



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Geologia



Instituto de Geociências

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOLOGIA

RAONI DIAS MORASCHE

**ANÁLISE DE FÁCIAS E RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTAL DO LIMITE  
ENTRE AS FORMAÇÕES CABEÇAS E LONGÁ DA BACIA DO PARNAÍBA  
REGIÃO DE JUAZEIRO DO PIAUÍ**

GEOCIÊNCIAS  
U F P A

BELÉM – PARÁ  
2015

RAONI DIAS MORASCHE

**ANÁLISE DE FÁCIES E RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTAL DO LIMITE  
ENTRE AS FORMAÇÕES CABEÇAS E LONGÁ DA BACIA DO PARNAÍBA  
REGIÃO DE JUAZEIRO DO PIAUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Cesar de Mendonça Barbosa (UFAM)

BELÉM – PARÁ  
2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

RAONI DIAS MORASCHE

**ANÁLISE DE FÁCIES E RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTAL DO LIMITE  
ENTRE AS FORMAÇÕES CABEÇAS E LONGÁ DA BACIA DO PARNAÍBA  
REGIÃO DE JUAZEIRO DO PIAUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências  
da Universidade Federal do Pará - UFPA, em  
cumprimento às exigências para obtenção do grau  
de Bacharel em Geologia.

Data da Aprovação: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. Afonso César Rodrigues Nogueira  
Doutor em Geociências (Geologia Sedimentar)  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. José Fernando Pina Assis - Membro  
Mestre em Geologia  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Fábio Henrique Garcia Domingos- Membro  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

Dedico este trabalho a minha  
querida e amada mãe Helena Maria Melo  
Dias. ....

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desse Trabalho de conclusão de curso (TCC) representa a finalização de uma importante etapa de minha vida, que não seria possível sem a participação de varias pessoas que me acompanharam, me deram força e me ensinaram muito durante essa jornada, tornando esses anos de graduação uma experiência singular. Desta forma é necessário agradecer as pessoas que participaram direta ou indiretamente dessa conquista.

Primeiramente Helena Maria Melo Dias, minha mãe, que sempre cuidou de mim superando todas as adversidades sem medir esforços. Muito Obrigado Mãe por todo o seu amor, carinho, cuidado, paciência e companhia.

A Marcos Antônio Salgado Morasche, meu pai, que apesar da distância sempre foi um oráculo dividido comigo todo a sua sabedoria. E demonstrando a importância de ser um marginal.

Aos demais familiares em especial para meu Tio, João Virgílio Melo Dias, e meu sobrinho Pedro Henrique Dias de Macedo Reis.

Aos meus mestres da graduação, todos os Professores (as) com quem tive o prazer de aprender geologia durante a jornada da Graduação. Em particular ao Prof. Dr. Afonso Nogueira, meu orientador pela paciência e ao Prof, Dr. Roberto Cesar Barbosa por seu apoio, incentivo e discussões durante a realização do trabalho.

Aos Amigos que estiveram comigo durante essa jornada, a turma de 2009 com a qual tive o prazer de iniciar a graduação, aos amigos da turma de 2010 com quem compartilhei a experiência do Campo 2. E em especial a Alex Nina, Allana Queiroz, Andrew Melo, Jefferson Souza, Rodrigo Lima, Indy Favacho, Carla Santos e aos demais amigos que conquistei durante essa caminhada geológica.

*Fêmea sonhadora seus devaneios  
me fazem ver através das portas e  
até atravessa espelhos. To no  
caminho do Blunt of Judah.(Blunt of  
Judah – Nação Zumbi.)*

