UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DINÂMICA SEDIMENTAR, TAFONOMIA E PALEOAMBIENTES DA
FÁCIES DE *OFFSHORE* DA FORMAÇÃO SERRA ALTA, PERMIANO,
BACIA DO PARANÁ: UM ESTUDO DE CASO NO ESTADO DE SÃO
PAULO, BRASIL**

João Guedes Bondioli

Orientador: Prof. Dr. Marcello Guimarães Simões

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
2014

Bondioli, João Guedes

Dinâmica sedimentar, tafonomia e paleoambientes
da fácies de *offshore* da Formação Serra Alta,
Permiano, Bacia do Paraná: um estudo de caso no
Estado de São Paulo, Brasil / João Guedes Bondioli.

-- São Paulo, 2014.

130 p. : il.+ 2 anexos.

Dissertação (Mestrado): IGc/USP

Orient.: Simões, Marcello Guimarães

1. Tafonomia 2. Paleoambientes.3. Permiano
Título

À minha família, às minhas amigas “Anas”, e
à minha esposa Flávia.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcello Guimarães Simões pela orientação estimulante durante a elaboração deste trabalho, pelo exemplo profissional e pessoal;

Às colegas do Laboratório de Paleozoologia Evolutiva, IBB/UNESP, Jacqueline Peixoto Neves, Juliana Machado David, pela amizade estabelecida;

À amiga Suzana Aparecida Matos da Silva um agradecimento especial, não só pela amizade, mas pela contribuição decisiva em diversas fases (campo, laboratório e escritório) da elaboração deste estudo;

Aos Profs. Drs. Lucas V. Warren, Mário L. Assine e Cláudio Riccomini pela colaboração durante a elaboração em diferentes estágios deste estudo;

Ao Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo por toda infraestrutura colocada à disposição;

Ao Departamento de Zoologia do IBB/UNESP, especialmente ao Laboratório de Paleozoologia Evolutiva pelo uso de suas instalações e coleções;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pelo auxílio financeiro (Processo n.133053/2012-1);

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma maneira para que este trabalho pudesse ser realizado.

Finalmente, a presente Dissertação de Mestrado foi beneficiada com dados, fósseis e amostras de rochas e concreções carbonáticas pertencentes ao Laboratório de Paleozoologia Evolutiva, IBB/UNESP, as quais foram coletadas no âmbito de diversos projetos FAPESP, CNPq e, por várias gerações de alunos de graduação e pós-graduação do IBB/UNESP e IGc/USP. Sem tais amostras este estudo não poderia ter sido realizado.

Índice	
I. AGRADECIMENTOS	p. I
II. RESUMO	X
III. ABSTRACT	XII
 PARTE 1	 01
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	
1. INTRODUÇÃO	02
1.1. DELIMITANDO O PROBLEMA	05
1.2. JUSTIFICATIVA	06
1.3. OBJETIVOS	09
1.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10
 PARTE 2	 15
MATERIAL & MÉTODOS	
2. GEOLOGIA E PALEONTOLOGIA DA UNIDADE EM ESTUDO: REVISÃO SUCINTA	16
2.1. ANÁLISE TAFONÔMICA BÁSICA	18
2.2. OUTROS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
2.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
 PARTE 3	 26
RESULTADOS	
3. RESULTADOS OBTIDOS	27
3.1. DINÂMICA PALEOECOLÓGICA E PALEOAMBIENTAL	28
3.2. DEPÓSITOS DE SUFOCAMENTO (OBRUTION) NA FORMAÇÃO SERRA ALTA	30
3.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
 PARTE 4	 33
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	
4. DISCUSSÃO INTEGRADA	34
4.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
 PARTE 5	 44
CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESAFIOS PARA O FUTURO	
5. SUMÁRIO E CONCLUSÕES	45
5.1. HISTÓRIA DEPOSICIONAL, PALEOECOLOGIA E PALEOAMBIENTES (ANEXO1)	45
5.2. DEPÓSITOS DE SUFOCAMENTO (OBRUTION), ORIGEM E DIAGÊNESE PRECOCE (ANEXO2)	46
5.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ANEXOS

	p.
Anexo 1	51
Artigo 1: BONDOLI, J.G.; SILVA, S.M.; WARREN, L.V.; ASSINE, M.L.; RICCOMINI, C. & SIMÕES, M.G. <i>Em preparação.</i> Untold muddy stories: the ecological dynamics of an oxygen-deficient facies within a shallow, isolated Permian epeiric sea (Paraná Basin, Brazil).	51
Anexo 2	91
Artigo 2: BONDOLI, J.G.; SILVA, S.M.; WARREN, L.V.; ASSINE, M.L.; RICCOMINI, C. & SIMÕES, M.G. <i>Em preparação.</i> Fossil-bearing carbonatic concretions of the Permian Serra Alta Formation, Paraná Basin, Brazil, and the “paradox” of concretionary obrution beds.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Reconstrução esquemática da fauna vinculada à assembléia de <i>Anhembia froesi</i> na porção basal da Formação Serra Alta e unidades coevas (=Formação Corumbataí).	p. 3
Figura 2- Reconstrução esquemática da fauna vinculada à assembleia de <i>Pinzonella illusa</i> , na parte média da Formação Corumbataí.	4
Figura 3- Reconstrução esquemática da fauna vinculada à assembleia de <i>Pinzonella neotropica</i> , na parte superior da Formação Corumbataí.	4
Figura 4- Distribuição das assembleias de bivalves do Grupo Passa Dois.	6
Figura 5- Sucessão do Grupo Passa Dois, no Estado de São Paulo, pedreira Calcário Cruzeiro, Limeira.	17
Figura 6- Exemplos de amostras de rochas e concreções carbonáticas empregadas neste estudo.	20

ÍNDICE DE FIGURAS DOS ANEXOS**ARTIGO 1**

Figure 1- Location map of the study area, Google Earth image and general view showing the studied outcrops.	p. 82
Figure 2- Section of the basal portion of the Serra Alta Formation.	83
Figure 3- Dark gray siltstones of the basal portion of the Serra Alta Formation.	84
Figure 4- Detail of the two main horizons where carbonate concretions are common.	85
Figure 5- Thin intercalation of fine-grained sandstones in the massive siltstones.	86
Figure 6- Thin layer of bioturbated silty/muddy sandstone.	87
Figure 7- A ~20 cm thick, laterally continuous layer of limestone (black arrow).	88
Figure 8- A phosphate-rich layer intercalated with dark grey colored siltstones at the top of the study section.	89
Figure 9- Bivalve shells recorded along the study section.	90

ÍNDICE DE FIGURAS DOS ANEXOS

ARTIGO 2

Figure 1- Location map of the study area, Porangaba region, State of São Paulo and geological map showing the Late Palaeozoic and Mesozoic units in the studied outcrop belt.	P. 121
Figure 2- Geological section summarizing the stratigraphic information of the Serra Alta Formation from two outcrops (road cuts) along the kilometers 160.7 to 161.7, SP-280 highway, Porangaba County and carbonate concretions size measurements (maximum length parallel to bedding).	122
Figure 3- Well preserved bivalve shells recorded in carbonate concretion nuclei, Permian Serra Alta Formation.	123
Figure 4- A panoramic view (road cut) of the Serra Alta Formation cropping out at the kilometer 160.7, SP-280 highway, Porangaba County, State of São Paulo. A- Large carbonate concretions are abundant in siltstones at the base of the outcrop. B- Note the concretion-bearing bed 1 and associated large carbonate concretions.	124
Figure 5- Large carbonate concretions, bed 1, and associated bivalve shells.	125
Figure 6- Small carbonate concretions, bed 2.	126
Figure 7- Schematic diagram showing the main processes of formation of diagenetically enhanced bivalve-rich beds (concretion-bearing beds 1 and 2), Permian Serra Alta Formation, Brazil.	127
Figure 8- A centimeter thick, cracked limestone bed intercalated between concretion-bearing beds 1 and 2 (see also figure 2).	128
Figure 9- A general view (road cut) of the massive mudstones of the Serra Alta Formation, 3.3 km of the main entrance of the city of Imbituva, State of Paraná. This occurrence is located ~400 km toward south of our study area. Carbonate concretions are recorded in four distinct horizons. The large ones are at the basal portion of the section. Bivalve shells (<i>Maackia contorta</i> , see Fig. 3) were found in this exposition by Mendes (1954). This species is abundant in coeval siltstones of the Serra Alta Formation in our study area (see the text for discussion). Thus, fossil-rich concretions of the Serra Alta Formation may be useful in stratigraphic correlation.	129

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Critérios para o reconhecimento de condições exaeróbias (quase anóxicas) ou disaeróbias extremas, em fácies de <i>offshore</i> com deficiência na oxigenação, na Formação Serra Alta, Bacia do Paraná, Brasil.	p. 35
---	--------------

ÍNDICE DE TABELAS DOS ANEXOS**ARTIGO 1**

Table 1- Criteria for recognition of the exaerobic condition within an oxygen-deficient facies of the Serra Alta Formation, Paraná Basin, Brazil.	p. 71
--	------------------

ÍNDICE DE TABELAS DOS ANEXOS**ARTIGO 2**

Table 1- Main sizes of the measured carbonate concretions, Serra Alta Formation.	p. 130
---	-------------------

RESUMO

Fácies sedimentares deficientes em oxigênio, registradas em vários mares epeíricos (bacias intracratônicas) são comuns nos tratos de sistemas transgressivo e de mar alto, em sucessões sedimentares paleozoicas, mesozoicas e mais jovens. Elas são materializadas por sucessões monótonas de folhelhos negros e/ou argilitos maciços ou bem laminados, pobres em fósseis, as quais são pensadas terem sido depositadas em condições ambientais estáveis, de anoxia ou baixíssimas concentrações de oxigênio, na interface água sedimento. Durante o Paleozoico tardio, a bacia intracratônica do Paraná, Brasil, no centro do supercontinente Gondwana foi recoberta por um mar epeírico, extenso ($>1.600.000 \text{ km}^2$), raso e isolado. Na sucessão permiana da Bacia do Paraná, fácies representativas de condições de anoxia são comumente registradas nas formações Irati (Artinskiano) e Serra Alta (Kunguriano), sobrejacente. Argilitos e siltitos cinza-escuros, maciços ou bem laminados, muito pobres em fósseis, constituem os principais litótipos preservados nesta última unidade litoestratigráfica, o que tradicionalmente desencorajou estudos paleontológicos e estratigráficos de detalhe. Entretanto, investigações sedimentológicas, icnológicas e tafonômicas de detalhe (centímetro por centímetro) nestes depósitos indicam um cenário paleoambiental muito mais dinâmico e complexo, do que o previamente pensado. Fundamentado nas feições texturais dos sedimentos (*e.g.*, fábrica, presença/ausência de laminação primária, bioturbação), ocorrências autoctônes ou parautoctônes de invertebrados bentônicos providos de conchas carbonáticas (moluscos bivalves) e a presença/ausência de horizontes dominados por concreções carbonáticas e camadas ricas em nódulos fosfáticos, reporta-se aqui, pela primeira vez, drásticas variações no conteúdo de oxigênio, batimetria, taxas de sedimentação e mudanças na colonização do substrato bentônico, dentro das fácies de *offshore* da Formação Serra Alta. Os dados obtidos indicam que estes depósitos distais, gerados abaixo do nível de base de ondas de bom tempo, foram governados por uma conjunção de fatores paleoambientais complexos (*e.g.*,

taxa de sedimentação, pulsos de oxigenação), relacionados a mudanças do nível do mar. Três populações ou paleocomunidades distintas foram registradas, incluindo formas residentes adaptadas à: (a) condições normais de dia-a-dia, representadas por fundos pouco oxigenados (disaeróbios), colonizados por minúsculos (mm) bivalves de infauna, suspensívoros e *Planolites*, (b) táxons quimissimbiontes que habitavam substratos quimicamente tóxicos (anóxicos/extremamente disaeróbios=exaeróbios) (e.g., bivalves suspensívoros gigantes) e (c) populações eventuais que habitaram substratos aeróbios/disaeróbios, gerados durante eventos energéticos episódicos (e.g., *Planolites* e *Thalassionoides*). Estes achados têm importantes conotações no nosso entendimento das condições paleoambientais e dinâmica paleoecológica das faunas bentônicas, durante episódios transgressivos em mares epicontinentais rasos, isolados, onde fácies de *offshore*, com deficiência de oxigênio são abundantes.

ABSTRACT

Oxygen-deficient facies dominate the sedimentary record of various epeiric seas (intracratonic basins) and are common in the transgressive and highstand systems tract of several Paleozoic, Mesozoic and younger age successions. They are materialized by monotonous, fossil-poor (barren) successions of black shales and/or massive or well-laminated mudstones thought to be generated under stable conditions of oxygen depletion. During the late Paleozoic, the intracratonic Paraná Basin, Brazil, in the central Gondwanaland, was covered by a huge ($>1.600.000 \text{ km}^2$), shallow and isolated epeiric sea. Within the Permian succession oxygen-deficient facies are commonly recorded in the *Mesosaurus*-bearing Irati Formation (Artinskian) and the overlain Serra Alta Formation (Kungurian). Barren, dark-grey mudstones (massive or well-laminated) are the main facies preserved in this last unit, which has usually discouraged extensive and detailed stratigraphical and paleontological investigations. However, a detailed sedimentological (sub-cm scale), ichnological, and taphonomical survey in those deposits indicate a much more dynamic and complex paleoenvironmental scenario than previously thought. Based on textural features (presence/absence of primary lamination, bioturbation), autochthonous to parautochthonous occurrences of shelly benthic invertebrates (bivalves) and the presence/absence of concretion-dominated horizons and phosphate-rich layers, we report variations in the oxygen content, bathymetry, sedimentation rates, and changes in benthic substrate colonization. Our data indicate that the deposition of this “barren” mudstone-dominated succession was governed by a complex interplay of paleoenvironmental factors (sedimentation rate, and oxygen pulses) related to relative sea level changes. Three distinct populations or paleocommunities were recorded, including residents adapted to: (a) background normal low-oxygen (dysaerobic) conditions (minute infaunal suspension-feeding bivalves and *Planolites*), (b) co-existing chemosymbiotic taxa inhabiting chemically toxic (anoxic/extreme dysaerobic=exaerobic) substrates (*e.g.*, gigantic bivalves), and (c)

event populations inhabiting (aerobic/dysaerobic) substrates following short-term bottom disruptions (*e.g.*, *Planolites* and *Thalassionoides*). These findings have significant connotations for our understandings of the paleoenvironmental conditions and paleoecologic dynamics of the shelly benthic faunas during the transgressive events in extremely isolated and shallow epeiric seas where oxygen-deficient facies are abundant.

