleo
 - T - Textura
 - REC - Recristalização
 - FRAC - Fracturação
 - DISS - Dissolução
 - DESDOL - Desdolomitização
 - COM - Compactação
 - BRECH - Brechificação
 - CIM - Cimentação

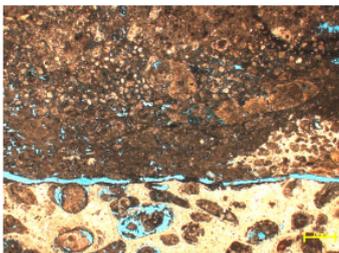
Anexo I.1 – Legenda usada nas fichas descritivas dos testemunhos 1 e 2 (p. 96-148).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	1							VUG BP WP							
2			GF VUG CH FR BP WP CV									<p>Recristalização disseminada, mas também ocorre como zonas/bandas</p> <p>Passagens F3 são menos porosas</p>			
3															

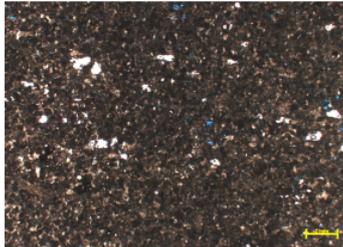
Anexo I.2 – Caixa 1 do testemunho 1 (5311,00m – 5311,80m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microescala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
 1 2			 GF VUG CH FR BP WP											1  2 	
												Zonas/bandas recristalizadas Passagens F3 são menos porosas			

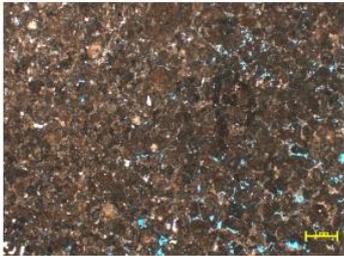
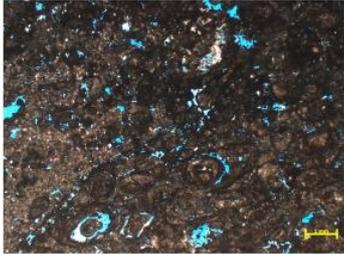
Anexo I.3 – Caixa 2 do testemunho 1 (5311,80m – 5312,65m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	1								GF VUG CH FR BP WP						
2				WP VUG CH FR								Alternância com zonas F3, e alguns restos de F2B são também identificados	2 		

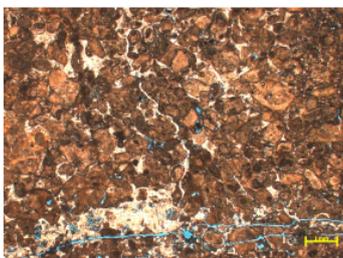
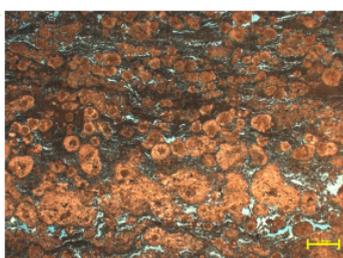
Anexo I.5 – Caixa 4 do testemunho 1 (5313,55m – 5314,45m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	1							WP VUG FR BP							
2			WP VUG FR									Porosidade do tipo BP rara Cimento micrítico?	2		
			VUG												

Anexo I.7 – Caixa 6 do testemunho 1 (5315,35m – 5316,25m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	1							VUG WP BP CH FR MO							
2			WP BP CH FR										2		
3			WP VUG CH BP FR MO										3		

Anexo I.8 – Caixa 7 do testemunho 1 (5316,25m – 5317,15m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
20 cm			GF VUG CH FR											1	
			VUG BP WP CH FR											2	
			VUG CH FE												
			VUG BP CH WP												
			VUG CH FE BP									F2A c/ esferulitos?			

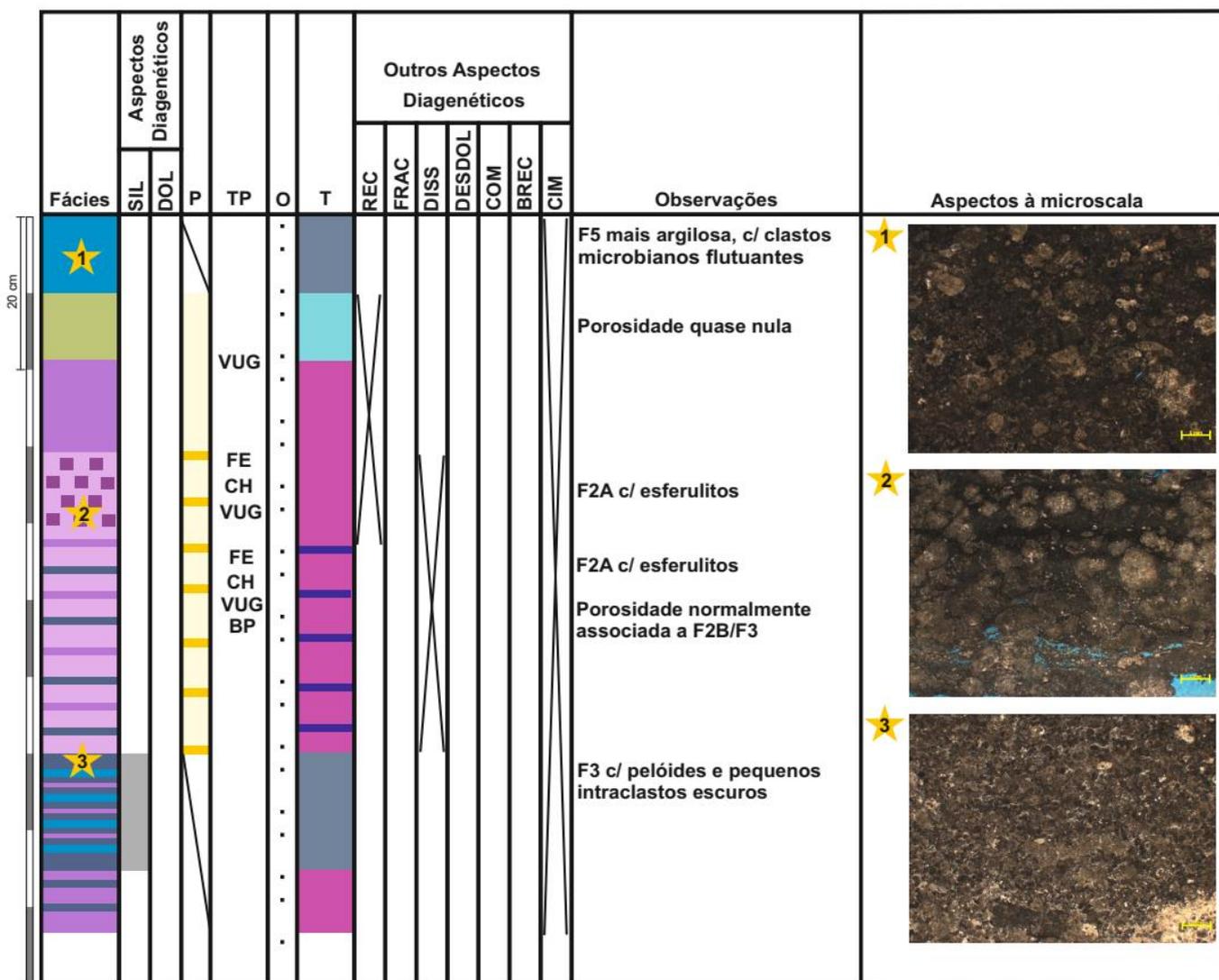
Anexo I.10 – Caixa 9 do testemunho 1(5318,05m – 5318,95m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	1							VUG FE CH BP FR							
2													Ocorrência de esferulitos?		
3															

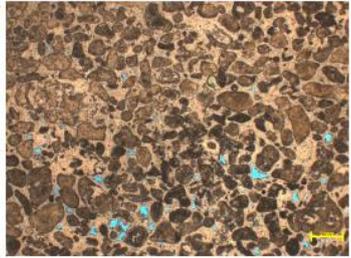
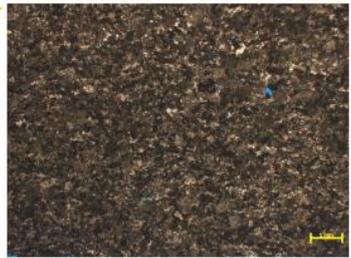
Anexo I.11 – Caixa 10 do testemunho 1 (5318,95m – 5319,85m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
								WP BP VUG FR CH							

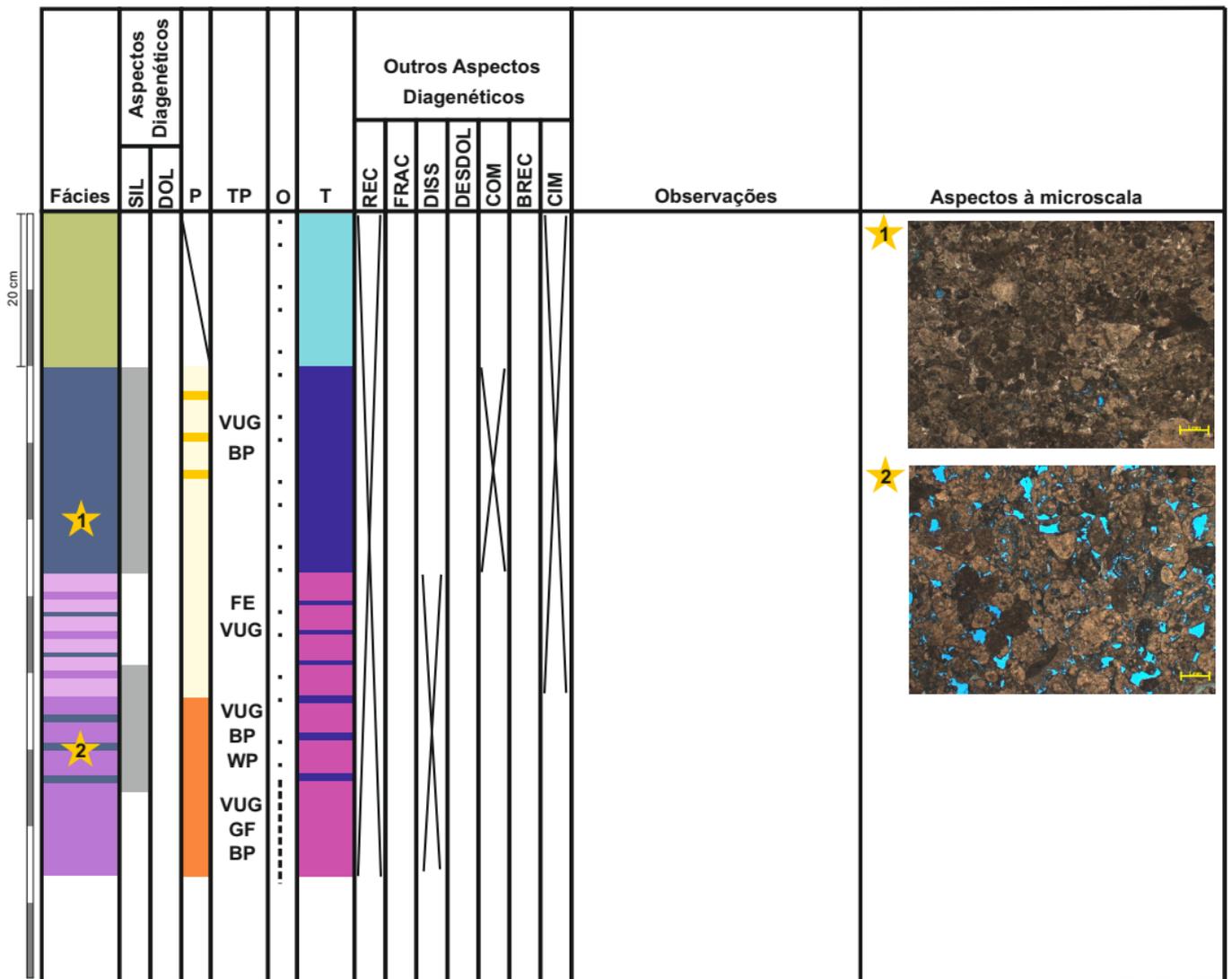
Anexo I.14 – Caixa 13 do testemunho 1 (5321,65m – 5322,65m).