## RESUMO

O intervalo Neodevoniano-Eocarbonífero na Bacia do Parnaíba, representado pelas formações Cabeças e Longá, registra importantes mudanças nas condições paleoambientais da bacia devido a migração do Paleocontinente Gondwana de regiões polares para subtropicais. Neste sentido, exposições das formações Cabeças e Longá, na região de Juazeiro do PiauÍ (PI), borda nordeste da bacia, foram alvos de análise faciológica e estratigráfica no intuito de demonstrar como as condições de sedimentação responderam às mudanças climáticas e influenciaram na arquitetura do sistema deposicional. A análise de fácies permitiu a individualização de 11 fácies sedimentares: folhelho (FI), siltito maciço (Sm), arenito maciço (Am), arenito com laminação plana (Ap), arenito com laminação ondulada (Ao), arenito com laminação cruzada (Ac), arenito com laminação cruzada cavalgante (Acv), arenito com estratificação cruzada *hummocky* (Ah), arenito com estratificação cruzada *swaley* (Asw), arenito deformado (Ad) e arenito com estratificação cruzada sigmoidal incipiente (Asg). As fácies sedimentares foram agrupadas em três associações de fácies (AF) que registram a implantação de uma frente deltaica dominada por processos fluviais (AF1) da Formação Cabeças que foi afogado pela elevação do nível do mar local, seguido da implantação de uma plataforma costeira dominada por ondas de tempo bom e de tempestade (AF2 e AF3) da Formação Longá. A AF3, em especial, registra camadas tabulares caracterizadas pela intercalação cíclica entre fácies de arenito e folhelho interpretadas aqui como depósitos de turbiditos. A presença de fácies sedimentares associadas aos turbiditos na Formação Longá é descrita de forma inédita nessa pesquisa e pode representar um intervalo potencialmente importante como reservatório da Formação Longá, principal unidade selante do sistema petrolífero Mesodevoniano-Eocarbonífero da Bacia do Parnaíba. Essa descoberta fomenta a necessidade da realização de novos estudos petrofísicos nessas camadas com o objetivo de confirmar a potencialidade destas rochas como um possível reservatório secundário.

Palavras-chave: Sistema petrolífero. Formação Longá e turbiditos. Bacia do Parnaíba.



## ABSTRACT

The Late Devonian-Early Carboniferous interval of the Parnaíba Basin represented by Cabeças and Longá formations records important changes in paleoenvironmental conditions of the basin. The migration of Gondwana paleocontinent since Polar Regions to subtropical areas caused relative impact in the sedimentation of the basin. Outcrop-based facies and stratigraphic analysis of Cabeças and Longá formations, in Juazeiro do Piauí (PI), northeastern edge of the basin, allowed identify how the sedimentation conditions were influenced by climate changes generating different architectures of depositional system. The facies analysis permitted the individualization of 11 sedimentary facies: shale (FI), massive siltstone (Fm), massive sandstone (Sm), parallel laminated sandstone (Sh), ripple laminated sandstone (Sr), cross laminated sandstone (St), climbing ripples cross laminated sandstone (Scr), hummocky cross bedding sandstone (SI), swaley cross bedding sandstone (SIs), convolute bedding sandstone (Sc) and sigmoidal cross bedding sandstone (Ss). The sedimentary facies were grouped in three facies associations (FA) that registers the implementation of a deltaic front dominated by fluvial processes (AF1) of Cabeças Formation which was drowned by rising sea level, followed by an implantation of a coastal platform dominated by good weather waves and storm (AF2 and AF3) of Longá Formation. The AF3, in particular, registers tabular layers characterized by cyclical intercalation between sandstone facies and shale here interpreted as turbidity deposit. The presence of sedimentary facies associated to turbidites in Longá Formation is described in an unprecedented way in this research and may represent a porous interval in the main sealant unit on the Mesodevonian-Eocarbonífero oil system of Parnaíba Basin. This finding promotes the need to carry out new petrophysical studies in these layers in order to confirm the potential of these rocks as a possible secondary reservoir.