PARTE 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1. INTRODUÇÃO

Os moluscos permianos do Grupo Passa Dois (veja uma síntese em Simões *et al.*, 1998), Bacia do Paraná, conhecidos desde 1918, constituem um marco na história evolutiva da Classe Bivalvia (Runnegar & Newell, 1971). Sua evolução ocorreu *in situ*, em condições de alto grau de endemismo (extremo isolamento geográfico), em associação com importantes variações do nível do mar e progressivo isolamento geográfico da Bacia do Paraná, no final da Era Paleozoica (Beurlen, 1954; Runnegar & Newell, 1971; Simões *et al.*, 1998). Stanley (1979, 1990), por exemplo, enfatizou a semelhança entre o processo de radiação adaptativa dos bivalves das formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto, com a história evolutiva dos moluscos miocênicos do sudeste e centro da Europa, em especial após a fase evaporítica das bacias do Paratétis. Fatores paleoambientais, incluindo o evento euxínico representado pelos folhelhos negros da Formação Iratí, subjacente, bem como a diversidade de microhabitats durante o “tempo pós-Iratí”, devem ter exercido importante controle na radiação adaptativa intrabacinal dos bivalves (vide Simões *et al.*, 1998). A malacofauna de bivalves do Grupo Passa Dois é conhecida ainda como o mais antigo exemplo de evolução *in situ*, na história geológica da Classe Bivalvia (Wesselingh, 2007). Apesar disso, diversas questões paleobiológicas e geológicas ainda persistem relacionadas a estes importantes fósseis.

Em sucessão estratigráfica, as malacofaunas do Grupo Passa Dois são representadas pelas assembleias de *Anbembia froesi*, *Pinzonella illusa* e *Pinzonella neotropica* (Figs. 1 a 4). Essas são dominadas por membros dos Veneroida e Pachydomidae (Runnegar & Newell, 1971; Simões *et al.*, 1997, 1998), os quais aparecem de forma abrupta e aparentemente explosiva no registro sedimentar da base da Formação Serra Alta e unidades coevas (= Formação Corumbataí). Em outras palavras, embora membros do estoque ancestral dos táxons presentes nas formações Serra Alta, Teresina e Corumbataí ocorram nas formações Taciba, Rio Bonito e Palermo (Simões, 1992; Simões & Anelli, 2010), subjacentes, e em outras

unidades carboníferas e permianas da América do Sul (Runnegar & Newell, 1971; Simões, 1992), a presença de bivalves ou invertebrados com esqueleto carbonático nunca foi conclusivamente demonstrada na Formação Iratí. Portanto, uma instigante questão surge, ou seja, de onde surgiram os bivalves da Formação Serra Alta? Segundo o modelo evolutivo mais aceito (vide Runnegar & Newell, 1971; Simões, 1992), durante a deposição dos folhelhos negros da Formação Iratí, as condições euxínicas teriam restringido a fauna de bivalves às margens da bacia, onde condições mais oxidantes poderiam estar presentes. Processo semelhante foi observado na fauna de moluscos dos mares Negro e Cáspio, onde as condições anóxicas, no centro da bacia, restringem a fauna de invertebrados bentônicos aos ambientes marginais. No caso do Permiano da Bacia do Paraná, o registro dessa fauna poderia ter sido perdido pela erosão das rochas das margens da Bacia do Paraná (Runnegar & Newell, 1971; Simões, 1992).

Figura 1- Reconstrução esquemática da fauna vinculada à assembleia de *Anhembia froesi*, na porção basal da Formação Serra Alta e unidades coevas (=Formação Corumbatá), segundo Simões *et al.* (1998). A- *Anhembia froesi*, B- *Casterella gigantea*, C- *Maackia contorta*, D- *Kidodia* sp., E- *Anhembia gigantea*.

Figura 2- Reconstrução esquemática da fauna vinculada à assembleia de *Pinzonella illusa*, nas formações Teresina e Corumbataí, de acordo com Simões *et al.* (1998). A- *Roxoa corumbataiensis*, B- *Casterella gratiosa*, C- *Comperesia anceps*, D- *Holdhausiella elongata*, E- *Ferrazia cardinalis*, F- *Plesiocyprinella carinata*, G- *Angatubia comperesioides*, H- *Terraia aequilateralis*, I- *Pinzonella illusa*, J- *Coxesia mezzalirai*.

Figura 3- Reconstrução esquemática da fauna vinculada à assembleia de *Pinzonella neotropica*, na superior das formações Teresina e Corumbataí, segundo Simões *et al.* (1998). A- *Comperesia anceps*, B- *Roxoa intricans*, C- *Pinzonella neotropica*, D- *Jacquesia brasiliensis*, E- *Naiadopsis lamellosus*.

1.1. DELIMITANDO O PROBLEMA

Fato importante para a compreensão da evolução das malacofaunas do Grupo Passa Dois e das condições paleoambientais reinantes na época de deposição, diz respeito ao registro estratigráfico preservado na Formação Serra Alta e unidades coevas. Segundo Simões *et al.* (2000a, b), na face abandonada de algumas pedreiras (*e.g.*, Partecal Partezani Calcários Ltda) na região de Rio Claro, SP, onde está exposta a última intercalação rítmica de dolomitos e folhelhos pirobetuminosos (Formação Irati), bivalves ocorreriam em siltitos laminados situados 5 metros acima do contato com a Formação Irati. Já ao longo da sucessão exposta na rodovia Castello Branco, segundo os dados em Sousa (1985), os bivalves são registrados em depósitos situados 9 metros acima do contato com a Formação Irati (vide anexos 1 e 2). Assim sendo, o retorno de condições de águas oxigenadas durante a deposição das formações Serra Alta e Corumbataí foi acompanhado pelo aparecimento da malacofauna da assembleia de *Anhembia froesi* (Figs. 1 e 4). Trata-se do registro preservado do período de “recolonização” dos invertebrados bentônicos, após os “tempos Irati”. Contudo, as condições deposicionais durante a Formação Serra Alta (e unidades equivalentes) foram também marcadas pela presença de substratos pouco oxigenados, especialmente se comparado com as unidades sobrejacentes (Formação Teresina, por exemplo).

Desse modo, a presente dissertação de mestrado visa entender a dinâmica paleoambiental e paleoecológica dos depósitos da Formação Serra Alta, que registram a presença de membros da assembleia de *Anhembia froesi*, e que são representativos de condições distais, de fundos lamosos, gerados abaixo do nível de base de ondas de bom tempo. Estes depósitos são interpretados como gerados em condições de *offshore* (vide Sousa, 1985), com deficiência em oxigênio (anóxicos ou disaeróbios). Em geral, são representados por sucessões monótonas de argilitos e siltitos, laminados a maciços, pobres em fósseis, o que historicamente parece ter desencorajado estudos sedimentológicos e

paleontológicos mais detalhados.

CRONOESTRATIGRAFIA				LITOSTRATIGRAFIA		ASSEMBLÉIAS DE BIVALVES	AMBIENTE DEPOSICIONAL			
								GRUPO	FORMAÇÃO	MEMBRO
PERMIANO	GUADALUPIANO	LOPINGIANO		PASSA DOIS	RIO DO RASTO	MORRO PELADO	<i>Palaeomutela?</i> <i>platinensis</i>	SISTEMA EÓLICO		
		WUCHIAPINGIANO								
		WORDIANO	CAPITANIANO			SERRINHA		<i>Leinzia similis</i>	LAGO RASO	
			TATARIANO				Sem nome			
	ROADIANO	KAZANIANO			TERESINA	<i>Pinzonella neotropica</i>	<i>Pinzonella illusa</i>	MAR INTERIOR RASO		
		KUNGURIANO								
	CISURALIANO	KUNGURIANO			SERRA ALTA	<i>A. froesi</i>				
	KUNGURIANO	KUNGURIANO								

Figura 4- Distribuição das assembleias de bivalves do Grupo Passa Dois, segundo o arcabouço bioestratigráfico de Rohn (1994), com destaque, na base, para as formações Formação Serra Alta e depósitos coevos (Simões & Anelli, 2010).

1.2. JUSTIFICATIVA

A sucessão sedimentar da Bacia do Paraná, com mais de 1.600.00 km² (Milani *et al.*, 2007), engloba seis supersequências, limitadas por expressivas discordâncias, incluindo: Rio Ivaí (Ordoviciano/Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Pennsylvanian/Permiano), Gondwana II (Triássico), Gondwana III (Neojurássico/Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Milani *et al.*, 2007). Segundo estes

autores, as três primeiras sequências correspondem a grandes ciclos transgressivos paleozoicos, enquanto as demais são representadas por pacotes de rochas geradas em condições continentais, com atividade ígnea mesozoica associada (vide também Holz *et al.*, 2010).

Na sucessão Gondwana I, a Formação Serra Alta e rochas correlatas correspondem ao pacote de folhelhos cinza-escuros finamente laminados, em grande parte produto de decantação de finos (argila), em um contexto “marinho” de baixa energia (Gama Jr., 1979; Meglhioratti, 2006; Milani *et al.*, 2007; Holz *et al.*, 2010). Alguns autores interpretam estes depósitos como correspondentes à inundação do mar “Irati” (Gama Jr., 1979; Milani *et al.*, 2007). Assim, constituiriam a última incursão marinha importante, documentada na Bacia do Paraná (vide Milani *et al.*, 2007).

Aspecto notável é o de que, desde sua definição formal (Sanford & Lange 1960; Schneider *et al.*, 1974), nos anos 60, a Formação Serra Alta talvez figure como uma das unidades litoestratigráficas menos estudadas de toda sucessão sedimentar permiana da Bacia do Paraná (L.V. Warren comunicação pessoal, 2013). De acordo com Meglhioratti (2006), no Estado de São Paulo, a Formação Serra Alta apresentaria espessura média da ordem de 52m. Já Rohn *et al.* (2003) observou que no Estado do Paraná a unidade apresenta cerca de 68 m de espessura total, sem, no entanto, ultrapassar os 100 m (Meglhioratti, 2006). A maior parte dos autores concorda que há passagem gradual entre as formações Serra Alta e Teresina (vide Milani *et al.*, 2007), com ocorrência de discordâncias locais (vide Holz *et al.*, 2010). Assim, a unidade Serra Alta representaria condições mais distais, de águas pouco oxigenadas, como indicado pelos argilitos e siltitos cinza escuros, bem laminados ou maciços, que englobam grande parte do registro sedimentar desta unidade (vide Meglhioratti, 2006, por exemplo). Ocorrências fósseis de macroinvertebrados são raras na Formação Serra Alta e ainda pouco estudadas (Maranhão, 1986; Maranhão & Petri, 1996; Simões *et al.*, 2000a, b), especialmente se comparadas às das unidades Teresina

e Corumbataí. Nestas unidades estão representados principalmente os depósitos de fácies heterolíticas, com acamamento flaser/*wavy*/lenticular, de folhelhos cinza e arenitos muito finos interlaminados. Tais rochas são, geralmente, bioturbadas e, às vezes, com gretas de contração, além de fácies de arenitos (Sousa, 1985). Os estratos carbonáticos, por sua vez, apresentam espessuras que variam de alguns milímetros a poucos centímetros (20 a 40 cm) (Neves, 2009; Neves *et al.*, 2010). Os fósseis mais abundantes são os bivalves, os quais ocorrem também em depósitos de tempestito proximal, representados por arenitos bioclásticos (Mendes, 1952; Simões & Kowalewski, 1998) e coquinas (Mendes, 1952; Simões *et al.*, 1996). Os carbonatos comumente estão intercalados como camadas discretas entre as sucessões cíclicas siliciclásticas (vide Neves, 2009; Neves *et al.*, 2010).

No contexto acima descrito, qual o problema científico envolvido? Se, por um lado, a Formação Serra Alta constitui uma das unidades menos estudadas da sucessão permiana da Bacia do Paraná, de outro, sua importante malacofauna recebeu também pouquíssima atenção (vide Maranhão, 1986). Muitos dos dados disponíveis permanecem não publicados e muitas das espécies conhecidas não foram descritas de acordo com o Código Internacional de Nomenclatura Zoológica e, portanto, não são válidas. Aliado a este fato, o modo de ocorrência (tafonomia) das conchas e as condições paleoambientais em que viveram e foram preservadas são também pouco compreendidas. Além disso, os argilitos e siltitos em que são encontradas são ditos como gerados em condições de águas mais calmas, possivelmente abaixo do nível de base de ondas de tempestades. Conforme discutido mais adiante (vide anexos 1 e 2), estes depósitos possuem história deposicional extremamente complexa e o quadro paleoambiental que se apresenta é muito mais dinâmico do que o previamente pensado (vide anexos 1 e 2).

Assim sendo, nesta pesquisa foi enfocada a questão tafonômica e paleoambiental, ou seja, da gênese de algumas das ocorrências fósseis da Formação Serra Alta, em especial do pacote representado pela sucessão monótona de siltitos laminados ou maciços, de

coloração cinza escura. Este pacote de pelitos, em geral, situado no terço inferior da unidade, com cerca de duas dezenas de metros, é seguramente a feição mais característica da Formação Serra Alta (vide Warren *et al.*, em prep.). Estas informações são importantes, pois fornecem (1) dados adicionais para o entendimento do quadro evolutivo da malacofauna endêmica do Grupo Passa Dois e para a solução de problemas ainda pendentes, quanto (2) às condições deposicionais dos estratos fossilíferos da Formação Serra Alta e seu significado paleoambiental. Finalmente, estes dados tem aplicações em sucessões similares, geradas em mares epicontinentais.