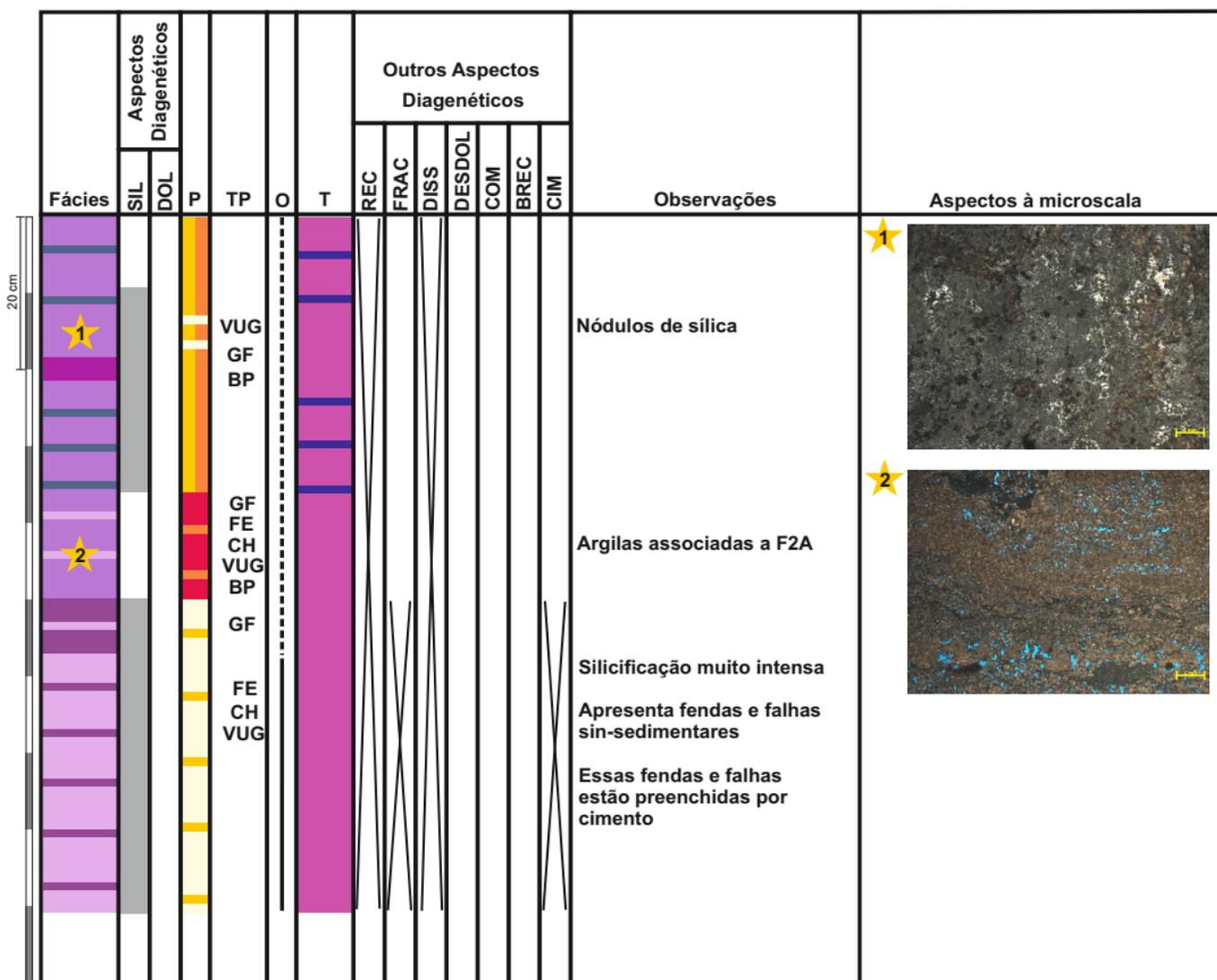
Anexo I.16 – Caixa 1 do testemunho 2 (5405,00m – 5405,90m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala			
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM		
 20 cm				VUG													
													Pontualmente porosidade do tipo VUG e mais raramente BP				
													Presença de argilas Muito mais intraclastos e pelóides que na F5 acima				
													F5 disfarçada pela dolomitização?? Poucos pelóides e intraclastos				
													Localmente porosidade do tipo CH, associada aos leitos argilosos				

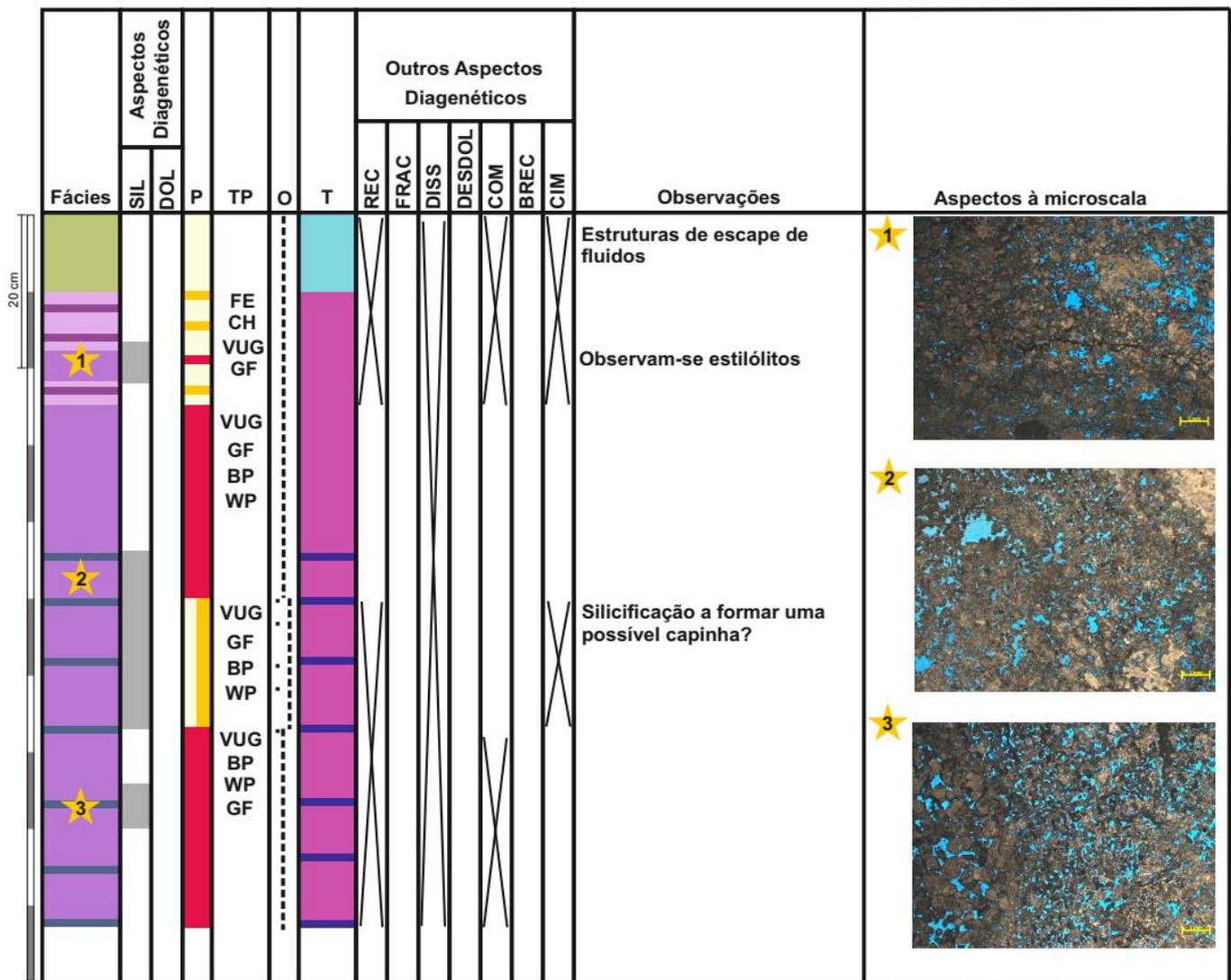
Anexo I.17 – Caixa 2 do testemunho 2 (5405,90m – 5406,80m).