Keywords: Oil system. Longá Formation and turbidites. Parnaíba Basin.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Mapa geológico da porção norte do estado do Piauí (retângulo vermelho) com a localização e o acesso dos perfis estudados. .... 19
- Figura 2 - Localização da Bacia do Parnaíba com as principais feições estruturais herdada do embasamento. .... 21
- Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Parnaíba com destaque para o intervalo analisado, que corresponde a transição entre as formações Cabeças e Longá. .... 22
- Figura 4 - Grau de maturação térmica da matéria orgânica dos folhelhos Pimenteiras com base em reflectância da vitrínita. Notar que nas proximidades das rochas intrusivas a matéria orgânica atingiu o nível senil gerando gás seco. .... 26
- Figura 5 - Carta de eventos do sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba. As rochas reservatório da Formação Cabeças e selante da Formação Longá foram formadas no intervalo entre o Mesodevoniano e o Carbonífero. A acumulação de hidrocarboneto ocorreu principalmente durante o Jurássico. .... 26
- Figura 6 - Representação esquemática do perfil da linha de costa de uma plataforma marinha rasa dominada por onda e tempestade com a delimitação dos subambientes. Notar que os limites dos subambientes são marcados pelo nível de base das ondas de tempo bom e tempestades. NM = nível do mar. .... 28
- Figura 7 - Perfil esquemático da sucessão de fácies de ambiente marinho raso dominado por onda e tempestade. .... 28
- Figura 8 - Diagramas esquemáticos ilustrando as principais características da ação de tempestades em plataformas marinha atuais. A- Perfil longitudinal da plataforma indicando o aumento do *set-up* costeiro e a estratificação dos regimes de fluxo na coluna d'água (MSL = Nível médio do mar). B O Sentido de transporte sedimentar (seta vermelha), paralelo a linha de costa, resultante do balanço entre a força Coriolis e a força do gradiente de pressão. .... 30

Figura 9 – Diagrama de estabilidade de formas de leito para fluxo combinado em função das velocidades de fluxos unidirecional e oscilatório.....	31
Figura 10 - Morfologia da corrente turbidítica. A porção basal apresenta comportamento pseudoplástico com movimento aproximadamente linear, enquanto que na porção superior os sedimentos transportados em suspensão por fluxo turbulento.....	34
Figura 11 - Sequencia de Bouma, com os horizontes e a síntese dos processos envolvidos.....	35
Figura 12 - Sucessão lateral de fácies em acamamento turbidíticos. A ordem de deposição das principais populações granulométricas (1°,2°,3°e 4°) com suas respectivas fácies (F2 a F9) que refletem as transformações da corrente turbidítica durante a deposição. ....	35
Figura 13 - Perfil colunar das formações Cabeças e Longá na região de Juazeiro do Piauí, borda nordeste da Bacia do Parnaíba. A Formação Cabeças apresenta 10 m de espessura e é caracterizada por lobos sigmoidais amalgamados de arenito médio a grosso. Já a Formação Longá possui 69 m de espessura sendo caracterizada por corpos tabulares de arenito muito fino a médio intercalado com folhelho.....	39
Figura 14 - Principais feições das exposições analisadas do Grupo Canindé na região de Juazeiro do Piauí. A- Fotografia aérea com a localização dos pontos 3 e 4 (P3 e P4). Observe que o limite entre as formações Cabeças e Longá é evidenciado pela quebra de relevo (tracejado vermelho) B- Aspecto geral da Formação Cabeças, composta por arenitos na forma de lobos sigmoidais amalgamados (Ponto 3). C- Aspecto geral da Formação Longá, composta por arenitos com geometria tabular intercalado com folhelhos (Ponto 4). ....	40

Figura 15 - Principais feições das fácies folhelho (Fl), siltito maciço (Sm) e arenito com laminação ondulada (Ao). A-. Laminas descontínuas da fácies Fl, intercalada com camadas tabulares com limites deformados da fácies Am. Notar a presença de lentes de arenito inclusas no plano de foliação da fácies Fl (seta branca; escala: 2,5 cm; Ponto 4). B- Camadas da fácies Sm em contato com a fácies Ao. Observe o contato levemente ondulado entre as fácies (escala: 20 cm; Ponto 2).....43

Figura 16 - Camadas tabulares e lenticulares com as fácies folhelho (Fl), arenito maciço (Am) e arenito com laminação cruzada cavalgante (Acv). A- Camada com a fácies Am com base irregular e erosiva intercalada com laminas da fácies Fl. Observe que os clastos intraformacionais de folhelho ocorrem imersos na fácies Am e que os planos de foliação da fácies Fl estão em *on lap* (círculos vermelhos) com lâminas de arenito (Ponto 4). B- Detalhe dos limites deformados da fácies Am (seta branca) destacado pela fácies Fl e lentes com a fácies Avc (seta verde; escalas: 2,5 cm; Ponto 4).....44