1.3. OBJETIVOS

Em decorrência do acima exposto, a presente dissertação está fundamentada na hipótese de que os depósitos de *offshore* da Formação Serra Alta, contendo fósseis de invertebrados bentônicos, apresentam dinâmica paleoambiental e paleoecológica muito mais complexa do que o até aqui considerado por autores prévios. Assim sendo, é apresentado um estudo tafonômico de alta resolução (nível de lâmina, sub-cm) para algumas das mais notáveis ocorrências destes fósseis na unidade Serra Alta (vide Simões *et al.*, 2000a, b), oferecendo a oportunidade de discutir questões sedimentológicas, paleoecológicas e estratigráficas, ainda pouco exploradas, no contexto do Grupo Passa Dois. Portanto, o objetivo geral deste estudo é o de abordar a tafonomia dos estratos fossilíferos da Formação Serra Alta, no centro do Estado de São Paulo, especialmente na região de Porangaba, onde dados prévios apontam para a ocorrência de depósitos de *offshore* (Sousa, 1985), contendo bivalves (Simões *et al.*, 2000). Para isso, os seguintes objetivos específicos foram cumpridos:

- a- Descrição do ponto de vista tafonômico, das ocorrências fossilíferas da Formação Serra Alta ao longo da seção estratigráfica da rodovia Castello Branco, SP-280, e sua comparação com outras provenientes da porção basal da Formação

- Corumbataí, em Rio Claro, SP e adjacências (Limeira-Piracicaba);
- b- Interpretação da gênese dos estratos fossilíferos, com base nas assinaturas tafonômicas dos bioclastos e da biotrama, complementando-os com o uso de outras ferramentas (sedimentológicas=fabrica), paleontológicas (fósseis-traço) e diagenéticas;
 - c- Discussão dos aspectos relacionados à paleoautoecologia dos bivalves registrados nos depósitos estudados, procurando confrontar os aspectos morfofuncionais, com os sedimentológicos e tafonômicos;
 - d- Discussão das implicações paleoambientais dos dados obtidos no âmbito da sucessão sedimentar estudada, bem como de depósitos similares gerados em outras bacias epicontinentais na busca de padrões semelhantes.

1.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEURLIN, K. (1954). As faunas de lamelibranquios do sistema Gonduwânico no Paraná. *In: LANGE, F. W. (Ed.), Paleontologia do Paraná, Volume Comemorativo do 10º Centenário do Estado do Paraná, Curitiba, Brasil*, p. 107-136.
- GAMA Jr., E. (1979) A sedimentação do Grupo Passa Dois (exclusive Formação Irati), um modelo geomórfico. *Revista Brasileira de Geociências*, **9**: 1-16.
- GHILARDI, R.P., SIMÕES, M.G., MELLO, L.H.C., & TORELLO, F.F. (1997) The oldest occurrence of pelecypods shells in Corumbataí Formation (Late Permian), Paraná Basin, Brazil. *In: Congresso Brasileiro de Paleontologia*, 15, São Pedro, 1997. *Boletim de Resumos...*, p. 64.
- HOLZ, M.; FRANÇA, A.B.; SOUZA, P.A.; IANNUZZI, R. & ROHN, R. (2010). A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**: 381–399.

- MARANHÃO, M.S.A.S. (1986) *Contribuição ao conhecimento da malacofauna das camadas basais da Formação Corumbataí (Permiano), Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, 88p.
- MARANHÃO, M.S.A.S. & PETRI, S. (1996) Novas ocorrências de fósseis nas formações Corumbataí e Estrada Nova do Estado de São Paulo e considerações preliminares sobre seus significados paleontológico e bioestratigráfico. *Revista do Instituto Geológico*, **12**: 33-54.
- MEGLHIORATTI, T. (2006) *Estratigrafia de Seqüências das formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (Permiano, Bacia do Paraná) na porção nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo*. 133p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP.
- MENDES, J.C. (1949) Novos lamelibrânquios fósseis da Série Passa Dois (Sul do Brasil). Rio de Janeiro, DNPM/DGM. *Boletim*, 133, 40p.
- MENDES, J.C. (1952) A Formação Corumbataí na região do Rio Corumbataí. (Estratigrafia e descrição dos lamelibrânquios). *Boletim da FCLF-USP*, 145, *Geologia*, **8**: 1-119.
- MEZZALIRA, S., MENDES, J. C. & MARANHÃO, M.S.A.S (1990) *Anhembia*: novo gênero de bivalves do Grupo Passa Dois - Permiano. *Revista do Instituto Geológico*, **8-11**: 51-54.
- MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A. & FRANÇA, A.B. (2007) Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, **15**: 265–287.
- NEVES, J. P. (2009) *Tafonomia de rochas carbonáticas conchíferas das formações Teresina e Rio do Rasto (Permiano, Bacia do Paraná)*. 89p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP
- NEVES, J.; ROHN, R. & SIMÕES, M.G. (2010) Tafonomia de Biválvios em Calcários Oolíticos da Formação Teresina (Bacia do Paraná, Permiano Médio, Prudentópolis,

- PR). *Revista do Instituto de Geociências - USP, Sér. cient., São Paulo*, **10**: 19-36.
- ROHN, R. (1994) *Evolução ambiental da Bacia do Paraná durante o Neopermiano no leste de Santa Catarina e do Paraná*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, 480p.
- ROHN, R.; LOURENÇO, A.T.A.; MEGLHIORATTI, T. (2003) As formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto no furo de sondagem SP-23-PR (Permiano, Grupo Passa Dois, Borda Leste da Bacia do Paraná). *In: Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás*, 2, Rio de Janeiro: UFRJ, Petrobras. *Resumos...*, p. 1-6,
- RUNNEGAR, B. & NEWELL, N.D. (1971) Caspian- like relict moluscan fauna in the South America Permian. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 146: 1-66.
- SANFORD, R. M.; LANGE, F.W. (1960) Basin-study approach to oil evaluation of Paraná miogeosyncline, south Brazil. *AAPG Bulletin, Tulsa*, **44**: 1316-1370.
- SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; & NOGUEIRA, A. (1974) A.Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 28, Porto Alegre. *Anais...*, p. 41-65.
- SIMÕES, M.G. (1992) *Pelecípodes da Formação Palermo (Permiano) de São Sepé (RS) e Guiratinga (MT): implicações na evolução da fauna Neopaleozóica da Bacia do Paraná, Brasil*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP. 286p.
- SIMÕES, M.G. & ANELLI, L.E. (2010) Taxonomic position of *Guiratingia mendesi* (Megadesmidae) and the evolution of permian endemic bivalve fauna of the Paraná Basin, Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **13**: 167-174.
- SIMÕES, M.G. & KOWALEWSKI, M. (1998) Shell beds as paleoecological puzzles: a case study from the Upper Permian of the Paraná Basin, Brazil. *Facies*, **38**: 175-196.
- SIMÕES, M.G. & TORELLO, F.F. (2003) Modelo de tafofácies para os moluscos bivalves do Grupo Passa Dois (Formações Serra Alta, Teresina e Corumbataí), Permiano

- Superior, Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **33**: 1-10.
- SIMÕES, M.G.; TORELLO, F.F. & ROCHA-CAMPOS, A.C. (1996) Gênese e Classificação da Coquina de Camaquã, Formação de Corumbataí (Neopermiano), na Região de Rio Claro, SP. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **68**: 545-557.
- SIMÕES, M.G.; MARQUES, A.C.; MELLO, L.H.C. & ANELLI, L.E. (1997) Phylogenetic analysis of the genera of the extinct Family Megadesmidae (Pelecypoda, Anomalodesmata), with remarks on its paleoecology and taxonomy. *Journal of Comparative Biology*, **2**: 75-90.
- SIMÕES, M.G.; ROCHA-CAMPOS, A.C. & ANELLI, L.E. (1998) Paleoecology and evolution of Permian pelecypod assemblages (Paraná Basin) from Brazil. In: JOHNSTON, P.A. & HAGGART, J.W. (Ed.) *Bivalves - An Eon of evolution: paleobiological studies honoring Norman D. Newell*. Calgary: University of Calgary Press, p. 443-452.
- SIMÕES, M.G.; MELLO, L.H.; TORELLO, F.F. & GHILARDI, R.P. (2000a). *Tambaquyra* gen.n. (Bivalvia, Anomalodesmata), Formação Serra Alta (Neopermiano), Grupo Passa Dois, Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Universidade de Guarulhos, Série Geociências*, **6**: 11-19.
- SIMÕES, M.G.; TORELLO, F.F.; MELLO, L.H.C & GHILARDI, R.P. (2000b) O conteúdo fóssilífero de novos afloramentos do Grupo Passa Dois (Neopermiano), nas porções centro sul e nordeste do Estado de São Paulo: implicações bioestratigráficas e paleoecológicas. *Acta Geologica Leopoldensia*, **23**: 61-90.
- STANLEY, S.M. (1990) *Adaptive radiation and macroevolution*. Systematics Association Special Volume, v. 42, p. 1-16.
- STANLEY, S.M. (1979) *Macroevolution, Pattern and Process*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 332 p.
- WARREN, L.V.; ASSINE, M.L.; SIMÕES, M.G.; RICCOMINI, C. & ANELLI, L.E. (em

preparação). Evolução sedimentar da Formação Serra Alta, Permiano (Guadalupiano), no Estado de São Paulo, Brasil.

WESSELING, F.P. (2007) Long-lived lake molluscs as island faunas: a bivalve perspective, *In: RENEMA, W. (ed.). Biogeography, time and place: distributions, barriers and islands*, Dordrecht: Springer, p. 275-314.

PARTE 2

MATERIAL & MÉTODOS

2. GEOLOGIA E PALEONTOLOGIA DA UNIDADE EM ESTUDO: REVISÃO SUCINTA

A presente dissertação é apresentada na forma de artigos científicos e, por esta razão, o detalhamento dos materiais e métodos empregados está contido nos anexos 1 e 2, que englobam, respectivamente, as contribuições derivadas dos resultados obtidos. Assim sendo, o leitor deverá consultá-los para os detalhes metodológicos empregados ao longo desta pesquisa. A seguir, serão comentados brevemente os aspectos metodológicos de ordem mais geral.

Conforme indicado nas considerações iniciais deste documento, os depósitos permianos da Bacia do Paraná inserem-se no contexto da supersequência Gondwana I de Milani *et al.* (2007), abrangendo o intervalo Neocarbonífero-Eotriássico (Moscoviano-Olenekiano). Sua história deposicional iniciou-se sob influência da glaciação permo-carbonífera, seguida por uma longa fase transgressiva, caracterizada por sistemas deposicionais costeiros (onde se originaram carvões) a marinhos rasos e uma fase regressiva, mais longa, primeiramente em condições de mar restrito (com geração de hidrocarbonetos, dolomitos e evaporitos), seguido da última incursão marinha e, finalmente, a gradual continentalização, encerrando-se com ampla sedimentação eólica (Milani *et al.*, 2007).

O Grupo Passa Dois engloba a sucessão consensualmente permiana, incluindo a Formação Irati, na porção basal (Milani *et al.*, 2007; Holz *et al.*, 2010). Parece haver consenso também que durante a deposição da Formação Irati, de idade artinskiana (Eopermiano, Santos *et al.*, 2006), a Bacia do Paraná esteve quase totalmente desvinculada de um ambiente francamente marinho (Araújo, 2001; Lages, 2004; Rohn, 2007; Matos, *et al.*, 2013). Por outro lado, alguns fósseis, como os mesossaurídeos e, provavelmente, os crustáceos (vide Matos, *et al.*, 2013), atestam comunicação aquática entre as bacias do Paraná, Karoo (sul da África) e Huab (Namíbia). A alternância de calcários e folhelhos betuminosos na parte superior da Formação Irati (Fig. 5), observada em toda a parte

oriental e nordeste da bacia, parece refletir variações climáticas cíclicas (condições secas e úmidas) na escala de milhares de anos (Hachiro & Coimbra, 1993; Araújo, 2001).

Figura 5- Sucessão do Grupo Passa Dois na pedreira do Calcário Cruzeiro, na região de Limeira, SP, mostrando folhelhos negros no topo da Formação Irati, passando para os sedimentitos (siltitos e argilitos cinza-esverdeados), da porção basal da Formação Serra Alta. A coloração avermelhada para o topo é, provavelmente secundária, pois em testemunhos as rochas possuem coloração cinza-escura ou esverdeada (R. Rohn, comunicação verbal).

A Formação Serra Alta e depósitos equivalentes da base da Formação Corumbataí (Fig. 5) sobrepõem-se à Formação Irati e são caracterizados por folhelhos, provavelmente depositados em águas calmas afastadas da costa, abaixo do nível de base de ondas de bom tempo (Holz *et al.*, 2010). Estes depósitos são monótonos e muito pobres em fósseis, destacando-se, principalmente, os moluscos bivalves em sua porção inferior. Estes são atribuídos à assembleia de *Anhembia froesi* (Figs. 1, 4) (Mendes, 1952; Maranhão, 1986; Simões *et al.*, 2000b). Na faixa aflorante oriental da Bacia do Paraná, a Formação Serra Alta é sucedida pela Formação Teresina. Esta é formada principalmente por folhelhos cinza escuros, interlaminados, com arenitos muito finos (Rohn, 1994, 2001, 2007; Meghioratti, 2006). Segundo Sousa (1985), dentre outros autores, as duas unidades litoestratigráficas acima equivalem, no norte/nordeste do Estado de São Paulo, à Formação Corumbataí.