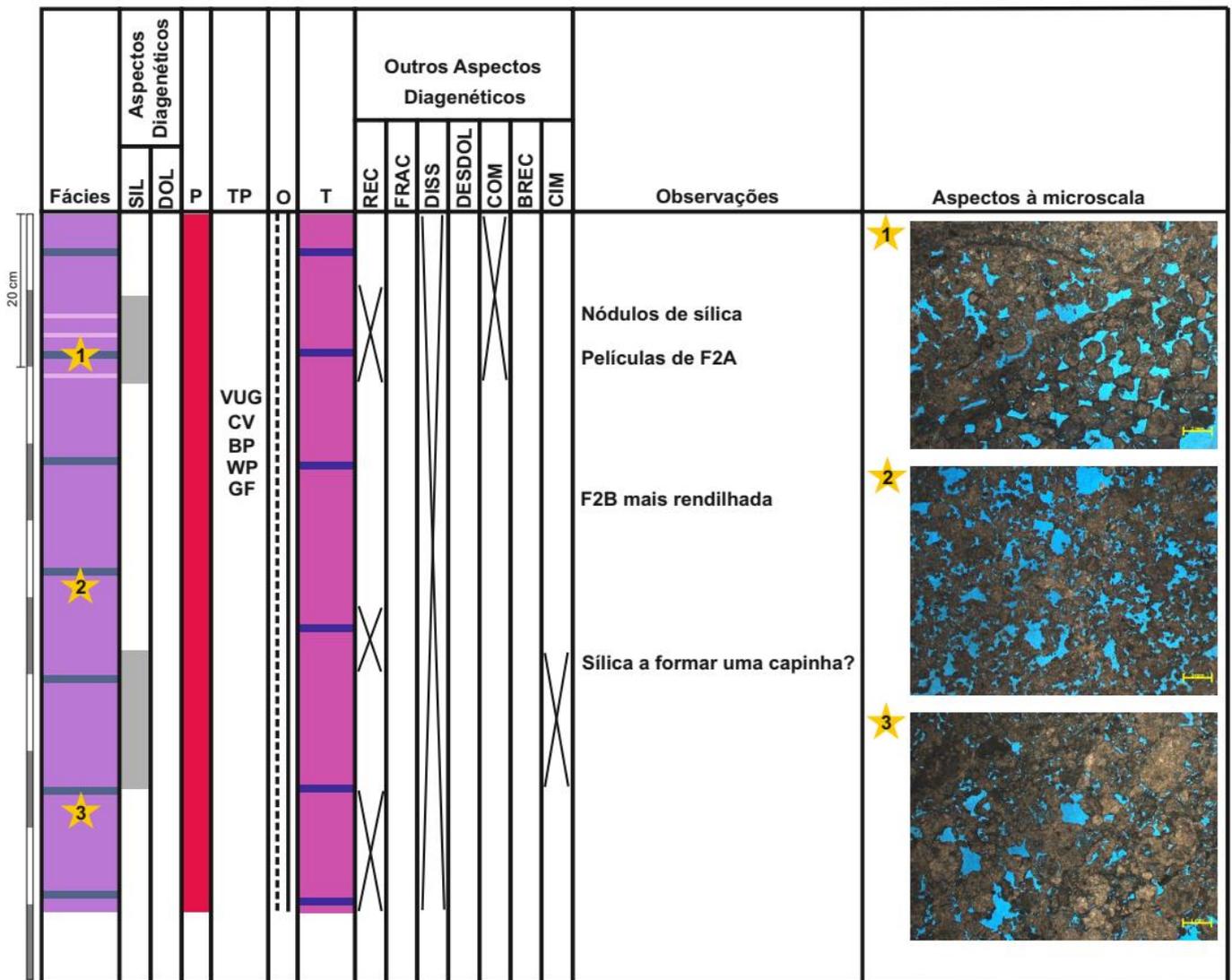
Anexo I.18 – Caixa 3 do testemunho 2 (5406,80m – 5407,70m).



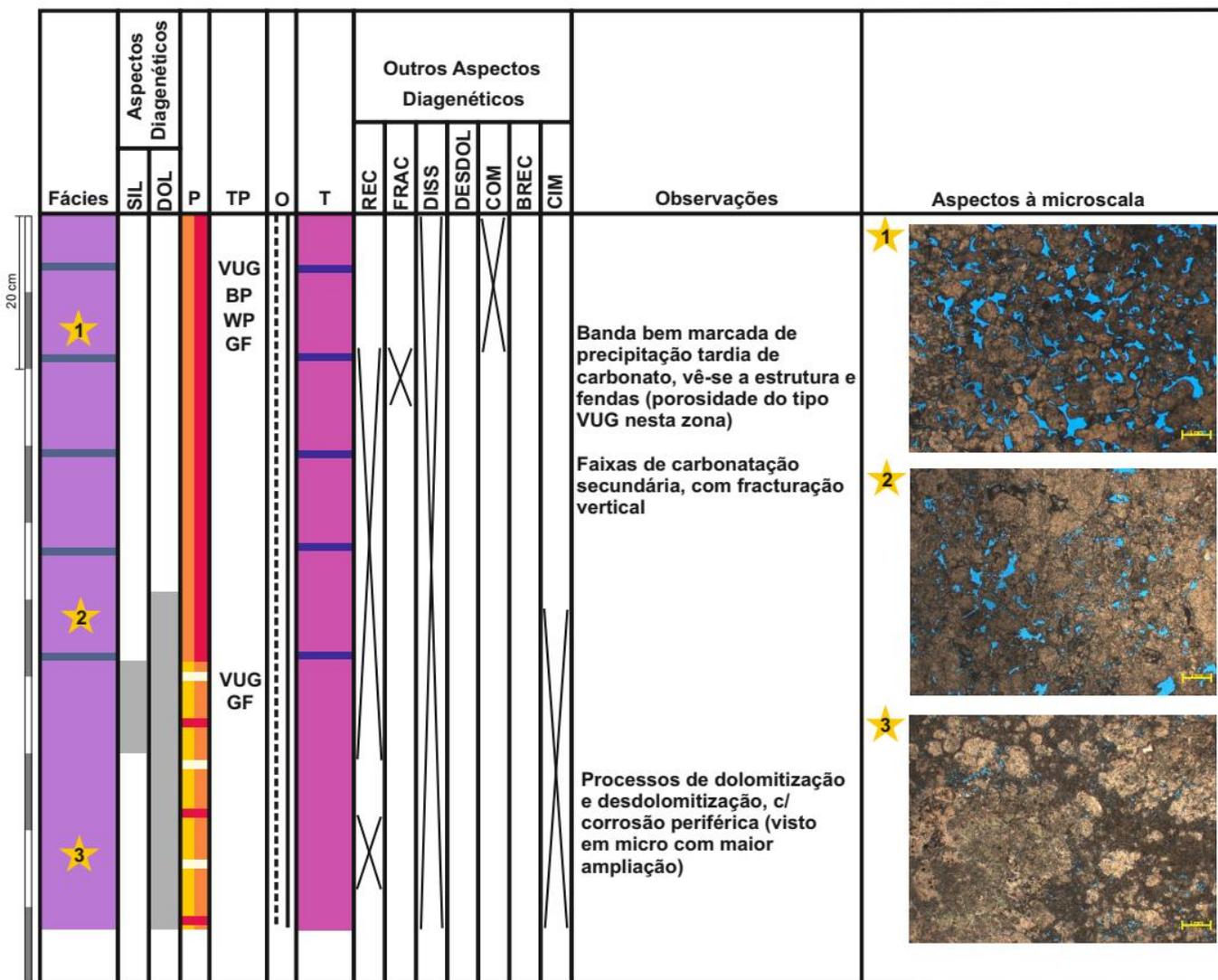
Anexo I.19 – Caixa 4 do testemunho 2 (5407,70m – 5408,60m).



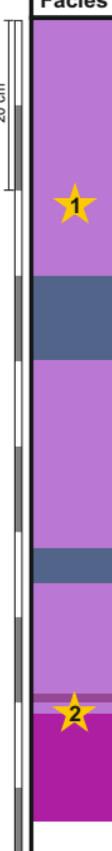
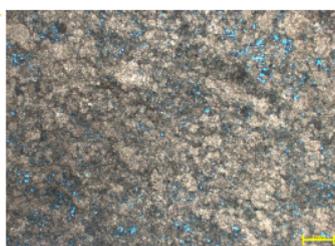
Anexo I.20 – Caixa 5 do testemunho 2 (5408,60m – 5409,50m).



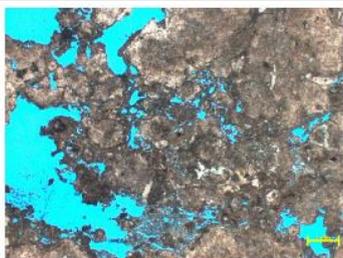
Anexo I.21 – Caixa 6 do testemunho 2 (5409,50m – 5410,40m).



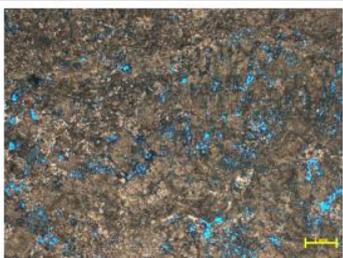
Anexo I.22 – Caixa 7 do testemunho 2 (5410,40m – 5411,30m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
 <p>20 cm</p>				VUG GF										<p>1</p> 	
				VUG BP										<p>2</p> 	
				VUG GF											<p>Muito localmente porosidade do tipo BP</p> <p>Porosidade varia lateralmente</p>
				VUG GF											<p>Bandas de F2B2, geralmente mais escuras</p>

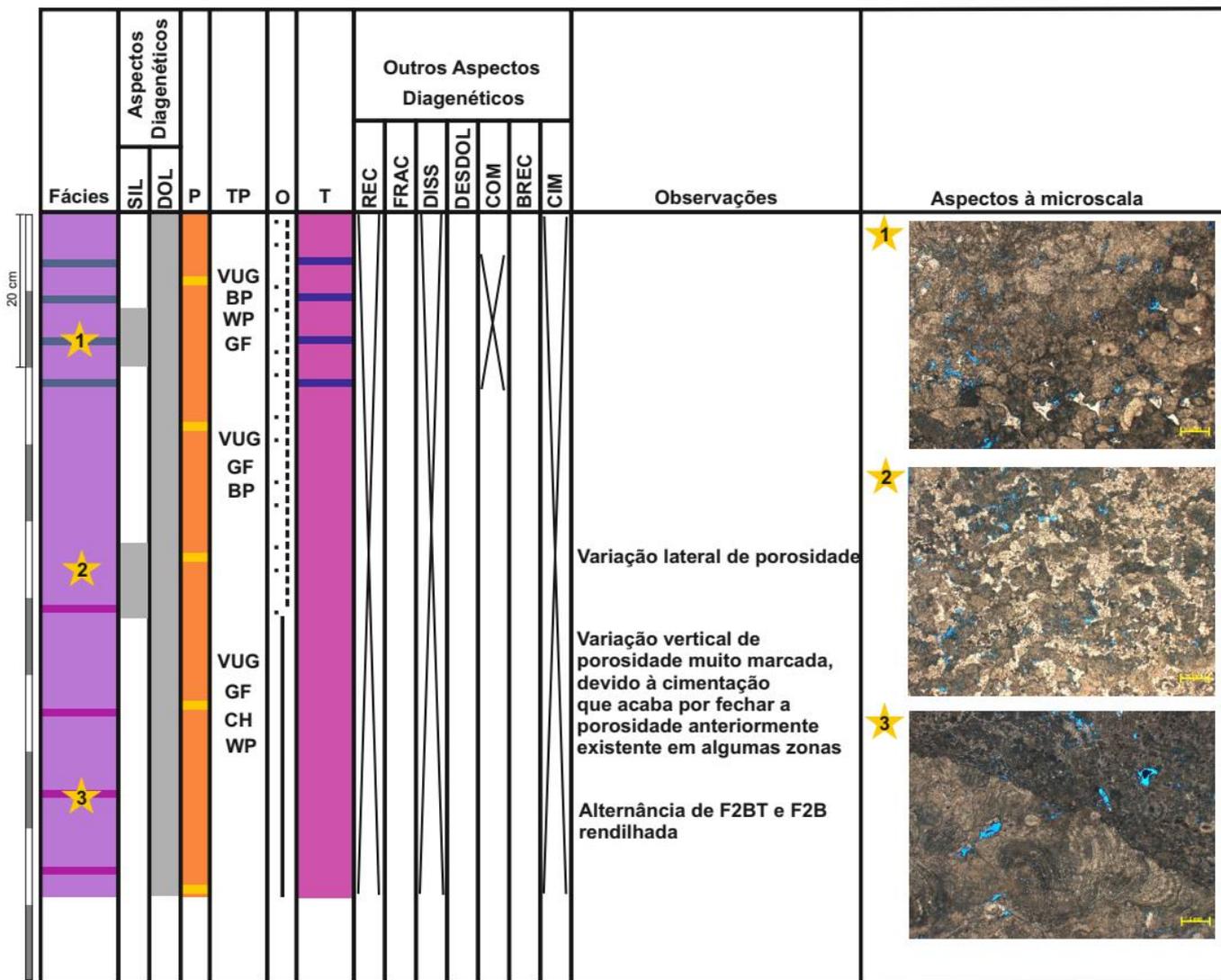
Anexo I.23 – Caixa 8 do testemunho 2 (5411,30m – 5412,20m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
 1 2 3				VUG CV BP WP GF VUG GF FE VUG GF CV								Intervalos mm de porosidade fechada Variação lateral e vertical da porosidade Alternância de zonas de porosidade excelente (FE) e moderada a boa (VUG e GF) Passagens tênues de F2A c/ esferulitos	1  2  3 		