Figura 17 - Vista em planta da fácies Am com esboços esquemáticos indicando traços fosseis na formas de tubos irregulares, meandrante e sem ramificações (Ponto 4).....45

Figura 18 - Contato erosivo entre as fácies arenito com laminação plana (Ap) e fácies arenito com estratificação cruzada *swaley* (Asw). O contato basal da fácies Asw é caracterizado por ser côncavo, erosivo e assimétrico. Essa geometria é destacada por terminações em *on lap* da fácies Ap.e por clastos intraformacionais (arenito?) (seta branca; Ponto 1). .....46

Figura 19 - Forma de ocorrência das fácies arenito com laminação ondulada (Ao) e arenito com laminação cruzada (Ac). A- Laminações onduladas com cristas simétricas, e flancos com baixo ângulo de mergulho ( $>10^\circ$ ), da fácies Ao (Ponto 1). B- Sets aproximadamente lenticulares, com base ondulada, da fácies Ac, apresentando laminações cruzadas com mergulhos em sentidos opostos (setas brancas; Ponto 1). .....47

- Figura 20 - Principais características da fácies arenito com estratificação cruzada *hummocky* (Ah). **A-** Corpos de arenito amalgamados com forma aproximadamente lenticular das fácies Ah (Ponto 2). **B-** Detalhe da foto A, indicando o truncamento em baixo ângulo das laminações internas e ainda o adelgaçamento e espessamento lateral das laminações, na parte inferior da foto a acima da escala (Ponto 2). **C-** Detalhe da foto A com esboço esquemático. Camada com forma lenticular, apresentando o topo convexo e base côncava da fácies Ah. O esboço esquemático evidencia os *sets* com base erosiva, compostos por laminações paralelas, suavemente inclinadas e que lateralmente passam para laminação plana, das fácies Ah (escala: 7,5 cm; Ponto 2). .....50
- Figura 21 - Camadas sigmoidais da fácies arenito com estratificação cruzada sigmoidal incipiente (Asg). **A-** Seção longitudinal de lobos sigmoidais amalgamados com laminações que acompanham a geometria externa do corpo e tendem a horizontalidade no sentido do *toe set* (Ponto 3). **B-** Lobo sigmoidal apresentado a base deformada (linha pontilhada; Ponto 3). **C-** Vista em planta de marcas onduladas com cristas assimétricas, sinuosas e descontínuas no topo do lobo sigmoidal (Ponto 3). .....52
- Figura 22 - Arenito deformado (fácies Ad) apresentando laminações contorcidas na forma de dobras irregulares e assimétricas (Ponto 3). .....53
- Figura 23 - Microfotografias das formações Cabeças e Longá. **A e B-** Aspectos texturais e composição do arcabouço com a indicação do cimento de óxido/hidróxido de Ferro (Fe) e dos poros (Po) das formações Cabeças e Longá, respectivamente. **C-** Sistema de poros da Formação Cabeças caracterizado principalmente por poros primários do tipo intergranular (setas vazadas). **D-** Sistema de poros da Formação Longá apresentando poros do tipo primários intergranular (setas vazadas) e secundários, representado por poro móldico (seta preenchida). .....55