Esta unidade é composta por argilitos e siltitos avermelhados em superfície (Rohn, 1994, 2001; Meghioratti, 2006) (Fig. 5), intercalações arenosas e carbonatos. As rochas siliciclásticas estão organizadas em sucessões cíclicas granocrescentes, que se iniciam com argilitos e terminam com arenitos bioclásticos, os quais representam tempestitos proximais (Simões & Kowalewski, 1998). Também ocorrem muitas intercalações de rochas carbonáticas, principalmente biomicritos, bioosparitos (Neves, 2009; Neves *et al.*, 2010) e coquinas (vide Simões *et al.*, 1996). Os bivalves são representativos das assembleias de *Pinzonella illusa* e *P. neotropica* (Figs. 1 a 4).

2.1. ANÁLISE TAFONÔMICA BÁSICA

Este estudo contou com um conjunto numeroso de amostras (>1800 espécimes de bivalves pessoalmente examinados, além de 35 concreções carbonáticas de dimensões variáveis, vide anexo 2), pertencentes à Coleção Científica do IBB/UNESP. Durante as coletas, as seções estudadas na região de Porangaba e Rio Claro, SP, foram georreferenciadas e posicionadas no contexto das unidades estratigráficas investigadas (anexos 1 e 2). Três principais seções foram analisadas, duas em Porangaba, SP, ao longo da rodovia Castello Branco, SP-280, quilômetros 160.7 e 161.7, no sentido capital interior e outra na pedreira Partecal, em Rio Claro, SP. As seções foram descritas (com elaboração de perfis estratigráficos), mas os dados aqui apresentados e discutidos nos anexos 1 e 2 focam, principalmente, na seção aflorante da Formação Serra Alta, na rodovia Castello Branco. A razão para isso é a grande quantidade de dados relevantes inéditos, para as interpretações paleoambientais e paleoecológicas, no contexto do Grupo Passa Dois.

Os bivalves foram coletados em campo, de acordo com a rotina de trabalho para rochas siliciclásticas (Feldmann *et al.*, 1989). Dados específicos de coleta de cada amostra (data, localidade, tipo de material) foram sistematicamente anotados. Do ponto de vista tafonômico, no campo, foram realizadas observações qualitativas, com especial atenção à

(a) espessura dos estratos fossilíferos e sua (b) continuidade lateral, (c) geometria, (d) contatos, além do (e) grau de empacotamento e (f) assinaturas tafonômicas dos bioclastos, conforme sugerido por Kidwell & Holland (1991), Simões & Kowalewski (1998) e Simões & Ghilardi (2000). Em laboratório, as amostras foram preparadas de acordo com as recomendações de Feldmann *et al.* (1989). Os atributos tafonômicos foram descritos com base em trabalhos de referência, tais como: Kidwell *et al.* (1986), Brett & Baird (1986), Fürsich & Oschman (1986, 1993) e Kidwell & Holland (1991). Para a classificação genética das concentrações fossilíferas, os critérios obedecerão Kidwell (1991) e Fürsich & Oschmann (1993). A identificação das conchas de moluscos bivalves será empregada a sistemática sugerida por Mendes (1952), Runnegar & Newell (1971), Maranhão (1986) e, principalmente, Simões *et al.* (1997). Finalmente, os métodos de estudo das concreções carbonáticas fossilíferas, uma importante novidade desta dissertação, estão detalhadamente descritos no anexo 2.

2.2. OUTROS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em adição aos procedimentos acima citados, o arcabouço metodológico envolveu ainda uma análise sedimentológica, icnológica e paleontológica combinada. Este procedimento seguiu as recomendações em Kauffman & Sageman (1990), Sageman *et al.* (1991), Boyer (2010) e Boyer & Droser (2011), envolvendo a análise de detalhe (nível de lâmina sedimentar) de um pacote de rochas de aproximadamente 11 metros de espessura, incluindo maiormente siltitos cinza escuros, maciços ou às vezes laminados, da Formação Serra Alta, na seção aflorante da rodovia Castello Branco já mencionada acima (vide anexo 1).

O conjunto de amostras consistiu de vários blocos (centimétricos a métricos) (Fig. 6) de siltitos, arenitos finos, calcários e camadas fosfáticas, além dos já citados 1800 espécimes de bivalves e dezenas de concreções carbonáticas (calcíticas). Várias amostras, incluindo as

concreções foram seccionadas e polidas com *carborundum* de diferentes granulções (vide anexos 1 e 2).

No campo, os sedimentos foram distinguidos com base na litologia, estruturas sedimentares físicas, superfícies de contato das camadas e as assinaturas icnológicas e tafonômicas dos fósseis associados. A análise dos icnofósseis fundamentou-se na identificação de icnotáxons e na quantificação das taxas de bioturbação, de acordo com Taylor & Goldring (1993). Seguindo Rhods & Morse (1971), Sageman *et al.* (1991), Tyson & Pearson (1991), Wignall (1994), e Boyer & Droser (2011), foi adotado o modelo tripartite de oxigenação relativa da água de fundo, que reconhece as seguintes condições: a- aeróbio (totalmente oxigenado, $\text{ml O}_2/\text{l H}_2\text{O} > 2$), b- disaeróbio (oxigênio reduzido mas diferente de zero, moderado = $\text{ml O}_2/\text{l H}_2\text{O} = 2-1$; severo = $\text{ml O}_2/\text{l H}_2\text{O} = 1-0.5$; extremo = $\text{ml O}_2/\text{l H}_2\text{O} = 0.5-0$), e c- anóxico (água de fundo completamente desprovida de oxigênio, $\text{ml O}_2/\text{l H}_2\text{O} = 0$).

Figura 6- Exemplos de amostras de rochas e concreções carbonáticas empregadas neste estudo. A- Camada centimétrica de calcário, com gretas na base (vide anexo 2), recoberta por siltito cinza escuro, extraída da seção aflorante da Formação Serra Alta, em Porangaba, SP. B- Concreções carbonáticas de diferentes tamanhos e formas. Neste caso, todas são provenientes da camada de concreções 2, Formação Serra Alta (vide anexo 2). Conchas de bivalves são comuns no núcleo destes corpos carbonáticos. C- Detalhe de uma concreção carbonática métrica (camada 1), com bivalves (*Tambaqurya camargoi*) associados. Para maiores detalhes de localização e posição estratigráfica das amostras vide anexos 1 e 2.

2.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, L.M. (2001) *Análise da expressão estratigráfica dos parâmetros de geoquímica orgânica e inorgânica nas seqüências Irati*. 260 p. Tese de Doutorado, UFRGS.
- BOYER, D.L. (2010). How dysaerobic is the dysaerobic zone? The Geological Society of Geological Society of America Annual Meeting, *Abstracts with Programs*, **42**: 192.
- BOYER, D.L. & DROSER, M.L. (2011). A combined trace and body fossil approach reveals high resolution record of oxygen fluctuations in Devonian seas. *Palaios*, **26**: 500-508.
- BRETT, C. & BAIRD, G.C. (1986) Comparative taphonomy: a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios*, **1**: 207-227.
- FELDMANN, R.M.; CHAPMAN, R.E. & HANNIBAL, J.T. (1989) *Paleotechniques*. The Paleontological Society, 4, Special Publications. 358 p.
- FÜRSICH, F.T. & OSCHMANN, W. (1986) Storm shell beds of *Nanogyra virgule* in the Upper Jurassic of France. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen*, **172**: 141–161.
- FÜRSICH, F.T. & OSCHMANN, W. (1993) Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic of Kachchh, western India. *Journal of Geological Society of London*, **150**: 169-185.
- GHILARDI, R.P. (1999). *Paleoautoecologia dos bivalves do Grupo Passa Dois (Neopermiano), no Estado de São Paulo: bivalves fósseis como indicadores da dinâmica sedimentar*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, 160 p.
- HACHIRO, J. & COIMBRA, A. (1993) Ciclos de Milankovitch nas seqüências rítmicas da Unidade Irati. In: I Simpósio de Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná. *Boletim de Resumos*, p. 72-73.
- KAUFFMAN, E.G. & SAGEMAN, B.B. (1990). Biological sensing of benthic environments in dark shales and related oxygen-restricted facies. In: GINSBURG, R.N. & BEAUDOIM, B. (eds.), *Cretaceous Resources, Events, and Rhythms*. Kluwer Press,

- Amsterdam, p. 125–138.
- KIDWELL, S.M. & HOLLAND, S.M. (1991). Field description of coarse bioclastics fabrics. *Palaios*, **6**: 426–434.
- KIDWELL, S.M. (1991). The stratigraphy of shell concentrations. In: ALLISON, P.A. & BRIGGS, D.E.G. (eds.): *Taphonomy: Releasing Data Locked in the Fossil Record. - Topics in Geobiology*, **9**: 211-290. New York (Plenum Press).
- KIDWELL, S.M.; FURSICH, F.T. & AIGNER, T. (1986) Conceptual framework for the analysis and classification of shell concentration. *Palaios*, **1**: 228-238.
- LAGES, L.C. (2004) *A Formação Irati (Grupo Passa Dois, Permiano, Bacia do Paraná) no furo de sondagem FP-01-PR (Sapopema, PR)*. 117 pp. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- MARANHÃO, M.S.A.S. (1986) *Contribuição ao conhecimento da malacofauna das camadas basais da Formação Corumbataí (Permiano), Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, 88p.
- MATOS, S.A.; PRETTO, F.A. & SIMÕES, M.G. (2013) Tafonomia dos Pygocephalomorpha (Crustacea, Peracarida, Malacostraca), Permiano, Bacia do Paraná, Brasil, e seu significado paleoambiental. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **16**: 97-114.
- MEGLHIORATTI, T. (2006) *Estratigrafia de Sequências das formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (Permiano, Bacia do Paraná) na porção nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo*. 133p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP.
- MENDES, J.C. (1952) A Formação Corumbataí na região do Rio Corumbataí. (Estratigrafia e descrição dos lamelibrânquios). *Boletim da FCLF-USP*, 145, *Geologia*, **8**: 1-119.
- MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A. & FRANÇA, A.B. (2007) Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, **15**: 265–287.

- NEVES, J. P. (2009) *Tafonomia de rochas carbonáticas conchíferas das formações Teresina e Rio do Rasto (Permiano, Bacia do Paraná)*. 89p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP
- NEVES, J.; ROHN, R. & SIMÕES, M.G. (2010) Tafonomia de Biválvios em Calcários Oolíticos da Formação Teresina (Bacia do Paraná, Permiano Médio, Prudentópolis, PR). *Revista do Instituto de Geociências - USP, Sér. cient., São Paulo*, **10**: 19-36.
- RHOADS, D.C. & MORSE, J.W. (1971). Evolutionary and ecologic significance of oxygen-deficient marine basins. *Lethaia*, **4**: 413-428.
- ROHN, R. (1994) *Evolução ambiental da Bacia do Paraná durante o Neopermiano no leste de Santa Catarina e do Paraná*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, 480p.
- ROHN, R. (2001) A estratigrafia da Formação Teresina (Permiano, Bacia do Paraná) de acordo com furos de sondagem entre Anhembi (SP) e Ortigueira (PR). *Ciência, Técnica, Petróleo, Seção Exploração de Petróleo*, **20**: 209-218.
- ROHN, R. (2007) The Passa Dois Group (Paraná Basin, Permian): investigations in progress. In: I Workshop - Problems in the Western Gondwana Geology, South America - Africa correlations: du Toit revisited (Gramado), *Extended Abstracts*, **1**: 151-157.
- RUNNEGAR, B. & NEWELL, N.D. (1971) Caspian- like relict moluscan fauna in the South America Permian. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, **146**: 1-66.
- SAGEMAN, B.B., WIGNALL, P.B., & KAUFFMAN, E.G. (1991). Biofacies models for organic-rich facies: tool for paleoenvironmental analysis. In: EINSELE, G., SEILACHER, A & RICKEN, W. (eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer Verlag, Berlin, p. 542-564.
- SANTOS, R.V.; SOUSA, P.A.; ALVARENGA, C.J.S.; DANTAS, E.L.; PIMENTEL, M.M.; OLIVEIRA, C.G. & ARAÚJO, L.M. (2006) Shrimp U Pb zircon dating and

- palynology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, **9**: 456-463.
- SIMÕES, M.G. & GHILARDI, R.P. (2000) Protocolo tafonômico/paleoautoecológico como ferramenta na análise paleossinecológica. *Pesquisas em Geociências*, **27**: 3-13.
- SIMÕES, M.G. & KOWALEWSKI, M. (1998) Shell beds as paleoecological puzzles: a case study from the Upper Permian of the Paraná Basin, Brazil. *Facies*, **38**: 175-196.
- SIMÕES, M.G.; MARQUES, A.C.; MELLO, L.H.C. & ANELLI, L.E. (1997) Phylogenetic analysis of the genera of the extinct family Megadesmidae (Pelecypoda, Anomalodesmata), with remarks on its paleoecology and taxonomy. *Journal of Comparative Biology*, **2**: 75-90.
- SIMÕES, M.G.; MELLO, L.H.; TORELLO, F.F. & GHILARDI, R.P. (2000a). *Tambaquyra* gen.n. (Bivalvia, Anomalodesmata), Formação Serra Alta (Neopermiano), Grupo Passa Dois, Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Universidade de Guarulhos, Série Geociências*, **6**: 11-19.
- SIMÕES, M.G.; ROCHA-CAMPOS, A.C. & ANELLI, L.E. (1998) Paleoecology and evolution of Permian pelecypod assemblages (Paraná Basin) from Brazil. In: JOHNSTON, P.A. & HAGGART, J.W. (Ed.) *Bivalves - An Eon of evolution: paleobiological studies honoring Norman D. Newell*. Calgary: University of Calgary Press, 443-452.
- SIMÕES, M.G.; TORELLO, F.F. & ROCHA-CAMPOS, A.C. (1996) Gênese e Classificação da Coquina de Camaquã, Formação de Corumbataí (Neopermiano), na Região de Rio Claro, SP. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **68**: 545-557.
- SIMÕES, M.G.; TORELLO, F.F.; MELLO, L.H. & GHILARDI, R.P. 2000b. O conteúdo fóssilífero de novos afloramentos do Grupo Passa Dois (Neopermiano), nas porções centro sul e nordeste do Estado de São Paulo: implicações bioestratigráficas e paleoecológicas. *Acta Geológica Leopoldensia*, **23**: 61-90.
- TYSON, R.V. & PEARSON, T.H. (1991). Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview. In: TYSON, R.V. & PEARSON, T.H. (eds.), *Modern and ancient continental*

shelf anoxia. Geological Society Special Publication, **58**: 1–24.