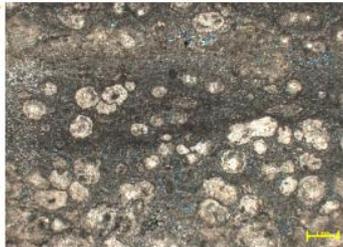
Anexo I.24 – Caixa 9 do testemunho 2 (5412,20m – 5413,10m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microescala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
1			VUG		1								<p>Passagens de porosidade moderada para o topo da caixa</p> <p>F2B corroída, mas é possível ver alguma estruturação</p> <p>Zonas/bandas recristalizadas</p> <p>Aspecto variável dendrítico/rendilhado</p> <p>Estrutura vê-se mal</p> <p>F2B com laivos de argila e óleo</p> <p>Muito recristalizada</p>	<p>1</p> 	
2			GF		2								<p>Aspecto variável dendrítico/rendilhado</p> <p>Estrutura vê-se mal</p> <p>F2B com laivos de argila e óleo</p> <p>Muito recristalizada</p>	<p>2</p> 	
3			CH		3								<p>F2B muito aglomerada</p> <p>Porosidade nula a baixa nas zonas inferiores da caixa</p>	<p>3</p> 	

Anexo I.25 – Caixa 10 do testemunho 2 (5413,10m – 5414,00m).



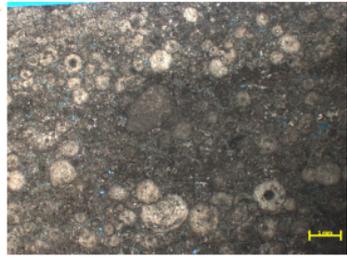
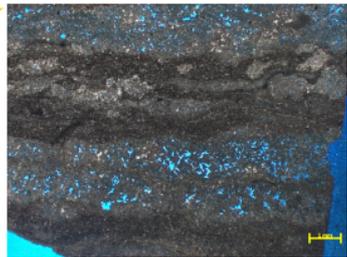
Anexo I.26 – Caixa 11 do testemunho 2 (5414,00m – 5414,85m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	1							VUG GF BP WP CV							
2			VUG FE CH									F2A c/ esferulitos	2		
3			VUG FE CH BP WP									F2B c/ pequenos ostracodos e pequenos moldes de ostracodos Pequenos shrubs Banda silicificada	3		

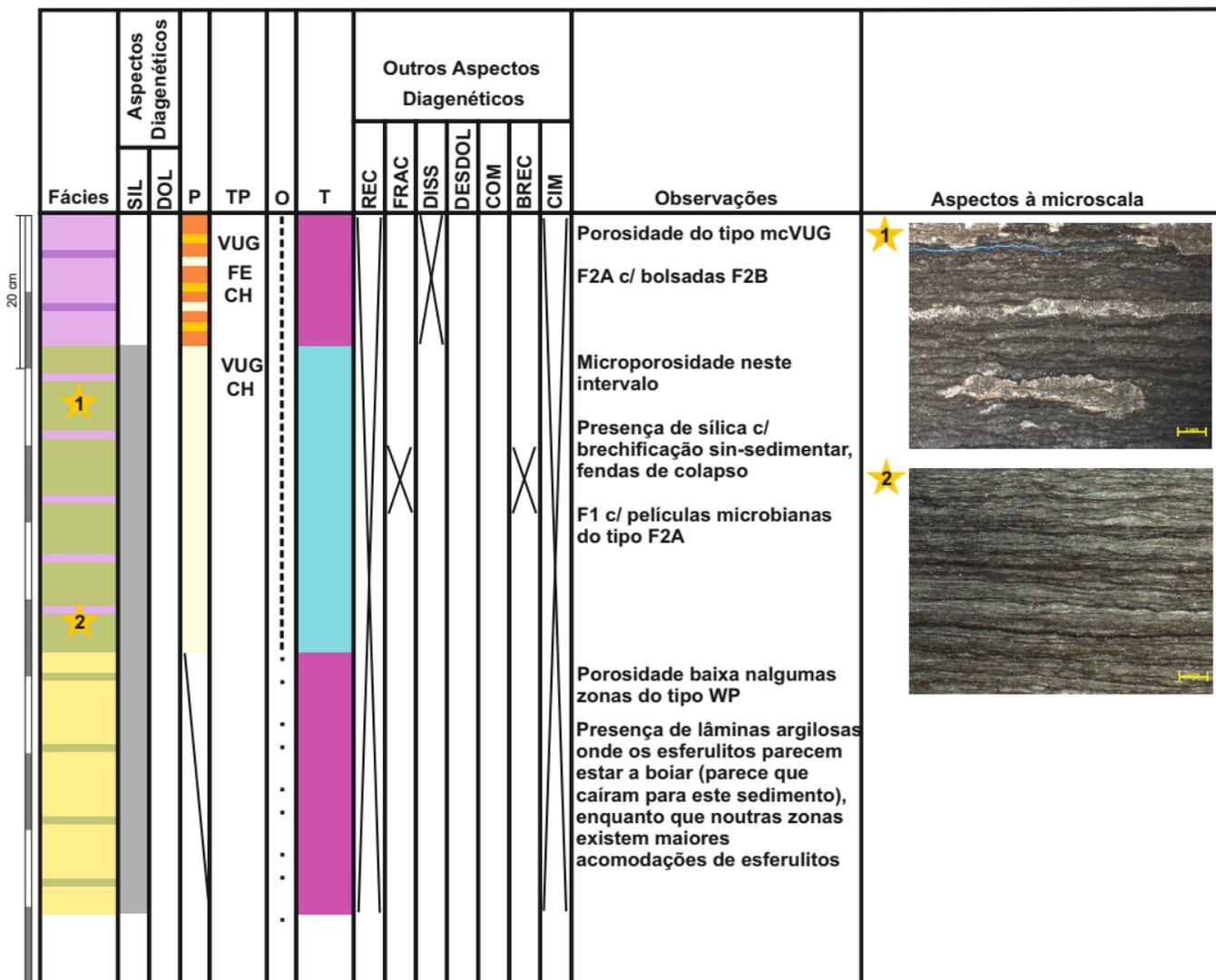
Anexo I.27 – Caixa 12 do testemunho 2 (5414,85m – 5415,75m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
				VUG										F1 c/ esferulitos Presença de argila verde	★ 
★ 1				VUG CH FE WP										Maior componente argilosa Bandas de F1	★ 
★ 2									X					Presença de esferulitos difusos, ostracodos e carófitas (rara) Algumas passagens de porosidade boa (tipo CH)	★ 
★ 3				VUG BP WP FE CH						X				F3 alterna c/ F2A c/ esferulitos	

Anexo I.28 – Caixa 13 do testemunho 2 (5415,75m – 5416,65m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
20 cm				CH FE VUG									Porosidade variável, desde zonas de porosidade nula a zonas muito porosas	★ 	
★ 1				VUG GF BP FE CH									Porosidade variável, desde zonas de porosidade nula (devido à cimentação) a zonas muito porosas		
													Ténues passagens F2A	★ 2 	
★ 2													Transições e interdigitações frequentes		
				WP BP VUG									Alternância de F2B c/ F2A		
				VUG FE									F2A c/ alguns esferulitos e zonas de F4?		
													Porosidade varia, passagens menos porosas associadas a cimentação/recristalização?		
													F2A c/ línguas de F2B		

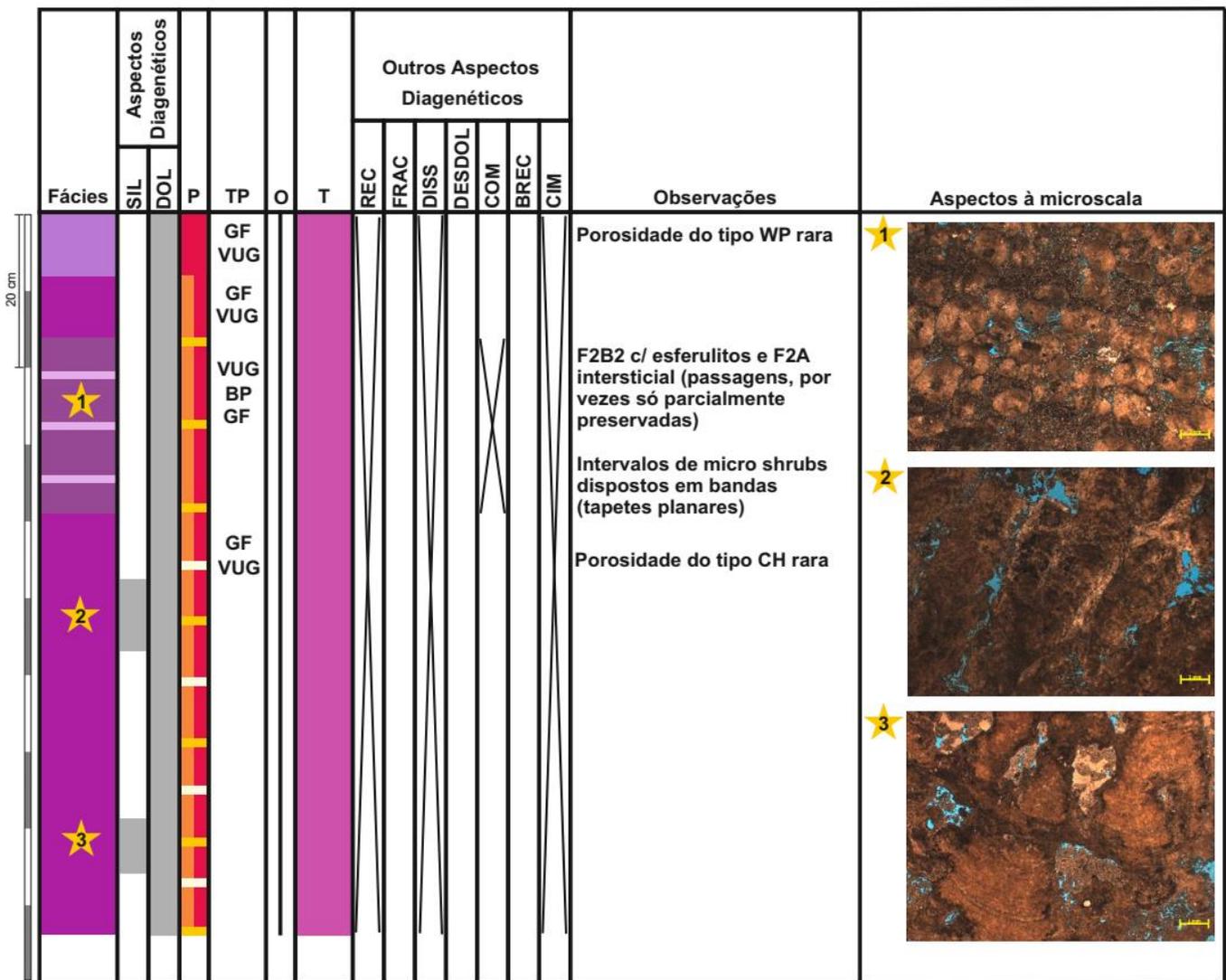
Anexo I.29 – Caixa 14 do testemunho 2 (5416,65m – 5417,55m).