- Figura 24 - Geometria deposicional do *shoreface* (AF2) **A-** Porção basal da AF2 composta por corpos ondulados arenito com as fácies Ah, Ao e Ap, intercalados com camadas descontínuas da fácies Sm (Ponto 2). **B-** Porção superior da AF2, os corpos ondulados passam a ser constituídos exclusivamente por arenito com contatos erosivos côncavos e assimétricos da fácies Asw que lateralmente passa para a fáies Ap. Observe que os corpos ondulados são limitados por superfície de 3° ordem (Ponto 1).....59
- Figura 25 - Geometria deposicional da AF3. Corpos de arenito com acamamento ondulado internamente estruturado com as fácies Ah, Asw e Ap. O contato entre as fácies é erosivo na forma de escavações côncavas, assimétricas, com truncamento em baixo ângulo (setas amarelas) e por vezes concordante (Ponto 3).....61
- Figura 26 - Depósito turbidítico da AF3. A- Camadas tabulares, lateralmente contínuas de arenito intercalado com folhelho (Ponto 4). B- Detalhe para a estruturação interna das camadas de arenito composta pelas fácies Am, Ap, Acv e limitadas por laminae descontínuas de folhelhos. Os contatos de topo e de base das camadas são irregulares. ....62
- Figura 27 – Modelo deposicional da sucessão Neodevoniana–Eocarbonífera na região de Juazeiro do Piauí. No Neodevoniano foi implantado o sistema deltaico (AF1) na borda nordeste da Bacia do Parnaíba que prograda para SW. No Eocarbonífero ocorre uma elevação do nível do mar e a implantação de um sistema plataforma dominado por ondas de tempo bom e tempestades. A alta energia deposicional da plataforma fomentava a geração de correntes turbidíticas que transportavam sedimentos arenosos para *offshore* (Nbtb= nível de base de onda de tempo bom; Nbt= nível de base de onda de tempestade e; CTIT= corrente turbidítica induzida por tempestade. ....65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese das fácies e processos sedimentares das formações Cabeças e Longá, região de Juazeiro do Piauí. ....	41
Tabela 2 - Constituintes detríticos, diagenéticos e poros dos arenitos das formações Cabeças e Longá.....	54
Tabela 3 - Associação de fácies das formações Cabeças e Longá na região de região de Juazeiro do Piauí.....	56

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	177
1.1	<b>Apresentação</b> .....	177
1.2	<b>Localização e acesso</b> .....	188
1.3	<b>Objetivos</b> .....	188
2	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA DO PARNAÍBA</b> .....	20
2.1	<b>Aspectos tectônicos e deposicionais</b> .....	20
2.2	<b>Supersequência Mesodevoniana–Eocarbonífera</b> .....	24
2.3	<b>Sistema petrolífero</b> .....	25
3	<b>REVISÃO DE CONCEITOS</b> .....	27
3.1	<b>Sistema marinho raso dominado por onda e tempestades</b> .....	27
3.1.1	Tempestito .....	29
3.2	<b>Turbiditos</b> .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
3.2.1	Correntes Turbidítica .....	32
3.2.2	Deposição e sucessão de fácies turbidíticas .....	33
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
4.1	<b>Análise de fácies</b> .....	36
4.2	<b>Petrografia sedimentar</b> .....	36
5	<b>SUCESSÃO SEDIMENTAR DA REGIÃO DE JUAZEIRO DO PIAUÍ (PI), BORDA NORDESTE DA BACIA DO PARNAÍBA</b> .....	38
5.1	<b>Análise de fácies</b> .....	38
5.1.1	Generalidades .....	38
5.1.2	Descrições das fácies .....	42
5.1.2.1	Folhelho (FI) .....	42
5.1.2.2	Siltito maciço (Sm) .....	43
5.1.2.3	Arenito maciço (Am) .....	43
5.1.2.4	Arenito com laminação plana (Ap) .....	46
5.1.2.5	Arenito com laminação ondulada (Ao) .....	47
5.1.2.6	Arenito com laminação cruzada (Ac) .....	48



5.1.2.7	Arenito com laminação cruzada cavalgante (Acv) .....	48
5.1.2.8	Arenito com estratificação cruzada <i>hummocky</i> (Ah) .....	49
5.1.2.9	Arenito com estratificação cruzada <i>swaley</i> (Asw) .....	50
5.1.2.10	Arenito com estratificação cruzada sigmoidal incipiente (Asg).....	51
5.1.2.11	Arenito deformado (Ad).....	52
5.2	<b>Textura e caracterização dos constituintes detríticos, diagenéticos e poros.</b> .....	53
5.2.1	Formação Cabeças .....	53
5.2.2	Formação Longá.....	55
5.3	<b>Associação de fácies</b> .....	56
5.3.1	Associação de fácies AF1- Frente deltaica.....	57
5.3.2	Associação de Fácies AF2- <i>Shoreface</i> .....	58
5.3.3	Associação de fácies AF3- <i>Offshore</i> .....	60
5.4	<b>Modelo deposicional</b> .....	64
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	67
	<b>REFERENCIAS</b> .....	68