WESSELING, F.P. (2007) Long-lived lake molluscs as island faunas: a bivalve perspective,

In: RENEMA, W. (ed.). Biogeography, time and place: distributions, barriers and islands,

Dordrecht: Springer, p. 275-314.

WIGNALL, P.B., 1994. *Black shales*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 30,

127 p.

PARTE 3
RESULTADOS

3. RESULTADOS OBTIDOS

Apresentam-se como resultados derivados da pesquisa conduzida nos anos de 2012-2014, dois artigos científicos, aqui referidos como em preparação, apenas por aguardarem os comentários, críticas, correções e sugestões que poderão advir da fase de defesa pública deste documento. Os artigos foram elaborados tendo em mente sua publicação internacional, em consonância com o atual momento da pós-graduação, no Brasil, e a tendência de internacionalização da pesquisa nas universidades estaduais paulistas, bem como o conceito CAPES-7, do programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica do IGc/USP. Assim sendo, os artigos que constituem o resultado do estudo aqui desenvolvido deverão ser submetidos a periódicos de alto impacto na área, tais como *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology* (Elsevier, ISSN: 0031-0182, IF-3.215) e *Journal of South American Earth Sciences* (Elsevier, ISSN: 0895-9811, IF-1.567).

Ambos os artigos estão diretamente vinculados ao tema central da dissertação, ou seja, a dinâmica paleoambiental vigente durante a história deposicional da fácies de *offshore* da Formação Serra Alta e unidades coevas. Conforme discutido nestes artigos (anexos 1 e 2), os resultados obtidos têm importantes implicações para o entendimento das condições paleoecológicas em fácies similares, depositadas em sucessões sedimentares geradas em mares epicontinentais muito rasos e com extremo isolamento geográfico, como é o caso da Bacia do Paraná. Para maiores detalhes sobre as descrições dos resultados obtidos vide anexos 1 e 2.

3.1. DINÂMICA PALEOECOLÓGICA E PALEOAMBIENTAL DA FÁCIES DE OFFSHORE DA FORMAÇÃO SERRA ALTA, BACIA DO PARANÁ, NO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo do artigo “Untold Muddy Stories: The Ecological Dynamics of an Oxygen-Deficient Facies Within a Shallow, Isolated Permian Epeiric Sea (Paraná Basin, Brazil)”

Fácies sedimentares deficientes em oxigênio, registradas em vários mares epeíricos (bacias intracratônicas), são comuns nos tratos de sistemas transgressivo e de mar alto, em sucessões sedimentares paleozoicas, mesozoicas e mais jovens. Elas são materializadas por sucessões monótonas de folhelhos negros e/ou argilitos maciços ou bem laminados, pobres em fósseis. Em geral, estes sedimentos são depositados em condições ambientais estáveis, de anoxia ou baixíssimas concentrações de oxigênio, na interface água/sedimento. Durante o Paleozoico tardio, a bacia intracratônica do Paraná, Brasil, no centro do supercontinente Gondwana foi recoberta por um extenso mar epeírico ($>1.600.000 \text{ km}^2$), raso e isolado. Na sucessão permiana desta bacia, fácies representativas de condições anóxicas são comumente registradas nas formações Irati (Artinskiano) e Serra Alta (Kunguriano), que ocorrem em sucessão estratigráfica. Argilitos e siltitos cinza-escuros, maciços ou bem laminados, muito pobres em fósseis, constituem os principais litótipos preservados nesta última unidade litoestratigráfica, o que tradicionalmente desencorajou estudos paleontológicos e estratigráficos de detalhe. Entretanto, as minuciosas investigações sedimentológicas, icnológicas e tafonômicas aqui conduzidas, mostram um cenário paleoambiental muito mais dinâmico e complexo, do que o previamente pensado. Fundamentado nas feições texturais dos sedimentos (*e.g.*, presença/ausência de laminação primária, bioturbação), ocorrências autoctônes ou parautoctônes de invertebrados bentônicos providos de conchas carbonáticas (moluscos bivalves) e a presença/ausência de horizontes dominados por concreções carbonáticas e camadas ricas em nódulos fosfáticos, reporta-se aqui, pela primeira vez, drásticas variações no conteúdo de oxigênio, batimetria,

taxas de sedimentação e mudanças na colonização do substrato bentônico, dentro das fácies de *offshore* da Formação Serra Alta. Os dados obtidos indicam que estes depósitos distais, gerados abaixo do nível de base de ondas de bom tempo, foram formados por uma combinação de fatores paleoambientais complexos (*e.g.*, taxa de sedimentação, pulsos de oxigenação), relacionados a mudanças relativas do nível do mar. Três populações ou paleocomunidades distintas foram registradas, incluindo formas residentes adaptadas à: (a) condições normais de dia-a-dia, representadas por fundos pouco oxigenados (disaeróbios), colonizados por minúsculos (mm) bivalves de infauna, suspensívoros e *Planolites*, (b) táxons quimissimbiontes que provavelmente habitavam substratos quimicamente tóxicos (anóxicos/extremamente disaeróbios=exaeróbios) (*e.g.*, bivalves suspensívoros gigantes) e (c) populações eventuais que habitaram substratos aeróbios/disaeróbios, gerados durante eventos energéticos episódicos (*e.g.*, *Planolites* e *Thalassionoides*). Estes achados têm importantes conotações no entendimento das condições paleoambientais e da dinâmica paleoecológica das faunas bentônicas, durante episódios transgressivos, em mares epicontinentais rasos, isolados, onde fácies de *offshore* deficientes em oxigênio são comuns. Notavelmente, os dados obtidos encontram extremo apoio na literatura disponível para fácies similares em mares paleozoicos (devonianos) e mesozoicos (jurássicos), conforme mostram Kauffman (1984), Kauffman & Sageman (1990), Sageman *et al.* (1991), Kauffman *et al.* (2007), Boyer (2010), Boyer & Droser (2011), dentre outros.

3.2. DEPÓSITOS DE SUFOCAMENTO (OBRUTION) NA FORMAÇÃO SERRA ALTA:

GÊNESE E HISTÓRIA DIAGENÉTICA

Resumo do artigo “Fossil-bearing Carbonate Concretions of the Permian Serra Alta Formation, Paraná Basin, Brazil, and the “Paradox” of Concretionary Obrution Beds”

A Formação Serra Alta, Permiano, foi depositada principalmente sob condições transgressivas, num contexto de bacia sedimentar intracratônica. Nesta unidade, a sucessão de argilitos ou siltitos cinza-escuros foi, principalmente, depositada em condições de fundos deficientes em oxigênio. Os fósseis são, geralmente, raros, mas certos horizontes podem registrá-los extraordinariamente, especialmente no núcleo de concreções carbonáticas. As conchas (principalmente preservadas como valvas calcíticas recristalizadas) estão, maiormente, articuladas fechadas, indicando soterramento abrupto. Bioturbação fraca a moderada é também registrada tanto na base, como no topo das camadas contendo as concreções carbonáticas, sugerindo atividade biológica intraestratal, antes da diagênese precoce. Assim sendo, a deposição episódica de sedimentos siliciclásticos finos que soterrou os bivalves, muitos dos quais provavelmente em posição de vida foi seguida de prolongados períodos de taxa de sedimentação baixa ou não deposição de sedimentos. Deste modo, cada horizonte contendo concreções carbonáticas fossilíferas é, em realidade, um depósito de sufocamento (= *obruption* ou o registro episódico da deposição de sedimentos siliciclásticos finos, seguido de período de não deposição antes da cimentação carbonática dos mesmos). Neste sentido, nosso estudo de caso preenche os principais requisitos do “paradoxo das camadas rítmicas geradas episodicamente”, recentemente proposto por Brett *et al.* (2012). Segundo estes autores, estes depósitos registram a superimposição de camadas geradas por sedimentação abrupta e episódica, seguidos de prolongados períodos de não deposição. Subsequentemente, cimentação carbonática durante a diagênese precoce conduz à excelente preservação dos bioclastos. Finalmente, os horizontes sedimentares contendo as concreções carbonáticas não estão aleatoriamente distribuídos, ao longo da

sucessão sedimentar estudada da Formação Serra Alta, no Estado de São Paulo. Muito pelo contrário, estes estão registrados na fácies de *offshore*, deficiente em oxigênio, localmente situada na base da unidade, sempre em associação aos bivalves da Zona-de-Associação *Barbsoia angulata-Anhembia froesi* (vide Fig. 5). Em outras palavras, os horizontes contendo as concreções fossilíferas parecem estar associados a condições paleoambientais e temporais muito específicas. Deste modo, em função da extensão lateral destes depósitos (possivelmente dezenas a centenas de quilômetros) eles poderão, futuramente, constituir importante dado para análises de fácies e correlação estratigráfica, no contexto da unidade estudada.

3.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOYER, D.L. (2010) How dysaerobic is the dysaerobic zone? The Geological Society of Geological Society of America Annual Meeting, *Abstracts with Programs*, **42**: 192.
- BOYER, D.L. & DROSER, M.L. (2011) A combined trace and body fossil approach reveals high resolution record of oxygen fluctuations in Devonian seas. *Palaios*, **26**: 500–508.
- BRETT, C.E.; ZAMBITO IV, J.J.; SCHINDLER, E. & BECKER, R.T. (2012) Diagenetically-enhanced trilobite obrution deposits in concretionary limestones: The paradox of “rhythmic events beds”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **367–368**: 30–43.
- KAUFFMAN, E.G. & SAGEMAN, B.B. (1990). Biological sensing of benthic environments in dark shales and related oxygen-restricted facies. In: GINSBURG, R.N. & BEAUDOIM, B. (eds.), *Cretaceous Resources, Events, and Rhythms*. Kluwer Press, Amsterdam, p. 125–138.
- KAUFFMAN, E.G. (1984) Paleobiogeography and evolutionary response dynamic in the Cretaceous Western Interior Seaway of North America. In: WESTERMANN, G.E.G.

(ed.), Jurassic-Cretaceous biochronology and paleogeography of North America. *Geological Association of Canada, Special Paper*, **27**: 273–306.

KAUFFMAN, E.G.; HARRIES, P.J.; MEYER, C.; VILLAMIL, T.; ARANGO, C. & JAECKS, G. (2007) Paleoecology of giant Inoceramidae (*Platyceramus*) on a Santonian seafloor in Colorado. *Journal of Paleontology*, **81**: 64–81.

SAGEMAN, B.B.; WIGNALL, P.B. & KAUFFMAN, E.G. (1991) Biofacies models for organic-rich facies: tool for paleoenvironmental analysis. *In*: EINSELE, G., SEILACHER, A., & RICKEN, W. (eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer Verlag, Berlin, p. 542–564.

PARTE 4

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4. DISCUSSÃO INTEGRADA

Siltitos maciços ou bem laminados da Formação Serra Alta, Permiano, que afloram ao longo da borda leste da Bacia do Paraná, foram depositados em um extenso mar epicontinental, raso e isolado. Estes siltitos constituem os principais depósitos sedimentares desta unidade litoestratigráfica. Boas exposições destes ocorrem ao longo da rodovia Castello Branco, SP-280, entre os marcos quilométricos 160 a 161, sentido capital-interior. Tais exposições foram detalhadamente estudadas por Sousa (1985) e, anos mais tarde, por pesquisadores tais como Maranhão & Petri (1996) e Simões *et al.* (2000a, b). Por esta razão foram preferencialmente escolhidos para o estudo aqui realizado, que englobou ainda seções estratigráficas na região de Rio Claro, SP, em cavas para exploração de calcário (Pedreira Partecal) e afloramentos próximos ao rio Passa Cinco. Porém, em decorrência do grande número de dados inéditos obtidos junto à seção aflorante da rodovia Castello Branco foi dada preferência ao detalhamento da mesma, a qual foi minuciosamente amostrada com o objetivo de investigar a dinâmica paleoambiental e paleoecológica dos depósitos de *offshore* da Formação Serra Alta. Supostamente, estes depósitos registram condições prolongadas, mas estáveis, de deficiência em oxigênio, constituindo importante exemplo para o entendimento de paleocomunidades bentônicas que se desenvolveram em ambientes relativamente mais distais (abaixo do nível de base de ondas de bom tempo), os quais são comuns ao registro geológico de mares epicontinentais.

Amostragens detalhadas em escala centimétrica, em uma sucessão de siltitos maciços a laminados, com cerca de 11m de espessura, situados aproximadamente 9 metros acima do contato com a Formação Iratí, subjacente (vide anexo 1), permitiram identificar significativas mudanças paleoambientais, especialmente nas taxas de sedimentação, profundidade relativa da coluna d'água, conteúdo de oxigênio e colonização do substrato bentônico.

A maior parte dos depósitos estudados foi gerada em fundos com conteúdo limitado

de oxigênio, nos limites entre as zonas anóxica a extremamente disaeróbia (=exaeróbia). A tabela 1 (abaixo) sintetiza as principais características diagnósticas no reconhecimento desta zona, na unidade litoestratigráfica estudada.