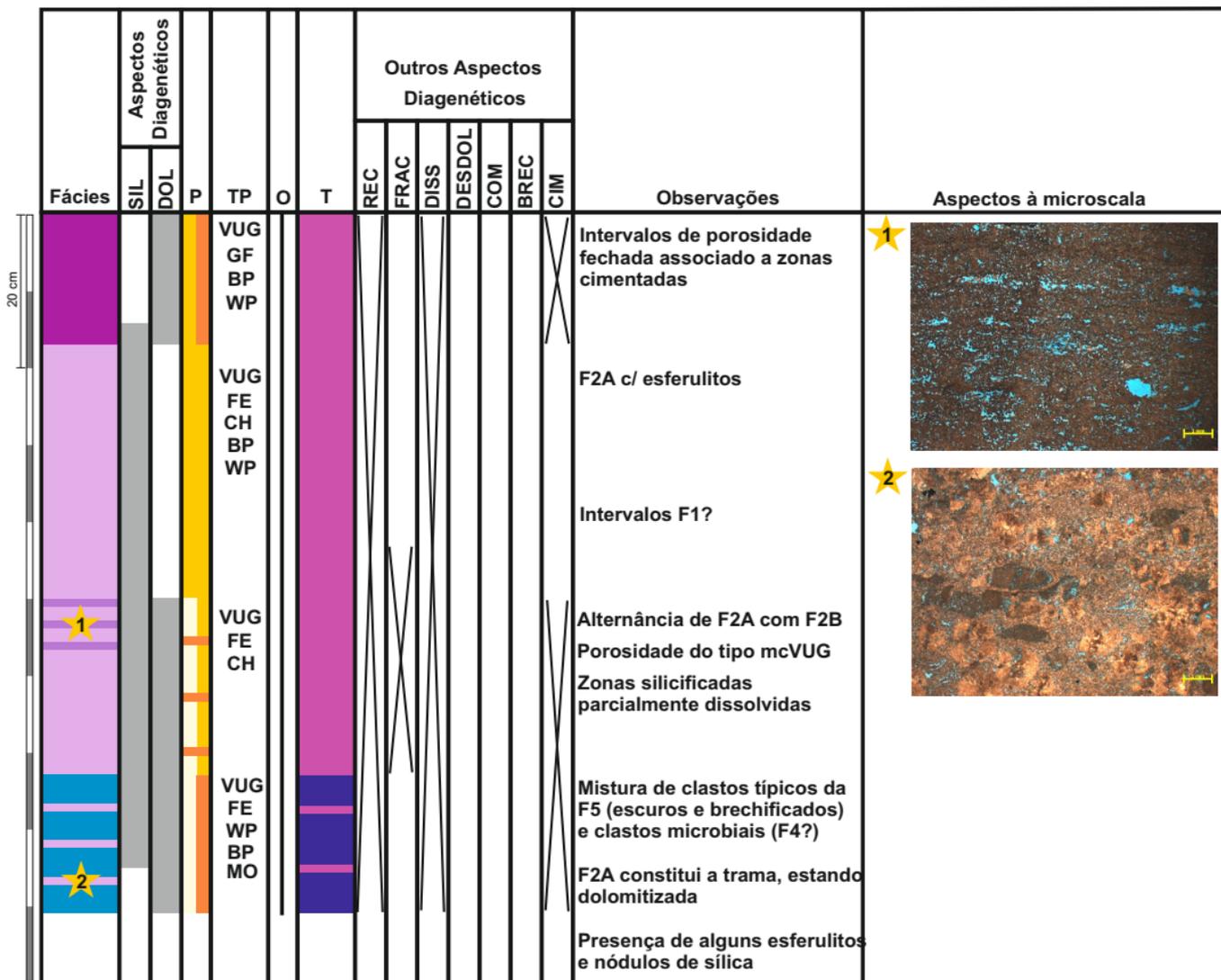
Anexo I.30 – Caixa 15 do testemunho 2 (5417,55m – 5418,45m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala		
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM	
			VUG WP MO CH											<p>Porosidade localmente pode ser baixa do tipo VUG</p> <p>Alguns esferulitos estão oncolitizados e outros apenas revestidos</p> <p>Os esferulitos também se encontram silicificados mas os cortexes periféricos e a fase de ligação raramente estão silicificados</p> <p>F2B/3 c/ esferulitos orientados</p> <p>F2B c/ esferulitos e coated grains, F2A intersticial</p> <p>F2A c/ dolomitização associada a estas esteiras</p> <p>F2B apresenta pequenos shrubs recristalizados, com aspecto tabular (parece que tentam arrancar o crescimento)</p> <p>F2B corroída, pontualmente ocorrem passagens de F2A</p> <p>Apresenta arranjo vestigial vertical ramificado (rendilhado), com porosidade irregular</p>		
			VUG WP BP CH FE													
			VUG GF													

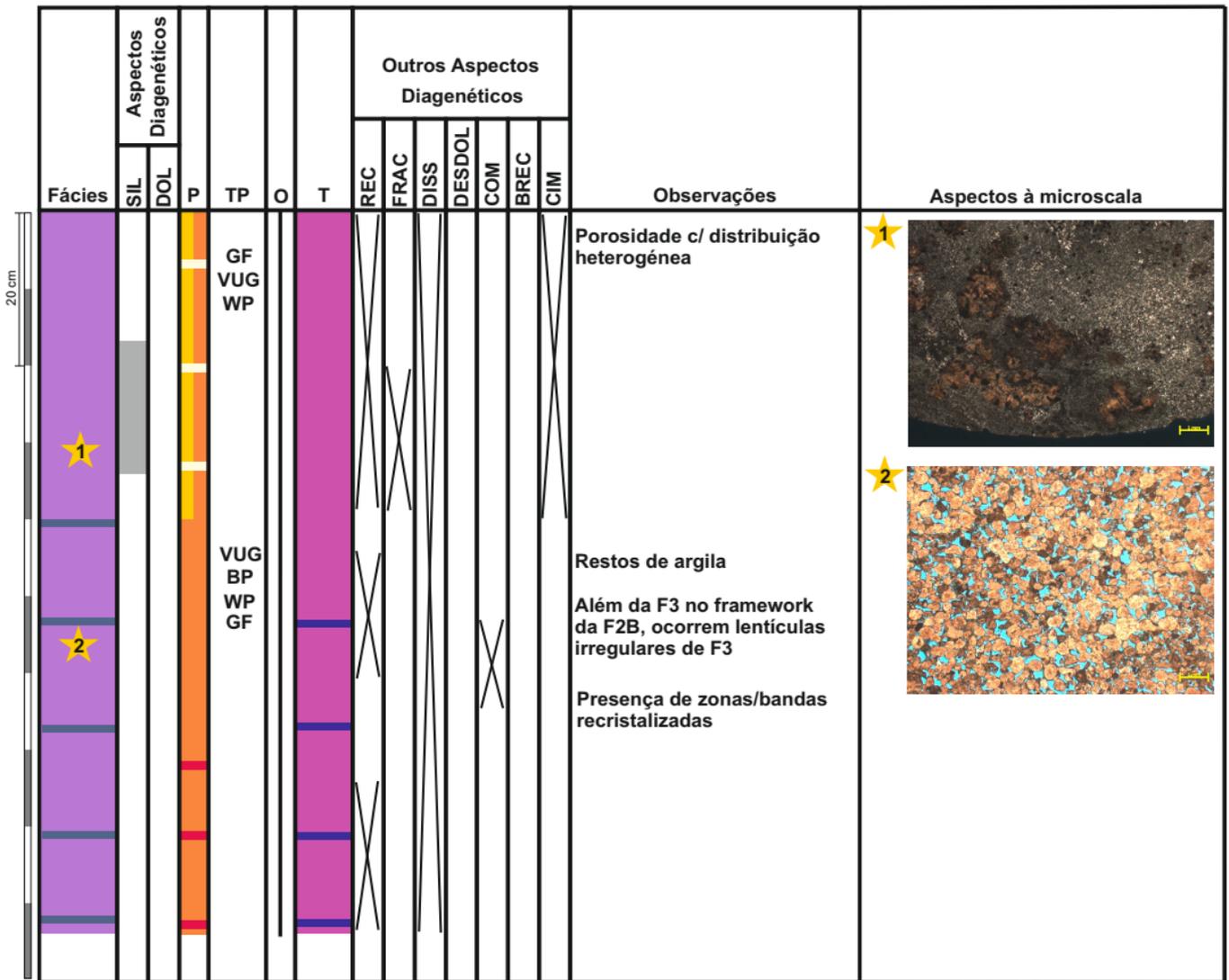
Anexo I.31 – Caixa 16 do testemunho 2 (5418,45m – 5419,35m).



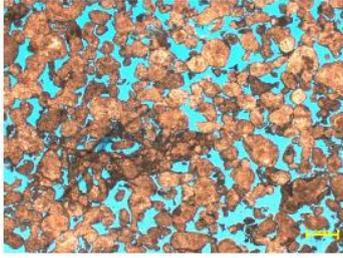
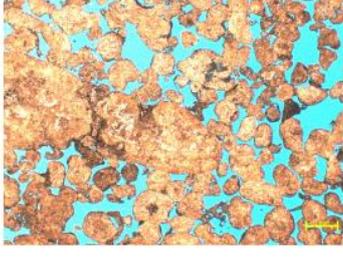
Anexo I.33 – Caixa 18 do testemunho 2 (5420,25m – 5421,15m).