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A maior parte do conhecimento disponível sobre a Bacia do Parnaíba foi produzido entre as décadas de 60 a 80 do século passado, porém os resultados desse fato afastou os investimentos em pesquisa na bacia e a faz hoje ser considerada uma fronteira exploratória do ponto de vista da geologia de hidrocarbonetos, quando comparada as demais bacias intracratônicas paleozóicas brasileiras (SANTOS; LIMA FILHO; NEUMANN, 2007). Com a intenção de preencher essa lacuna, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) iniciou uma nova fase de pesquisa na Bacia do Parnaíba em 2002, com a oferta de blocos exploratórios na 4<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 12<sup>a</sup> rodada de licitações. Essa iniciativa confirmou a existência de um sistema petrolífero na Supersequência Mesodevoniana–Eocarbonífera, atestado pelo sucesso exploratório do Parque dos Gaviões (Maranhão), com reservas confirmadas de gás natural de 6,99 bilhões de m<sup>3</sup> (ABELHA, 2013). Essas novas informações têm impulsionado a demanda de estudos estratigráficos no intuito de melhorar a caracterização dos elementos que compõem o principal sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba.

A Bacia do Parnaíba está localizada na porção nordeste da Placa Sul Americana, ocupa uma área de aproximadamente 600 mil km<sup>2</sup> com preenchimento sedimentar da ordem de 3.500 m e idades variando do Siluriano ao Cretáceo (VAZ et al., 2007). O principal sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba está inserido na Supersequência Mesodevoniana–Eocarbonífera (Grupo Canindé), composto pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti. O intervalo gerador é constituído por folhelhos negros e radioativos da Formação Pimenteiras, rochas reservatórios indicadas por arenitos da Formação Cabeças e os folhelhos da Formação Longá desempenham o papel de rocha selante (ABELHA, 2013).

Apesar da confirmação de um sistema petrolífero na Bacia do Parnaíba, a caracterização dos elementos que compõem o sistema ainda são pontuais, principalmente em relação a variação lateral dos paleoambientes deposicionais (RODRIGUES, 2003; YOUNG, 2006; BARBOSA, 2014). A utilização de modelos geológicos confeccionados a partir de afloramentos de unidades que apresentam potencialidade para hidrocarbonetos é uma ferramenta importante na tentativa de

diminuir as incertezas inerentes ao processo de caracterização dos elementos do sistema petrolífero. Esta perspectiva permite o reconhecimento de características importantes, como a identificação de heterogeneidades, barreiras de permeabilidade e de porosidade (ARNOT; GOOD; LEWIS, 1997; LUCA; BASILICI, 2008).

Neste sentido, exposições lateralmente contínuas das formações Cabeças e Longá, que afloram as margens da rodovia estadual PI-115, nas proximidades da cidade de Juazeiro do Piauí (PI), borda nordeste da Bacia do Parnaíba, foram alvo de avaliação faciológica e petrográfica (Figura 1). A análise de fácies forneceu informações sobre a geometria e a variação lateral de fácies, bem como permitiu caracterização paleoambiental das unidades. Por sua vez, a análise petrográfica possibilitou a caracterização dos constituintes primários, secundários e poros e visou refinar as descrições faciológicas. Adicionalmente, o intervalo entre as formações Cabeças e Longá marca a passagem de condições glaciais para pós-glaciais e a avaliação paleoambiental é fundamental para entender como as condições de sedimentação responderam a essas mudanças climáticas e influenciaram na arquitetura deposicional do sistema petrolífero.