INDICADORES PALEOAMBIENTAIS		
FÓSSEIS CORPÓREOS	FÁBRICA SEDIMENTAR	GEOQUÍMICA
a- Invertebrados bentônicos conchíferos (bivalves) ausentes ou raros. Se presentes são pouco diversificados, normalmente com não mais do que 5 espécies em um mesmo plano de acamamento; b- Conchas de bivalves com extrema variação de tamanho, desde minúsculas até gigantes, para os padrões locais da fácies sedimentar. c- Bivalves detritívoros ausentes; d- Bivalves suspensívoros dominantes; e- Populações monoespecíficas em certos horizontes; f- Bivalves com conchas normalmente finas e morfologia incomum (<i>Anhembia</i>) localmente gigantes (<i>Tambaquyra</i>), abundantes em certas camadas ou intervalos. Estes foram provavelmente quimiossimbiontes.	a- Argilitos ou siltitos maciços ou bem laminados; b- Raros tubos horizontais, isolados (tipo <i>Planolites</i>); c- Intercalações milimétricas de arenitos e siltitos laminados com traços-fósseis; d- Intervalos milimétricos a centimétricos, mostrando mudanças entre zonas mais basais altamente bioturbadas (BI <5), passando superiormente a lâminas com tubos horizontais (<i>Planolites</i>) individuais, discretos e isolados (IB 1-2).	a- Camadas com concreções carbonáticas, incluindo conchas de bivalves, articuladas fechadas, não compactadas ou ligeiramente comprimidas. As concreções foram geradas por diagênese precoce; b- Presença de cristais de pirita.

Tabela 1- Critérios para o reconhecimento de condições exaeróbias (quase-anóxicas) ou disaeróbias extremas, em fácies de *offshore*, na Formação Serra Alta, Bacia do Paraná, Brasil.
 Explicação: IB= índice de bioturbação.

Estes depósitos apresentam baixo índice de bioturbação (IB 0-1), podendo incluir dois tipos principais de paleocomunidades, dominadas por bivalves, ou seja: a- Comunidades de bivalves suspensívoros de infauna (e.g., *Barbosaia angulata*, *Rioclaroa lefevrei*), que residiram em ou estavam adaptados a fundos com baixos teores de oxigênio (disaeróbio). Neste caso, normalmente as conchas são minúsculas e preservadas como valvas articuladas fechadas ou articuladas abertas nos siltitos maciços, especialmente da base da seção estudada (vide anexo 1). b- Comunidades de bivalves da infauna, com conchas delgadas e grandes (= 10 vezes maiores do que a dos bivalves acima, vide anexo 1), que ocuparam substratos quimicamente tóxicos (anóxico a extremamente disaeróbio). Estes bivalves são morfologicamente muito distintos dos comumente encontrados na

malacofauna do Grupo Passa Dois, incluindo *Anhembia froesi* e *Tambaquyra camargoi*. Frequentemente, no interior das concreções carbonáticas, suas conchas originalmente aragoníticas estão articuladas fechadas e recristalizadas. *Planolites* é o fóssil-traço mais comum associado às concreções e aos intervalos contendo os bivalves.

Entre os dois horizontes contendo abundantes concreções carbonáticas (vide anexos 1 e 2) ocorrem camadas centimétricas de arenito siltico/argiloso, altamente bioturbado (IB 3-4). Arenitos finos, centimétricos, com base erosiva e topo ondulado, contendo estratificação cruzada de baixo ângulo, do tipo *swaley*, são também bioturbados. Estes corpos arenosos indicando a presença intermitente de condições de fundos ligeiramente mais grossos e oxigenados, no contexto geral marcado pela decantação de finos em áreas distais pouco oxigenadas. Estas camadas são o reflexo de eventos mais energéticos e episódicos em áreas mais proximais, carreando partículas ligeiramente mais grossas às áreas mais distais. Assim, a chegada deste material deve estar associada também a breve melhoria nas condições de oxigenação de fundo. Como resultado, as taxas de bioturbação são relativamente mais elevadas que nos depósitos acima e abaixo, mostram a colonização dos fundos por comunidades oportunistas (vide anexo 1). Em alguns casos, taxas maiores de bioturbação são verificadas na base das camadas, diminuindo para o topo, fato bem ilustrado no artigo 1. O padrão observado é similar ao descrito por Kauffman & Sageman (1990), que demonstram haver associação entre os processos sedimentares de alta energia e o estabelecimento de populações efêmeras, após perturbações de fundo, na fácies de *offshore*. Aspecto notável é o de que, nestas camadas (*e.g.*, arenito com estratificação cruzada do tipo *swaley*), não são encontrados fósseis corpóreos dos táxons residentes adaptados às condições de baixo teor de oxigênio, os quais são comuns no siltito maciço. Consequentemente, na seção estudada da Formação Serra Alta (vide anexo 1), duas condições paleoambientais amplas estão registradas. Elas são muito similares àquelas identificadas por Sageman *et al.* (1991), para condições de fundos marinhos do Recente, em

condições de deficiência em oxigênio. A primeira é caracterizada por condições onde as camadas mais superiores do substrato, bem como a maior parte da coluna d'água acima, são ambas disaeróbias a anóxicas. Na seção estudada, condições semelhantes devem ter prevalecido durante a deposição dos siltitos maciços, comuns na base e no topo da seção (vide anexos 1 e 2). Pequenos bivalves suspensívoros de infauna e *Planolites* isolados são frequentes nestes depósitos. Bivalves detritívoros, tais como os protobrânquios, estão ausentes e a diversidade faunística é extremamente baixa, mas a abundância de algumas espécies pode ser localmente elevada em certos horizontes (vide anexo 1). A ausência dos protobrânquios é um indicativo da falta de oxigênio (anoxia) ou teores baixíssimos deste no interior do substrato, já que tais bivalves não são suspensívoros.

Uma segunda condição seria verificada onde a zona anóxica está abruptamente marcada na ou próxima da interface água/sedimento, mas a coluna d'água acima é oxigenada. Na Formação Serra Alta, substratos finos, provavelmente saturados em H_2S , foram colonizados por uma fauna pouco diversa de bivalves quimiossimbiontes (vide também Ghilardi, 1999). Estes bivalves, normalmente gigantes, ocorrem comumente no interior das concreções carbonáticas, associadas aos siltitos e argilitos cinza escuros, na porção média da seção estudada (vide anexo 1). Raramente são encontrados em rochas depositadas em condições mais rasas e oxigenadas e, se presentes, tais conchas são pequenas, o que contrasta com sua condição de grande porte (gigante) nos argilitos e siltitos depositados em fundos com deficiência em oxigênio. A descoberta de sílica autigênica (sílica globular) em depósitos coevos da Formação Serra Alta, formados em áreas com águas enriquecidas em minerais e geotermicamente aquecidas (C. Riccomini informação verbal, 2013), reforça a ideia de que estes bivalves foram quimiossimbiontes e adaptados a condições extremas (vide Matos *et al.*, 2013). Além disso, condições de fundos provavelmente anóxicos e coluna d'água mais oxigenada são materializadas também pelas camadas centimétricas, com base erosiva contendo nódulos fosfáticos, pirita, além de restos

de peixes (não recobertos por fosfato), coprólitos e enteróspiras (vide anexo 1), as quais ocorrem no topo da sucessão estudada.

Em adição aos comentários acima, atenção detalhada foi dada a origem dos horizontes com concreções carbonáticas, ricas em bivalves fósseis, aqui denominadas de camadas 1 e 2 (vide anexo 2). Três feições se destacam nestas concreções. A- a dimensão destes corpos carbonáticos é variável, desde grandes (>40 cm de comprimento máximo), presentes na camada 1, até pequenas (<30 cm), as quais são comuns na camada 2 (vide Tabela 1, no anexo 2). B- a forma das concreções grandes é distinta das pequenas. C- ocorrem em horizontes distintos, como acima mencionado, ou seja, não estão aleatoriamente distribuídas ao longo de toda sucessão sedimentar estudada.

Concreções carbonáticas (micríticas) na camada 1 são, geralmente, lenticulares, em seção, enquanto as da camada 2 são mais achatadas na base (*bread-loaf shaped*, *sensu* Seilacher, 2001). Conforme discutido por este autor, bem como por Marshall & Pirrie (2013), Thomka & Lewis (2013) e Bojanowski *et al.* (in press), a geometria das concreções reflete a permeabilidade natural dos sedimentos em que ocorrem. Por exemplo, concreções carbonáticas circulares são formadas, unicamente, antes da compactação dos sedimentos. A anisotropia dos sedimentos favorece o crescimento lateral (achatado) destas estruturas (Seilacher, 2001). Em todas as concreções estudadas (n. 35) o maior eixo está paralelo ao acamamento, o que indica que tais estruturas são sindeposicionais e formadas durante a diagênese precoce (Raiswell, 1971; Seilacher, 2001; Thomka & Lewis, 2013), fato já aventado por Sousa (1985). Tais concreções são formadas em condições rasas (0-10 m) na pilha de sedimentos (Marshall & Pirrie, 2013, p. 59). Entretanto, nas concreções estudadas conchas não deformadas ou apenas levemente comprimidas ocorrem, principalmente, no interior das concreções da camada 1, enquanto as conchas achatadas estão comumente preservadas no interior das concreções da camada 2 (vide anexo 2). Portanto, estas conchas estiveram submetidas a diferentes condições de compactação, antes e durante a fase de

precipitação e cimentação das concreções. Por exemplo, conchas de bivalves (articuladas fechadas) documentadas no interior das concreções da camada 2 estão compactadas, mas os sedimentos dentro das valvas é o mesmo da matriz sedimentar. Em geral, a valva mais achatada é aquela que está voltada para a base da concreção e paralela ao acamamento. Isso indica que os sedimentos fossilíferos já estavam parcialmente compactados antes do crescimento completo das concreções. Contrariamente, as concreções da camada 1 são lenticulares, o que indica a ação combinada de crescimento da concreção com a compactação (vide Seilacher, 2001). De fato, as conchas no interior destas concreções estão apenas parcialmente compactadas ou não achatadas, indicando que a preservação precedeu, em parte, a compactação dos sedimentos fossilíferos.

Além do formato das concreções, chama a atenção também a diferença no tamanho destas estruturas, com relação às camadas 1 e 2. Conforme comentado acima, concreções grandes (>40 cm) predominam na camada 1, ou na porção basal da seção estudada. Já as concreções pequenas (<30 cm) predominam na camada 2. Esta distinção é importante, pois está relacionada às taxas de sedimentação e ao tempo de residência dos sedimentos fossilíferos, na zona de redução de sulfato. Sob condições de taxas de sedimentação contínuas as porções do substrato representativas das zonas geoquímicas favoráveis à precipitação do carbonato de cálcio (*i.e.*, zona de redução dos sulfatos e metanogênese) irão migrar acima, na pilha de sedimentos durante o soterramento (Marshall & Pirrie, 2013; Thomka & Lewis, 2013). Desse modo, sob tais condições de continuo acúmulo de sedimentos o carbonato de cálcio irá se dissolver novamente, devido à mudança nas condições geoquímicas no interior do substrato (Marshall & Pirrie, 2013). Além disso, a formação de concreções grandes, algumas métricas, como as aqui estudadas, demanda considerável tempo (centenas a milhares de anos) de residência dos sedimentos fossilíferos na zona de redução dos sulfatos (Thomka & Lewis, 2013). Em razão dessas circunstâncias, muitos autores sugerem que horizontes ricos em concreções carbonáticas são formados “*in*

response to bioturbates in deposition and that concretions are only successfully preserved where there is sufficient time to enable ions to diffuse through the sediment and to grow stable carbonate bodies” (Marshall & Pirrie, 2013). Assim sendo, se isso for verdadeiro, horizontes ricos em concreções devem ser seguidos de camadas indicativas de parada na sedimentação, alguns metros acima, na sucessão sedimentar (vide, por exemplo, Marshall & Pirrie, 2013). No exemplo aqui estudado, esta camada poderia ser representada pelo calcário, com gretas, que está situado imediatamente abaixo do segundo nível de concreções (vide anexos 1 e 2, Fig. 6). Esta camada, por sua importância, necessita ainda de melhor análise e contextualização, mas materializa condições deposicionais muito distintas, no contexto de uma sucessão tipicamente siliciclástica, gerada em condições distais. Portanto, ela registra uma importante queda no nível de base (regressão forçada?) e mudança no regime sedimentar (siliciclástico para carbonático), mesmo que breve no tempo.

Adicionalmente, a inspeção visual da superfície externa das concreções indica que elas não foram colonizadas por organismos incrustantes ou bioerosivos. Assim, no caso das concreções de grande porte, mesmo que formadas a poucos metros abaixo da interface água/sedimento e permanecido nestas condições por considerável lapso de tempo, elas não foram exumadas, erodidas ou expostas à superfície do fundo oceânico.

Se o modelo acima estiver correto, as concreções da camada 2 foram formadas sob condições de taxas de sedimentação mais elevadas, do que as da camada 1. Taxas de sedimentação elevada implicam na mudança das zonas geoquímicas favoráveis ao desenvolvimento das concreções e menor dimensão das concreções. Obviamente, a disponibilidade de águas supersaturadas em carbonato de cálcio e a presença de partículas para serem nucleadas devem ser também consideradas, neste contexto.

Finalmente, a maioria das conchas (deformadas ou não) no interior das concreções foram originalmente aragoníticas (Runnegar & Newell, 1971; Simões *et al.*, 1997), mas estão principalmente recristalizadas. De outro lado, as mesmas conchas nos siltitos intercalados

aos horizontes com concreções estão preservadas na forma de moldes (internos ou externos). Ou seja, suas conchas aragoníticas foram completamente dissolvidas e os moldes compactados durante a diagênese. A presença de conchas preservadas não achatadas (3D) no interior das concreções, especialmente da camada 1 (vide anexo 2) oferecem uma visão de quão modificada por compressão está a morfologia de algumas espécies. Estas questões devem ser levadas em conta agora, no estudo anatômico desses bivalves, o que foge ao escopo do presente estudo, mas fica aqui o alerta aos taxonomistas.

4.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOJANOWSKI, M.J.; BARCZUK, A. & WETZEL, A. (in press) Deep-burial alteration of early-diagenetic carbonate concretions formed in Palaeozoic deep-marine graywackes and mudstones (Bardo Unit, Sudetes Mountains, Poland). *Sedimentology*, 2013.
- GHILARDI, R.P. (1999) *Paleoautoecologia dos bivalves do Grupo Passa Dois (Neopermiano), no estado de São Paulo: bivalves fósseis como indicadores da dinâmica sedimentar*. 162p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- KAUFFMAN, E.G. & SAGEMAN, B.B. (1990) Biological sensing of benthic environments in dark shales and related oxygen-restricted facies. In: GINSBURG, R.N. & BEAUDOIM, B. (eds.), *Cretaceous Resources, Events, and Rhythms*. Kluwer Press, Amsterdam, p. 125–138.
- MARANHÃO, M.S.A.S. & PETRI, S. (1996) Novas ocorrências de fósseis nas formações Corumbataí e Estrada Nova do Estado de São Paulo e considerações preliminares sobre seus significados paleontológico e bioestratigráfico. *Revista do Instituto Geológico*, 12: 33-54.
- MARSHALL, J.D. & PIRRIE, D. (2013) Carbonate concretions—explained. *Geology Today*, 29: 53–62.