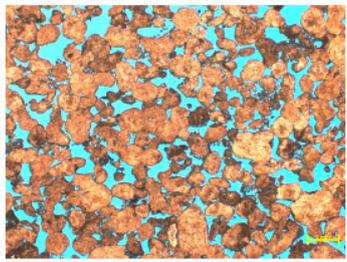
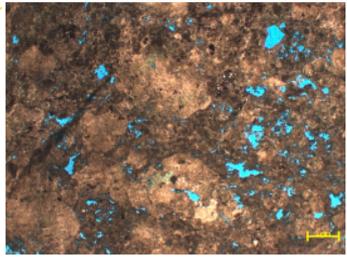
Anexo I.34 – Caixa 19 do testemunho 2 (5421,15m – 5422,05m).



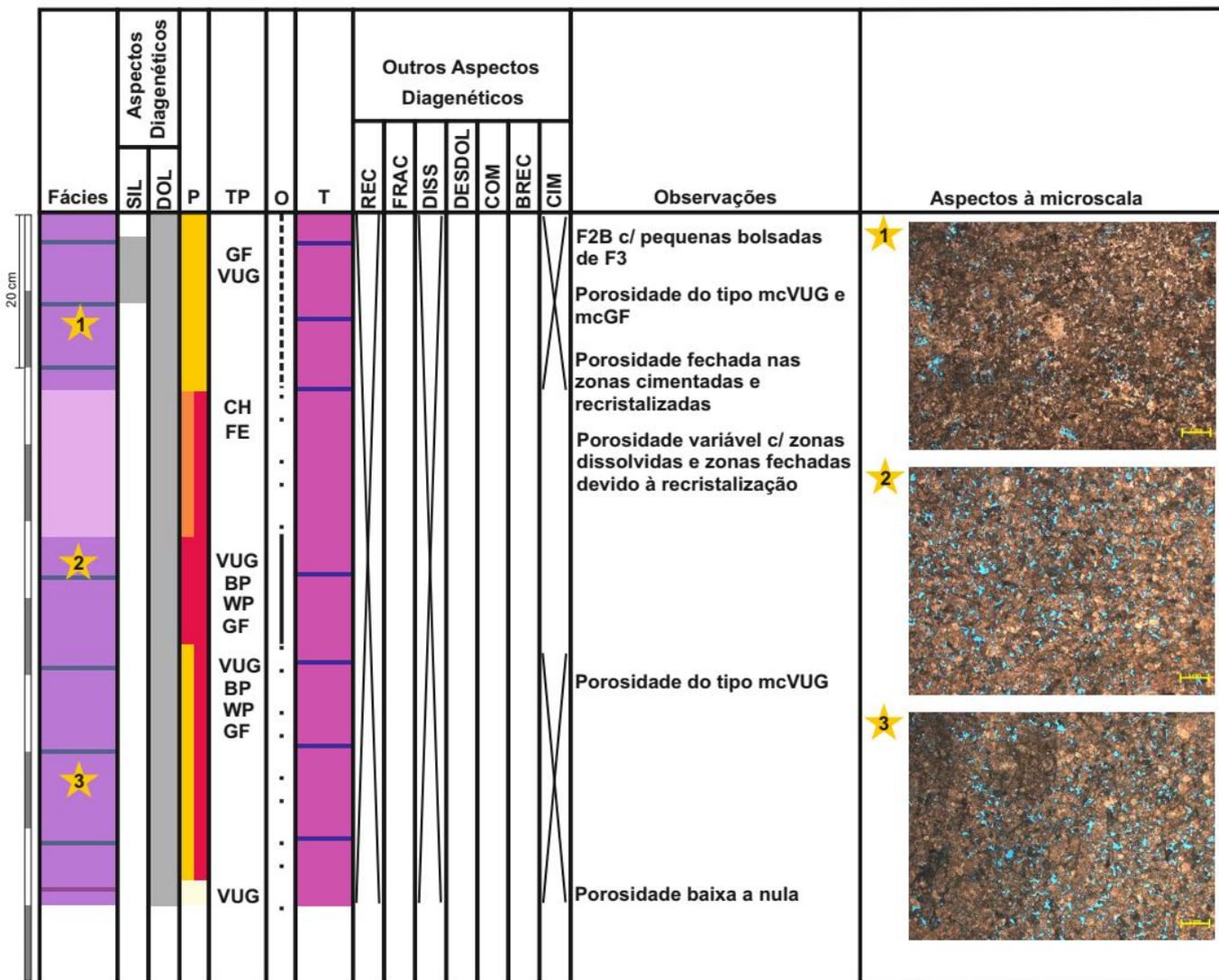
Anexo I.35 – Caixa 20 do testemunho 2 (5422,05m – 5422,95m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microescala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	20 cm														
1			VUG GF FE									Porosidade do tipo mcVUG Ocorrência de F3 no framework (trama) da F2B Porosidade do tipo mcVUG	1 		
2			VUG BP WP									Ocorrência de zonas/bandas recristalizadas	2 		
3													3 		

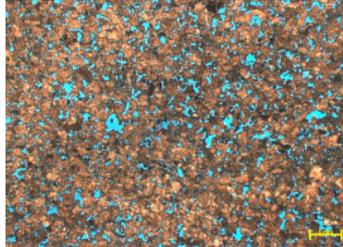
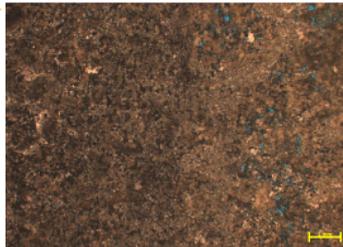
Anexo I.36 – Caixa 21 do testemunho 2 (5422,95m – 5423,85m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	20 cm														
1			VUG BP WP										Presença de zonas/bandas recristalizadas, no entanto este intervalo encontra-se menos recristalizado que os intervalos acima	1 	
2			GF VUG WP BP										F2B c/ pequenas bolsadas de F3 Zonas/bandados de recristalização importantes Em lâmina é possível identificar uma estrutura da F2B mais típica (F2BT)	2 	

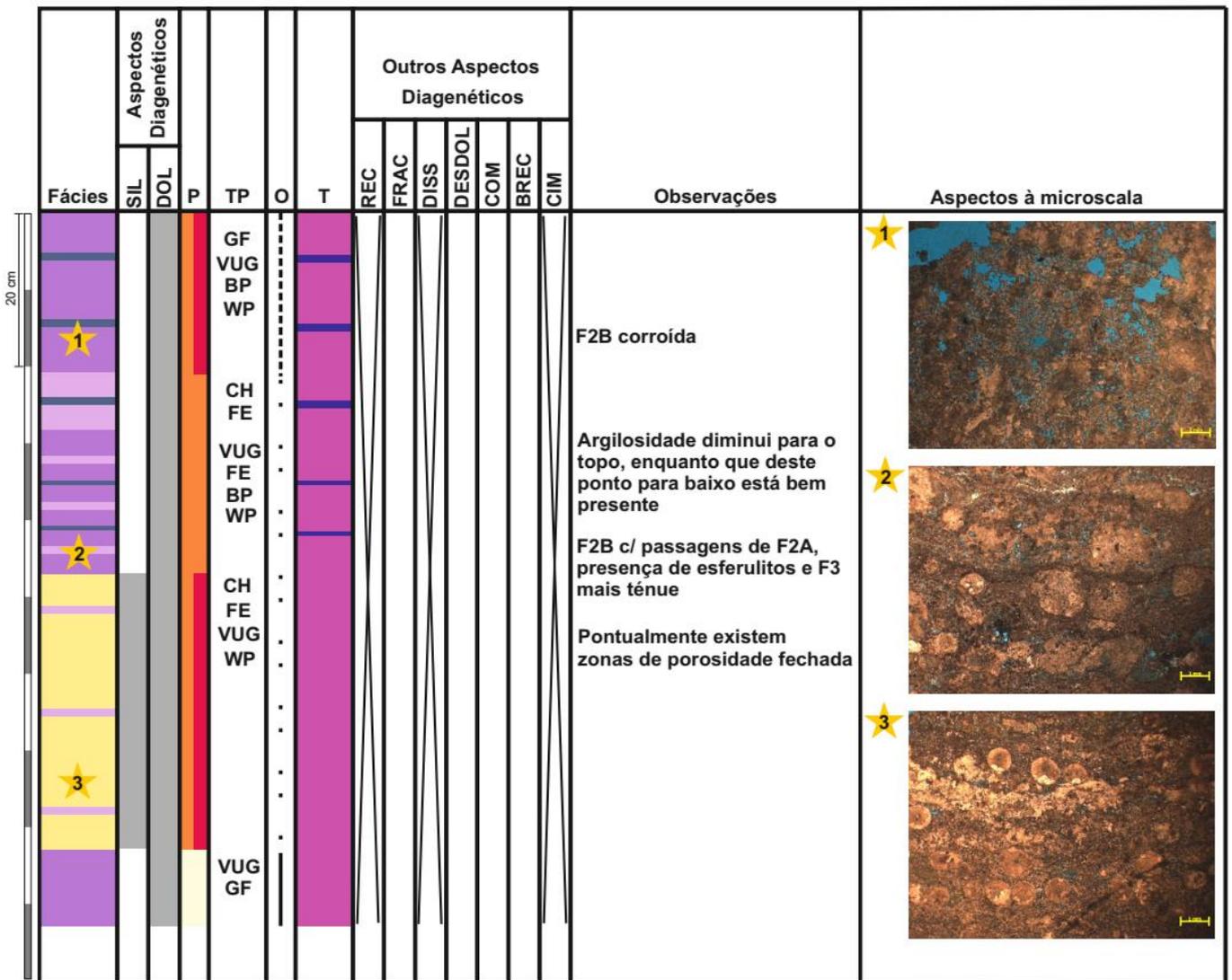
Anexo I.37 – Caixa 22 do testemunho 2 (5423,85m – 5424,70m).