- MATOS, S.A.; BONDIOLI, J.G.; DAVID, J.M.; ANELLI, L.E.; WARREN, L.V.; RICCOMINI, C. & SIMÕES, M.G. (2013). Paleoecology of 'giant' Plesiocyprinellini (*Tambaquyra*) bivalves on Permian epeiric seafloors in the Paraná Basin, Brazil. In: XXIII Congresso Brasileiro de Paleontologia. *Paleontologia em Destaque - Boletim de Resumos*, **1**: 194-195.
- RAISWELL, R. (1971) The growth of Cambrian and Liassic concretions. *Sedimentology*, **17**: 147–171.
- RUNNEGAR, B. & NEWELL, N.D. (1971) Caspian- like relict moluscan fauna in the South America Permian. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, **146**: 1–66.
- SAGEMAN, B.B., WIGNALL, P.B., & KAUFFMAN, E.G., (1991). Biofacies models for organic-rich facies: tool for paleoenvironmental analysis. In: EINSELE, G., SEILACHER, A & RICKEN, W. (eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer Verlag, Berlin, p. 542–564.
- SEILACHER, A. (2001) Concretion morphologies reflecting diagenetic and epigenetic pathways. *Sedimentary Geology*, **143**: 41–57.
- SIMÕES, M.G.; MARQUES, A.C.; MELLO, L.H.C. & ANELLI, L.E. (1997) Phylogenetic analysis of the genera of the extinct Family Megadesmidae (Pelecypoda, Anomalodesmata), with remarks on its paleoecology and taxonomy. *Journal of Comparative Biology*, **2**: 75–90.
- SIMÕES, M.G.; MELLO, L.H.; TORELLO, F.F. & GHILARDI, R.P. (2000a). *Tambaquyra* gen.n. (Bivalvia, Anomalodesmata), Formação Serra Alta (Neopermiano), Grupo Passa Dois, Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Universidade de Guarulhos, Série Geociências*, **6**: 11–19.
- SIMÕES, M.G.; TORELLO, F.F.; MELLO, L.H.C. & GHILARDI, R.P. (2000b) O conteúdo fóssilífero de novos afloramentos do Grupo Passa Dois (Neopermiano), nas porções centro sul e nordeste do Estado de São Paulo: implicações

bioestratigráficas e paleoecológicas. *Acta Geologica Leopoldensia*, **23**: 61-90.

PARTE 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESAFIOS PARA O FUTURO

5. SUMÁRIO & CONCLUSÕES

5.1. HISTÓRIA DEPOSICIONAL, PALEOECOLOGIA E PALEOAMBIENTES (ANEXO 1)

A revisão da literatura mostra que a sucessão sedimentar da Formação Serra Alta foi, normalmente, interpretada como monótona e refletindo condições anóxicas à disaeróbias (Mendes, 1954; Sanford & Lange, 1960; Schneider *et al.*, 1974; Sousa, 1985; Milani *et al.*, 2007; Meglhioratti, 2006; Holz *et al.*, 2010). Entretanto, como apontado pelos dados apresentados nos anexos 1 e 2, e parcialmente discutidos acima, a integração das informações sedimentológicas, paleontológicas (fósseis traço e corpóreo) e diagenéticas evidencia uma história deposicional muito mais complexa e dinâmica. Por exemplo, períodos sucessivos de extensa anoxia em substratos abaixo do nível de base de ondas de tempestades, repetida erosão e escavação de fundo por fortes correntes ou fluxos induzidos climaticamente (tempestade) geraram camadas condensadas ricas em fosfato. Em outras palavras, a clássica interpretação de que estas fácies pelíticas, predominantemente siliciclásticas, constituem o registro de condições distais de prolongada anoxia e calmaria não é inteiramente verdadeira (vide também Kauffman & Sageman, 1990; Sageman *et al.*, 1991; Boyer & Droser, 2011, para exemplos semelhantes). Portanto, a partir de agora a história deposicional da Formação Serra Alta, que registra o último evento transgressivo na Bacia do Paraná (Milani *et al.*, 2007; Holz *et al.*, 2010), deverá ser vista a partir desta dinâmica perspectiva.

Neste contexto, as principais conclusões obtidas são:

a- Os depósitos estudados são, maiormente, representativos de condições quasi-anóxicas (exaeróbias), os quais foram ocupados por, pelo menos, dois grupos distintos de organismos (adaptados a condições de baixas taxas de oxigenação e substratos tóxicos);

b- Evidências sedimentológicas, paleontológicas e diagenéticas podem ser utilizadas em associação para o reconhecimento de tais condições exaeróbias;

b- Espécies de bivalves, tais como *Rioclaroa lefevrei*, *Tambaquyra camargoi*, *Anhembia froesi*

e *Maackia contorta*, indicam associação dos estratos estudados com o intervalo estratigráfico da Biozona de Associação *Barbosaia angulata-Anhembia froesi*, situada na porção basal da Formação Serra Alta;

c- A sucessão sedimentar examina aponta para condições distais de *offshore* (siltitos maciços a laminados), pouco oxigenadas e de transição entre *offshore* e *shoreface* inferior (camadas centimétricas de arenitos com estratificação cruzada do tipo *swaley* ou HCS). Estas camadas estão associadas a condições mais energéticas e de águas um pouco mais oxigenadas. Populações oportunistas de invertebrados, representadas por fósseis-traço, do tipo *Planolites* estão associadas a essas camadas;

d- Ao longo da sucessão estudada concreções carbonáticas e fosfáticas ocorrem em certos horizontes particulares. A história genética destas camadas é complexa, as quais podem constituir importantes marcadoras de mudanças ambientais e para correlação dos estratos equivalentes à Biozona de Associação *Barbosaia angulata-Anhembia froesi*. As concreções carbonáticas são ricas em fósseis de bivalves e foram formadas durante eventos de alta energia, seguidos de parada na sedimentação (vide a seguir).

5.2. DEPÓSITOS DE SUFOCAMENTO (OBRUTION DEPOSITS): ORIGEM E DIAGÊNESE

PRECOCE (ANEXO 2)

Alguns autores, tais como Brett *et al.* (2012a, b), propuseram com base no registro sedimentar devoniano, que camadas ricas em concreções carbonáticas, com fósseis extraordinariamente bem preservados no seu interior, resultam de duas condições críticas. A primeira delas, diz respeito ao soterramento abrupto (instantâneo) de invertebrados bentônicos (depósito de sufocamento = tempestito distal), seguido de parada na sedimentação, com a camada rica em restos orgânicos posicionada junto à zona de redução do sulfato. Neste contexto, águas intersticiais supersaturadas em carbonato de cálcio, advindo de várias fontes (inclusive da dissolução de conchas aragoníticas) poderiam

reprecipitar, permitindo a nucleação, crescimento e cimentação de concreções carbonáticas. Portanto, o paradoxo resultaria de duas condições de deposição, aparentemente, antagônicas. Tendo isso em mente, no caso do intervalo da Formação Serra Alta onde as concreções carbonáticas são abundantes foi observado que:

a- As concreções não ocorrem aleatoriamente na sucessão sedimentar e sua origem está vinculada a processos sedimentares e diagenéticos muito particulares. Todas as concreções estudadas foram formadas durante a diagênese precoce;

b- Variação na forma e no tamanho das concreções reflete principalmente diferenças na história diagenética;

c- Existe, entretanto, semelhanças na fase pré-soterramento dos horizontes ricos em concreções. Estes foram caracterizados por condições de exaeróbias, de substrato siliciclástico fino e incoerente, o qual foi ocupado por uma relativamente diversa fauna de bivalves escavadores, suspensívoros;

d- Evidências de soterramento abrupto são abundantes e representadas por bivalves preservados em posição de vida ou apenas parcialmente remobilizados no substrato. Conchas articuladas fechadas são abundantes no interior das concreções, especialmente da aqui designada camada 2 (vide anexos);

e- Camada indicativa (calcário com gretas) de parada na sedimentação é verificada entre os dois horizontes de concreções na sucessão estudada. Em resumo, as feições acima indicam que, *grosso modo*, os mesmos mecanismos apontados por Brett *et al.* (2012a, b) podem ser reconhecidos nas concreções estudadas, confirmando o paradoxo apontado por eles;

f- Porém, as concreções nos dois horizontes não possuem história geológica inteiramente idêntica. Condições mais favoráveis ao crescimento das concreções (disponibilidade de carbonato de cálcio e mais taxa de sedimentação), possivelmente relacionadas ao tempo de permanência na zona de redução dos sulfatos existiram durante a

evolução da camada 1;

g- Bivalves preservados sem ou com pouco achatamento, especialmente no interior das concreções da camada 1 (vide anexos) fornecem uma dramática visão de como as mesmas conchas que ocorrem intercaladas nos siltitos, na forma de moldes apenas, estão severamente deformadas ou compactadas. Esta questão pode ser paleontologicamente relevante aos taxonomistas e fica aqui a nossa observação, para que futuramente sejam evitadas descrições de feições “anatômicas” resultantes de processos tafonômicos e/ou diagenéticos.

5.3. DESAFIOS PARA O FUTURO

A pesquisa aqui conduzida reforça enormemente as ideias expostas em Marshall & Pierri (2013) e Thomka e Lewis (2013), ou seja, que o estudo de concreções carbonáticas não necessita de ferramental metodológico sofisticado, para que sejam extraídos dados relevantes ao entendimento de sua gênese e significado estratigráfico. Por outro lado, estes mesmo autores, bem como outros (*e.g.*, Jacobs *et al.*, 2005), apontam que a combinação de análises petrográficas e geoquímicas (*e.g.*, carbono orgânico total, COT, isótopos de oxigênio e carbono), dentre outras, permite importante detalhamento da história genética das concreções e dos depósitos e fósseis que ocorrem em associação. Este tipo de abordagem é o próximo passo natural, na continuidade dos estudos das concreções carbonáticas da sucessão permiana da Bacia do Paraná, as quais, como aqui demonstrado, contêm enorme quantidade de informações relevantes, nos mais diversos contextos (paleontológico, sedimentológico, estratigráfico e diagenético).

5.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOYER, D.L. & DROSER, M.L. (2011) A combined trace and body fossil approach reveals high resolution record of oxygen fluctuations in Devonian seas. *Palaios*, **26**: 500–508.
- BRETT, C.E.; ZAMBITO IV, J.J.; SCHINDLER, E. & BECKER, T. (2012a) Diagenetically-enhanced trilobite obrution deposits in concretionary limestones: The paradox of “rhythmic events beds”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **367–368**: 30–43.
- BRETT, C.E.; ZAMBITO IV, J.J.; HUNDRA, B.R. & SCHINDLER, E. (2012b) Mid-Paleozoic trilobite Lagerstätten: models of diagenetically enhanced obrution deposits. *Palaios*, **27**: 326–345.
- HOLZ, M.; FRANÇA, A.B.; SOUZA, P.A.; IANNUZZI, R. & ROHN, R. (2010) A stratigraphic chart of the late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**: 381–399.
- JACOBS, P.; OLIVIER, I & SWENNEN, R. (2005) ‘Big Mac’ calcarenite concretions (Lower Oligocene, NW-Belgium): conceptual growth model derived from stratigraphy, petrography and geochemistry. *Geologica Belgica*, **8**: 15-32.
- KAUFFMAN, E.G. & SAGEMAN, B.B. (1990) Biological sensing of benthic environments in dark shales and related oxygen-restricted facies. In: Ginsburg, R.N. and Beaudoin, B. (eds.), *Cretaceous Resources, Events, and Rhythms*. Kluwer Press, Amsterdam, p. 125–138.
- MARSHALL, J.D. & PIRRIE, D. (2013) Carbonate concretions—explained. *Geology Today*, **29**: 53–62.
- MEGLHIORATTI, T. (2006) *Estratigrafia de Sequências das formações Serra Alta, Teresina e Rio*

- do Rasto (Permiano, Bacia do Paraná) na porção nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo*. 133p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, SP.
- MENDES, J.C. (1954) Contribuição à estratigrafia da Série Passa Dois no Estado do Paraná. *Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo*, 175, *Geologia*, **10**: 1-119.
- MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A. & FRANÇA, A.B. (2007) Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, **15**: 265–287.
- SANFORD, R.M. & LANGE, F.W. (1960) Basin study approach to oil evaluation of Paraná Miogeosyncline south Brasil. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, **44**: 1316-1374.
- SAGEMAN, B.B., WIGNALL, P.B. & KAUFFMAN, E.G. (1991) Biofacies models for organic-rich facies: tool for paleoenvironmental analysis. In: Einsele, G., Seilacher, A., Ricken, W. (eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer Verlag, Berlin, p. 542-564.
- SOUSA, S.H.M. (1985) *Fácies sedimentares das Formações Estrada Nova e Corumbataí no Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 142 p.
- THOMKA, J.R. & LEWIS, R.D. (2013) Siderite concretions in the Copan crinoid Lagerstätten (Upper Pennsylvanian, Oklahoma): implications for interpreting taphonomic and depositional processes in mudstone successions. *Palaios*, **28**: 697–709.