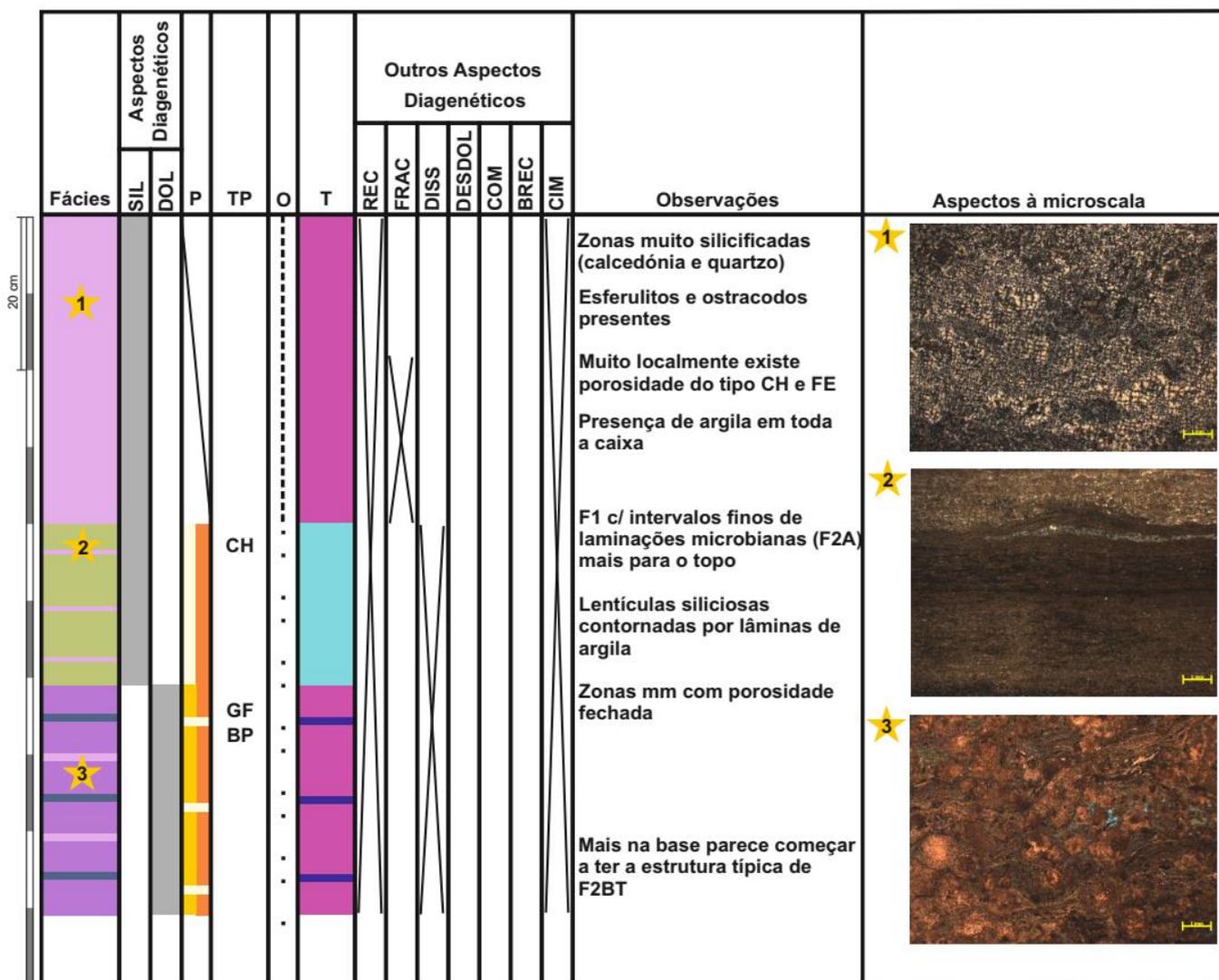
Anexo I.38 – Caixa 23 do testemunho 2 (5424,70m – 5425,60m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	 1 2														
			VUG BP WP GF									F2B de aspecto rendilhado	1 		
			VUG									Parecem micro-cristais de dolomite que terão sofrido desdolomitização	2 		
												Porosidade parece diminuir nesta zona			

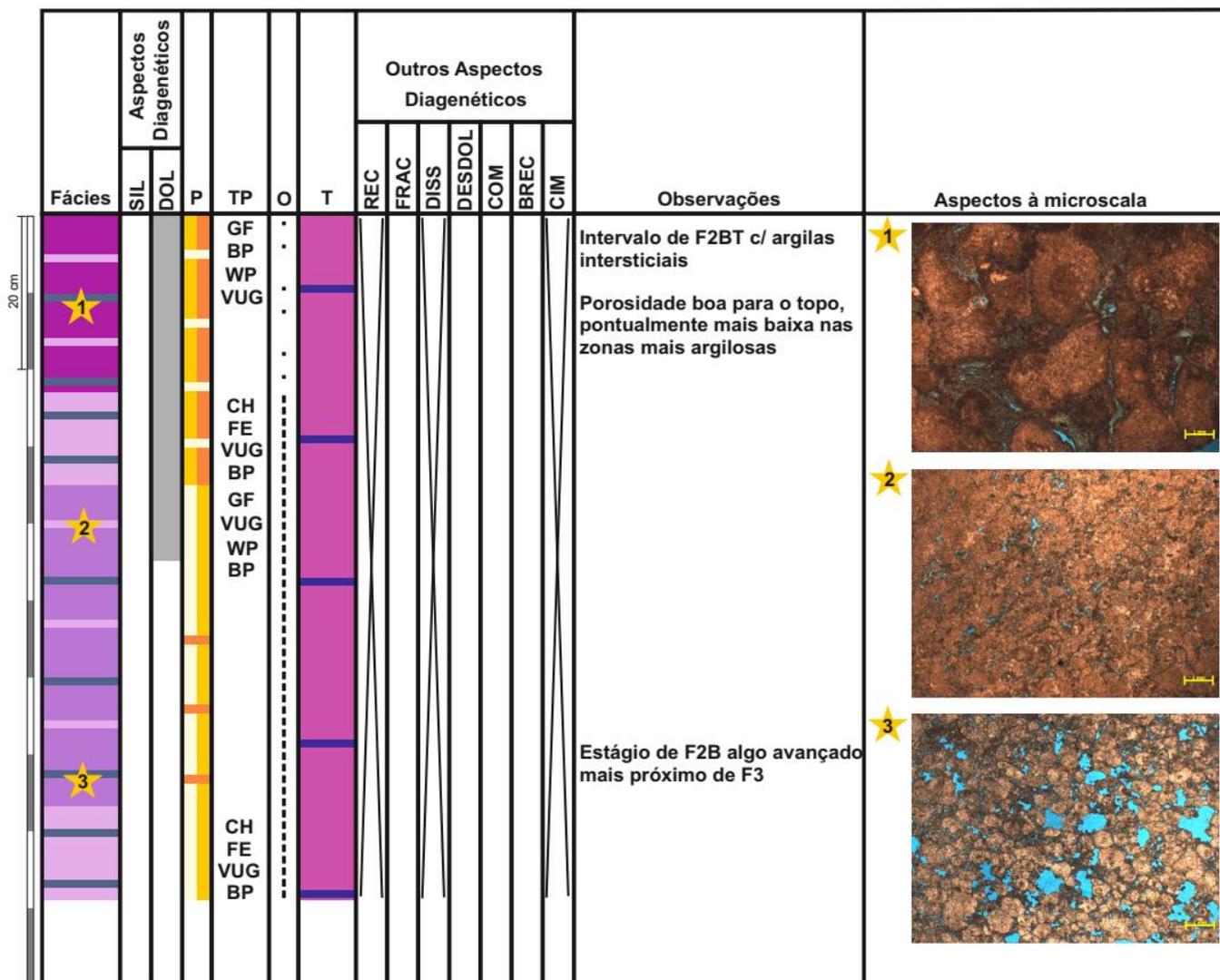
Anexo I.39 – Caixa 24 do testemunho 2 (5425,60m – 5426,50m).



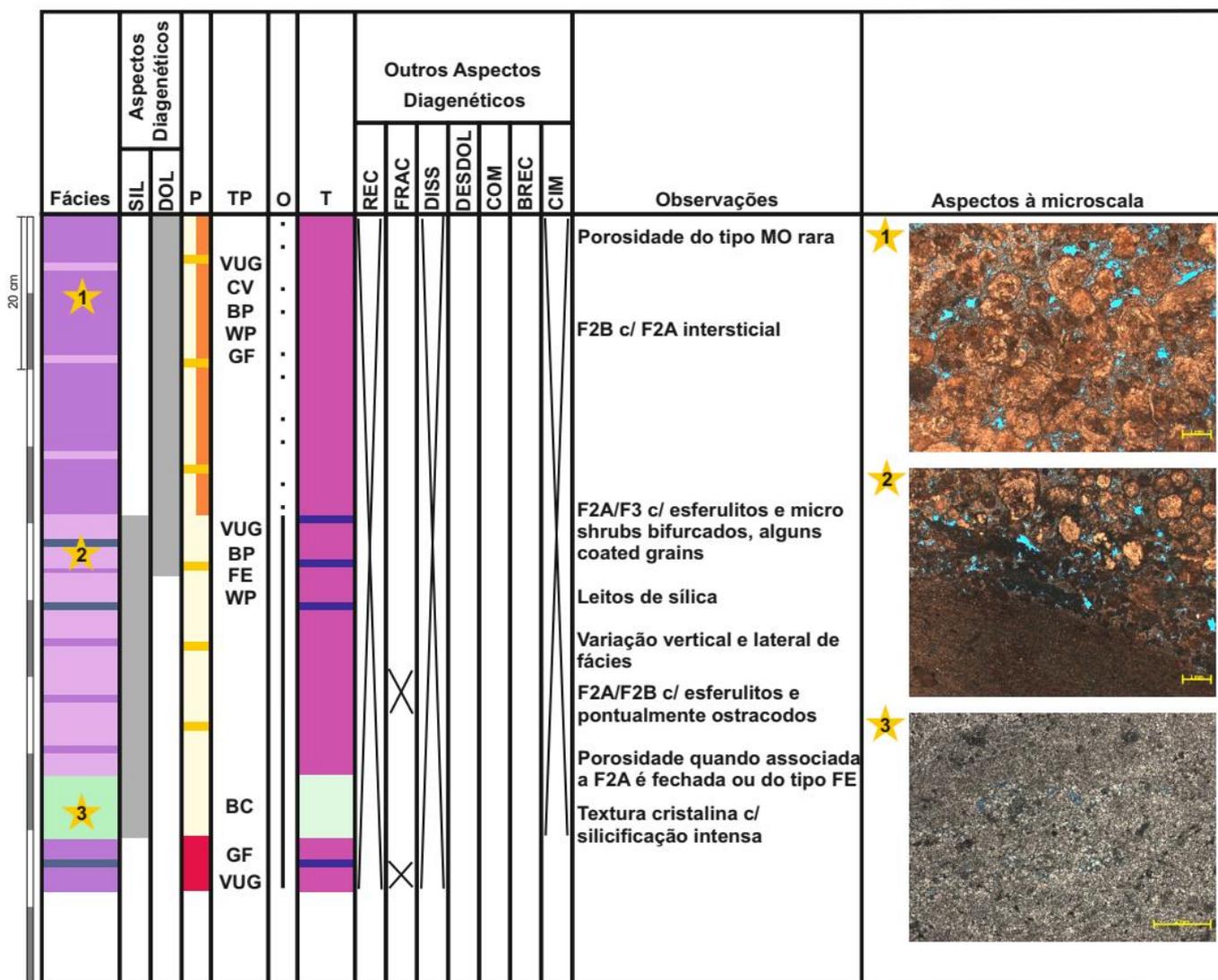
Anexo I.40 – Caixa 25 do testemunho 2 (5426,50m – 5427,40m).