ANEXO 1

ARTIGO 1

UNTOLD MUDDY STORIES: THE ECOLOGICAL DYNAMICS OF AN
OXYGEN-DEFICIENT FACIES WITHIN A SHALLOW, ISOLATED PERMIAN
EPEIRIC SEA (PARANÁ BASIN, BRAZIL)

Em Preparação

BONDIOLI, J.G.¹; SILVA, S.M.¹; WARREN, L.V.²; ASSINE, M.L.²;
RICCOMINI, C.³; SIMÕES, M.G.⁴

1- Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de
Geociências, Universidade de São Paulo/São Paulo;

2- Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista/Rio
Claro;

3- Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências,
Universidade de São Paulo/São Paulo;

4- Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista/Botucatu;

joaobondioli@usp.br, sumatos.s@gmail.com, lvwarren@yahoo.com,
assine@rc.unesp.br, riccomin@usp.br, profmgsimoes@gmail.com

ABSTRACT. Oxygen-deficient facies dominate the sedimentary record of various epeiric seas (intracratonic basins) and are common in the transgressive and highstand systems tract of several Paleozoic, Mesozoic and younger age successions. They are materialized by monotonous, fossil-poor (barren) successions of black shales and/or massive or well-laminated mudstones thought to be generated under stable conditions of oxygen depletion. During the late Paleozoic, the intracratonic Paraná Basin, Brazil, in the central Gondwanaland, was covered by a huge ($>1.600.000\text{ km}^2$), shallow and isolated epeiric sea. Within the Permian succession oxygen-deficient facies are commonly recorded in the *Mesosaurus*-bearing Irati Formation (Artinskian) and the overlain Serra Alta Formation (Kungurian). Barren, dark-grey mudstones (massive or well-laminated) are the main facies preserved in this last unit, which has usually discouraged extensive and detailed stratigraphical and paleontological investigations. However, a detailed sedimentological (sub-cm scale), ichnological, and taphonomical survey in those deposits indicate a much dynamic and complex paleoenvironmental scenario than previously thought. Based on textural features (presence/absence of primary lamination, bioturbation), autochthonous to parautochthonous occurrences of shelly benthic invertebrates (bivalves) and the presence/absence of concretion-dominated horizons and phosphate-rich layers, we report variations in the oxygen content, bathymetry, sedimentation rates, and changes in benthic substrate colonization. Our data indicate that the deposition of this “barren” mudstone-dominated succession was governed by a complex interplay of paleoenvironmental factors (sedimentation rate, and oxygen pulses) tied to relative sea level changes. Three distinct populations or paleocommunities were recorded, including resident adapted to: (a) background normal low-oxygen (dysaerobic) conditions (minute infaunal suspension-feeding bivalves and *Planolites*), (b) co-existing chemosymbiotic taxa inhabiting chemically toxic (anoxic/extreme dysaerobic=exaerobic) substrates (*e.g.*, gigantic bivalves), and (c) event populations inhabiting (aerobic/dysaerobic) substrates following short-term bottom disruptions (*e.g.*, *Planolites* and *Thalassionoides*). These findings have significant connotations for our understandings of the paleoenvironmental conditions and paleoecologic dynamics of the shelly benthic faunas during the transgressive events in extremely isolated and shallow epeiric seas where oxygen-deficient facies are abundant.

De acordo com a Resolução CoPGr 5401, de 17 de abril de 2007, apenas uma versão parcial desta dissertação é apresentada. O artigo acima não está disponível para visualização completa.

Figure 1- A, Location map of the study area (A); B, Google Earth image showing the studied outcrops along the highway cuts of the SP-280 road (Castello Branco); C, General view of both outcrops, showing the massive dark grey mudstones of the Serra Alta Formation.

Figure 2- Section of the basal portion of the Serra Alta Formation, km 160.7, Castello Branco highway, State of São Paulo.

Figure 3- Dark grey siltstones of the basal portion of the Serra Alta Formation. Note the massive fabric in A and B, and laminations in C. Legend as in figure 2.

Figure 4- Detail of the two main horizons (black and white arrows) where carbonate concretions are common. A, Large concretions (>40 cm) are found in the lowermost horizon; B, Detail of a metric carbonate concretions showing a large bivalve shell (*Tambaquyra camargoi*); C, Bivalve shells associated to the uppermost (white arrow) carbonate concretion-bearing horizon. Legend as in figure 2.

Figure 5- Thin intercalation of fine grained sandstones (black arrows) in the massive siltstones. A, Decimeter thick sandstone with swaley cross-stratification; B, Note the sharp basal contact and the bioturbation at the top of the layer. Legend as in figure 2.

Figure 6- Thin layer of bioturbated silty/muddy sandstone (black arrow). B and C, Large burrows at the base of the layer. Legend as in figure 2.

Figure 7- A ~20 cm thick, laterally continuous layer of limestone (black arrow). B, *Thalassinoides*-like traces at the very base of this bed; C, Associated *Planolites*-like traces. Legend as in figure 2.

Figure 8- A phosphate-rich layer intercalated with dark grey colored siltstones at the top of the study section; A, Plan-view of this layer showing phosphate nodules of various (sand to pebble) sizes; B- Note the sharp and erosive base; C, Phosphate nodules of distinct sizes and unphosphatized bone remains (black arrow) indicating various episodes of phosphatogenesis. Legend as in figure 2.

Figure 9- Bivalve shells recorded along the study section; A, Small, splayed open shells of *Rioclaroa lefevrei* found in massive siltstones of the basal portion of the section (see fig. 2); B, Lateral view of a large, closed articulated shell (*Tambaquyra camargoi*) found in the nuclei of a carbonate concretion of the lowermost concretion-bearing horizon (see fig. 2). High right, an image of *R. lefevrei* in the same scale of *T. camargoi*. See discussion in the text.

ANEXO 2

ARTIGO 2

FOSSIL-BEARING CARBONATIC CONCRETIONS OF THE PERMIAN SERRA
ALTA FORMATION, PARANÁ BASIN, BRAZIL, AND THE “PARADOX” OF
CONCRETIONARY OBRUTION BEDS

Em Preparação

BONDIOLI, J.¹; SILVA, S.M.¹; WARREN, L.V.²; ASSINE, M.L.²; RICCOMINI,
C.³; SIMÕES, M.G.⁴

1- Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de
Geociências, Universidade de São Paulo/São Paulo;

2- Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista/Rio
Claro;

3- Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências,
Universidade de São Paulo/São Paulo;

4- Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista/Botucatu;

joaobondioli@usp.br, sumatos.s@gmail.com, lvwarren@yahoo.com,
assine@rc.unesp.br, riccomin@usp.br, profmgsimoes@gmail.com

ABSTRACT. The Permian Serra Alta Formation was mainly generated under transgressive conditions within a huge intracratonic basin. A monotonous succession of massive greenish-gray colored mudstones, mainly deposited under oxygen-deficient conditions (below storm wave base) is the main lithofacies of this unit. Fossils are generally rare in those barren offshore deposits, but certain layers may record extraordinarily well preserved bivalve shells in the nuclei of carbonate concretions. The valves (mainly preserved as recrystallized calcite shells) are mostly closed articulated indicating abrupt burial and *in situ* preservation of the shelly fauna. Moderate bioturbation is also recorded in association with the base and top of the concretions, suggesting strong intrastratal biological activity prior the early diagenesis. Thus, the episodic deposition of the offshore muds, which smothered the bivalve shells, was followed by periods of prolonged low sedimentation rates, when infaunal colonization of seafloor took place. Hence, each concretion-bearing bed is actually an individual obrution deposit (*i.e.*, a record of episodic deposition of fine-grained sediments followed by a period of non-deposition or starvation prior the sediment cementation). In this way, our case study full fills the main prerequisites of the recently proposed “paradox of rhythmic event beds” (*i.e.*, the superimposition of deposits generated by abrupt, episodic sedimentation followed by prolonged periods of sediment starvation and subsequent early diagenetic carbonatic cementation, which enhances fossil preservation). Finally, the concretion-bearing beds are not randomly distributed in the studied succession of the Serra Alta Formation. Rather, they are recorded only in the sparsely fossiliferous offshore deposits of the basal to intermediate portions of the unit, always associated to characteristic bivalve species of the *Barbsoia angulata-Anhembia froesi* Association Biozone. In other words, the concretionary beds are preserved in particular intervals along the unit tied to oxygen-deficient offshore conditions. Locally, the concretion-bearing beds can be laterally tracked by tens of kilometers constituting a useful tool in facies analysis and stratigraphic correlation.

De acordo com a Resolução CoPGr 5401, de 17 de abril de 2007, apenas uma versão parcial desta dissertação é apresentada. O artigo acima não está disponível para visualização completa.

Figure 1- A, Location map of the study area, Porangaba region, State of São Paulo; B, Geological map showing the Late Paleozoic and Mesozoic units in the studied outcrop belt.

Figure 2- Geological section summarizing the stratigraphic information of the Serra Alta Formation from two outcrops (road cuts) along the kilometers 160.7 to 161.7, SP-280 highway, Porangaba County. Note the beds (1 and 2) where carbonate concretions are common. Rare, isolate concretions also recorded at the base of the section and above the concretion-bearing bed 2. B- Carbonate concretions size measurements (maximum length parallel to bedding). Note the difference in sizes among concretions in bed 1 and 2, respectively.

Figure 3- Well preserved bivalve shells recorded in carbonate concretion nuclei, Permian Serra Alta Formation. The carbonatic shells in specimens A to D were mechanically removed in the laboratory to show the internal morphological features (muscle scars). A- *Tambaquyra camargoi*, lateral view. B- Same specimen showing a well preserved anterior, adductor muscle scar. C- *Anhembia froesi*, lateral view. Same specimen showing a well preserved anterior adductor muscle scar. E- A flat (compacted) shell of *Tambaquyra camargoi* found in coeval non-concretionary mudstones. F- *Maackia contorta* recorded in carbonate concretion nuclei, Serra Alta Formation, Imbituva, State of Paraná (see Mendes, 1954). This species is abundant in the studied deposits.

Figure 4- A panoramic view (road cut) of the Serra Alta Formation cropping out at the kilometer 160.7, SP-280 highway, Porangaba County, State of São Paulo. A- Large carbonate concretions are abundant in siltstones at the base of the outcrop. B- Note the concretion-bearing bed 1 and associated large carbonate concretions.

Figure 5- Large carbonate concretions, bed 1, and associated bivalve shells. A- *Tambaquyra camargoi* showing a well preserved external ornamentation, anterior portion of the shell. B- A large specimen of *Tambaquyra camargoi* and their host concretion. C- Small closed articulated, vertically oriented bivalve shell. Note that the umbones are pointing downwards. This specimen is probably *in situ*. D- Large, lens-shaped, “early diagenetic” concretion, bed 1. E- Note the enhanced compaction of the surrounding siltstones, which are ‘wrapping around’ the concretion.

Figure 6- Small carbonate concretions, bed 2. A- Vertically oriented, closed articulated shell. The umbones are probably pointing upwards. B-C Horizontally oriented (parallel to bedding), closed articulated shells. D- A small concretion, bed 2, immediately above a cracked limestone bed. E- Detail of a small concretion within the siltstones, bed 2.

Scale bar= 1cm.

Figure 7- Schematic diagram showing the main processes of formation of diagenetically enhanced bivalve-rich beds (concretion beds 1 and 2), Permian Serra Alta Formation, Brazil. A1-B1, Pre-burial (biostratinomic) phase showing massive mudstones with associated bivalve faunas and *Planolites*-like traces. A2-B2, Rapid (abrupt) burial of bivalves and other shells in a mud slurry (oburbation bed formed). Some bivalves are preserved *in situ*. Note in B2 a bivalve shell in inverted position (pointing upwards = escape attempt). A3- Post-burial conditions during extended interval of low sedimentation rate. Now early diagenetic conditions are characterized by incipient cementation within the sediments, and dissolved calcium carbonate from various sources is redistributed (see Brett *et al.*, 2012a, b). Conditions of elevated pH favor calcium carbonate precipitation forming concretionary bodies. A4- A lens-shaped concretion is generated in association with compaction. Due to the low sedimentation rates the newly formed carbonate concretions will stay in the zone of sulfate reduction (SRZ) for prolonged time, favoring their growth. B3- Post-burial conditions during the formation of small concretions. Conditions of higher sedimentation rates and less saturated waters in calcium carbonate delayed their precipitation and cementing. Compaction started to compress the shells prior sediment cementing. B4- After concretion formation deposition of new sediment layers with change the position of SRZ. B5- A small, bread-loaf shaped concretion with compressed bivalve shells is formed.

Figure 8- A centimeter thick, cracked limestone bed intercalated between concretion-bearing beds 1 and 2 (see also figure 2). A- The limestone bed (white arrow) intercalated in siltstones nearly 50 cm above the concretion-bearing bed 1. B- Slabbed limestone bed showing abundant cracks at the base. C- Plan-view of the base of the same limestone.

Figure 9- A general view (road cut) of the massive mudstones of the Serra Alta Formation, 3.3 km of the main entrance of the city of Imbituva, State of Paraná. This occurrence is located ~400 km toward south of our study area. Carbonate concretions are recorded in four distinct horizons. The large ones are at the basal portion of the section. Bivalve shells (*Maackia contorta*, see Fig. 3) were found in this exposition by Mendes (1954). This species is abundant in coeval siltstones of the Serra Alta Formation in our study area (see the text for discussion). Thus, fossil-rich concretions of the Serra Alta Formation may be useful in stratigraphic correlation.

Concretion Number	Bed	Maximum Length (cm)	Maximum Height (cm)
1	1	17,5	9
2	1	35	14
3	1	36	10
4	1	41	10
5	1	45	12
6	1	45	13
7	1	48	15
8	1	52	12
9	1	53	11
10	1	67	15,2
11	1	70	19
12	1	70	15
13	1	70	16
14	1	72	16
15	1	88	19,5
16	1	91	19
17	1	104	17
18	1	110	19
19	2	4	1,8
20	2	6	5,2
21	2	8	4,8
22	2	11	6,5
23	2	12,5	6,2
24	2	12,5	7
25	2	14,8	8
26	2	15	6,5
27	2	15	8,2
28	2	15,5	6
29	2	15,8	8
30	2	16,2	8,5
31	2	22,5	8,8

Table 1- Main sizes of the measured carbonate concretions of the Serra Alta Formation.