Anexo I.41 – Caixa 26 do testemunho 2 (5427,40m – 5428,30m).



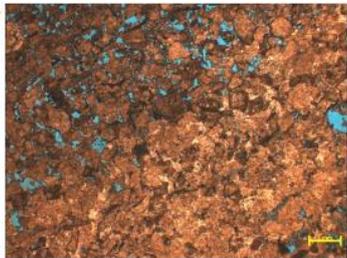
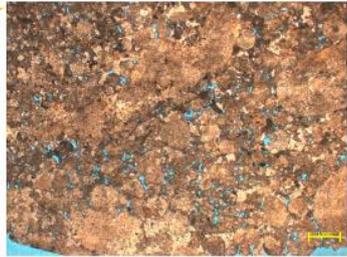
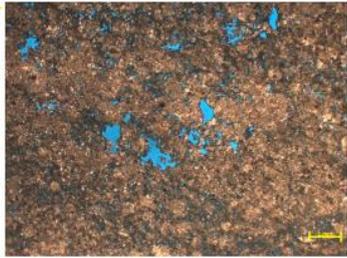
Anexo I.42 – Caixa 27 do testemunho 2 (5428,30m – 5429,20m).



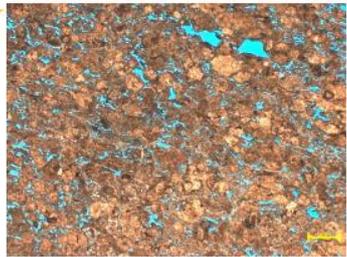
Anexo I.43 – Caixa 28 do testemunho 2 (5429,20m – 5430,10m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: small; margin-right: 5px;">20 cm</div> </div>				VUG BP WP CV GF										<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 5px;">★ 1</div> </div>	
				BP VUG								Contacto F2B/3 recristalizado	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 5px;">★ 2</div> </div>		
				VUG BP WP CV GF								Intervalos recristalizados	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 5px;">★ 3</div> </div>		

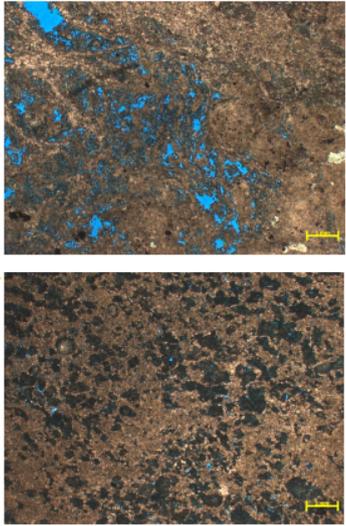
Anexo I.45 – Caixa 30 do testemunho 2 (5431,00m – 5431,90m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	20 cm														
1				GF VUG BP WP										1	
2				GF VUG										2	
3				GF VUG BP WP CH FE										3	

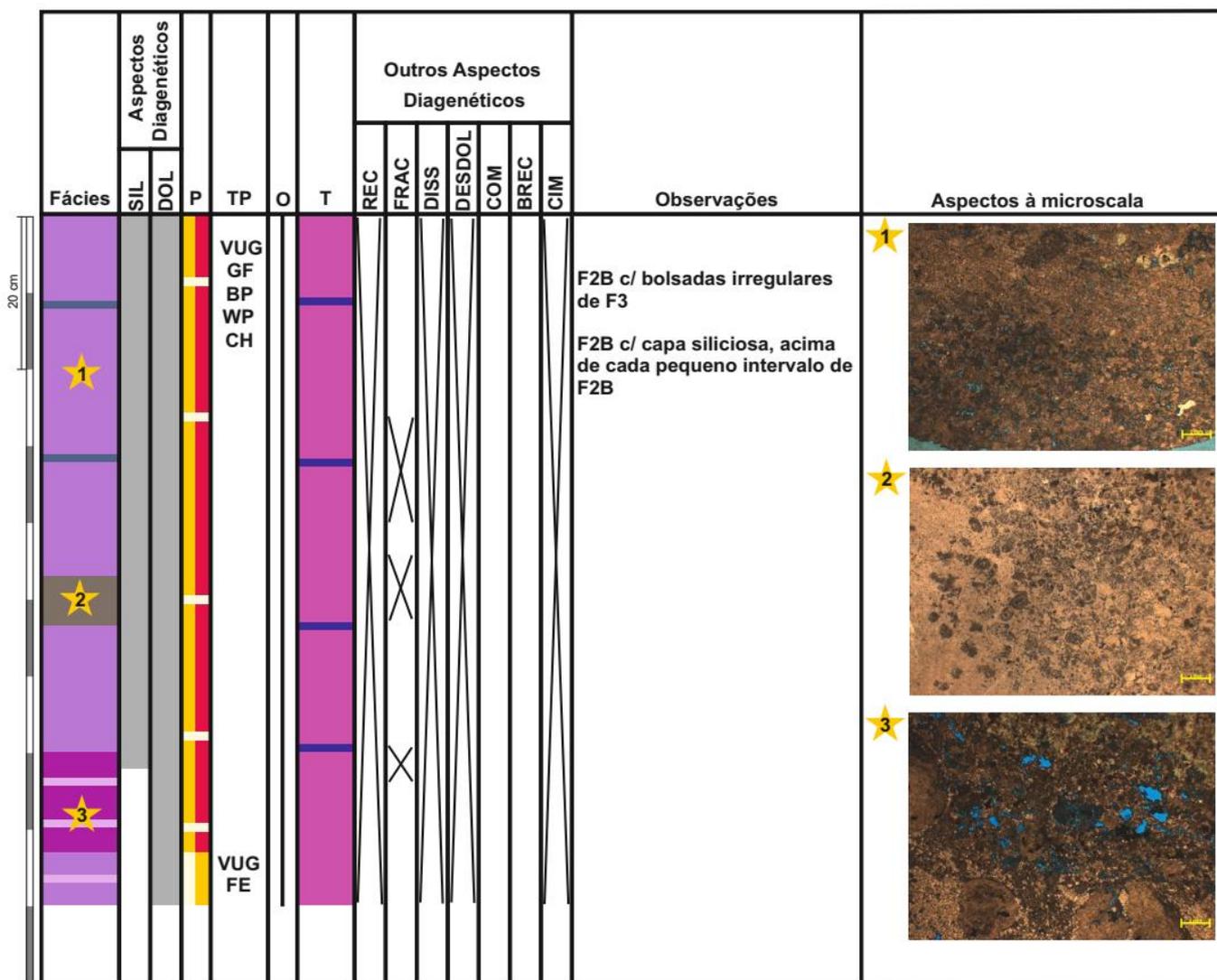
Anexo I.46 – Caixa 31 do testemunho 2 (5431,90m – 5432,80m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microescala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
1				CH VUG										Leitos e nódulos de sílica Porosidade do tipo mcVUG F1 c/ esferulitos	
2				VUG BP WP FE CH											
3				VUG GF VUG										F2BT c/ fragmentos c/ contactos saturados	

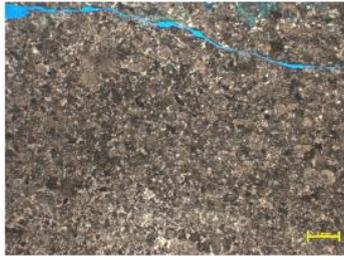
Anexo I.47 – Caixa 32 do testemunho 2 (5432,80m – 5433,65m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
20 cm 1 2			VUG GF BP WP VUG										F2B corroída Porosidade do tipo mcVUG	1 2 	

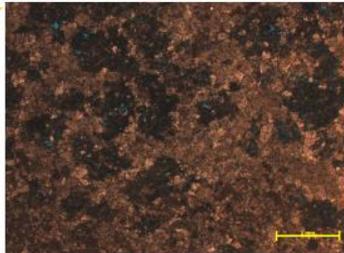
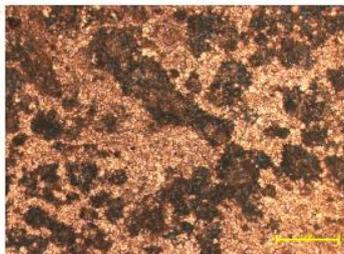
Anexo I.48 – Caixa 33 do testemunho 2 (5433,65m – 5434,55m).



Anexo I.49 – Caixa 34 do testemunho 2 (5434,55m – 5435,45m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	20 cm														
1			CH FE VUG										F2B/F2A c/ algum cimento micrítico Porosidade do tipo mcVUG Nódulos de sílica	1 	
2			CH VUG										F1 c/ esferulitos pequenos e dispersos Zona c/ alinhamento calcítico (preenchimento ou frag. de bivalves?) Porosidade do tipo mcVUG	2 	
3			VUG BP WP CH										Nódulos de sílica	3 	

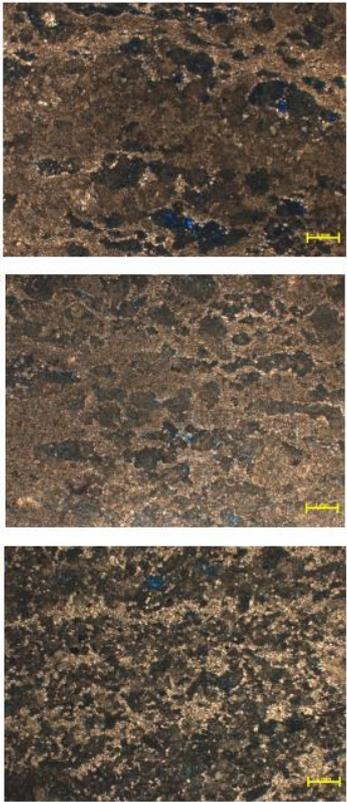
Anexo I.50 – Caixa 35 do testemunho 2 (5435,45m – 5436,35m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
	1								VUG WP GF						
2								X						2	
3								X						3	

Anexo I.52 – Caixa 37 do testemunho 2 (5437,25m – 5438,10m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
 20 cm 1 2 3				VUG BC WP											
												Porosidade do tipo mcVUG F2A intercalada c/ F2B	1 		
												Dolomitização pervasiva	2 		
													3 		

Anexo I.53 – Caixa 38 do testemunho 2 (5438,10m – 5439,00m).

Fácies	Aspectos Diagenéticos		P	TP	O	T	Outros Aspectos Diagenéticos						Observações	Aspectos à microscala	
	SIL	DOL					REC	FRAC	DISS	DESDOL	COM	BREC			CIM
20 cm 1 2 3				VUG BC WP									Porosidade do tipo mcVUG Dolomitização pervasiva Nódulos de sílica Tipicamente esteiras dolomíticas/dolomicrospáriticas Leitões grumosos e outros que seriam peliculares, dolomitizados	1 2 3 	

Anexo I.54 – Caixa 39 do testemunho 2 (5439,00m – 5440,60m).