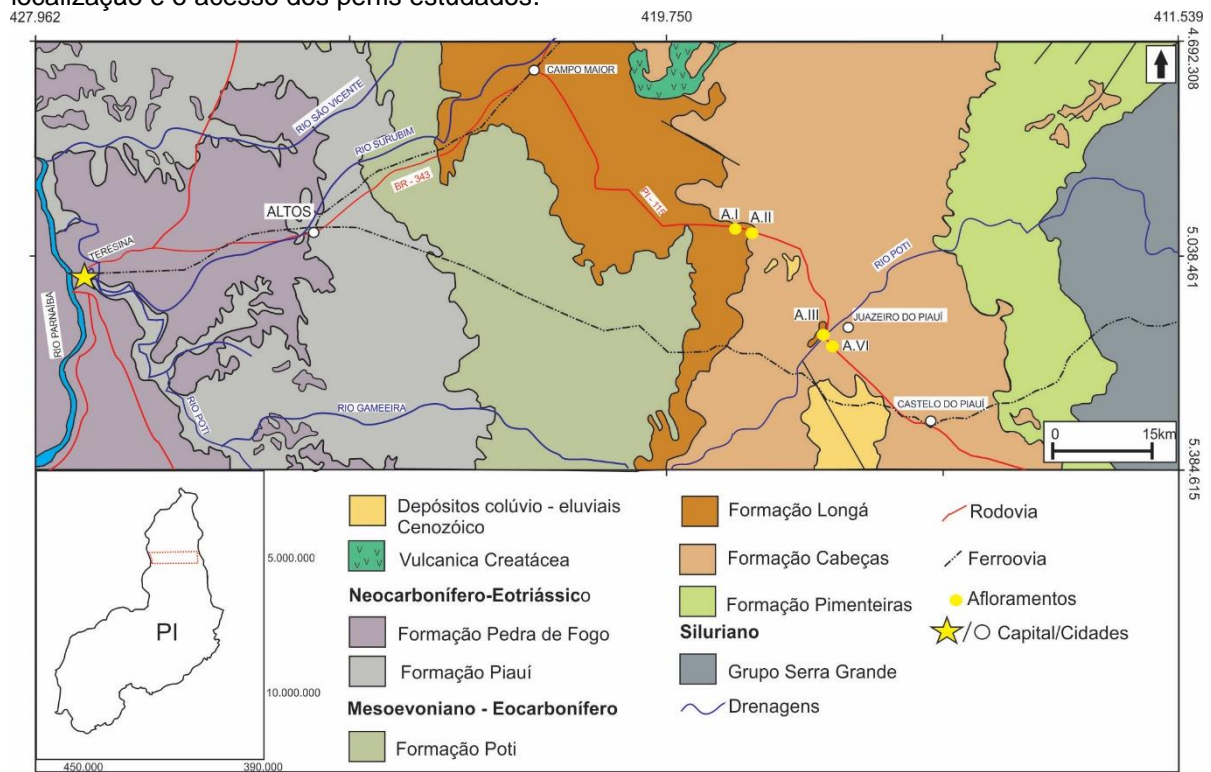
## **1.2 Localização e acesso**

Os afloramentos analisados estão localizados nas margens da rodovia estadual PI-115, entre as cidades de Campo Maior e Juazeiro do Piauí, em corte de estrada e em pedreira de exploração de placas de arenito, a aproximadamente 221 km a leste de Teresina (PI). O acesso foi realizado através da rodovia federal BR-343 e rodovia estadual PI-115 a partir de Teresina (Figura 1).

## **1.3 Objetivos**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) visou a reconstituição do paleoambiente deposicional das formações Cabeças e Longá, respectivamente rocha reservatório e selante do sistema petrolífero Mesodevoniano-Eocarbonífero, na região de Juazeiro do Piauí (PI), bem como fornecer a caracterização petrográfica das fácies arenosas.

Figura 1 - Mapa geológico da porção norte do estado do Piauí (retângulo vermelho) com a localização e o acesso dos perfis estudados.



Fonte: Bizzi et al (2003).

## **2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA DO PARNAÍBA**

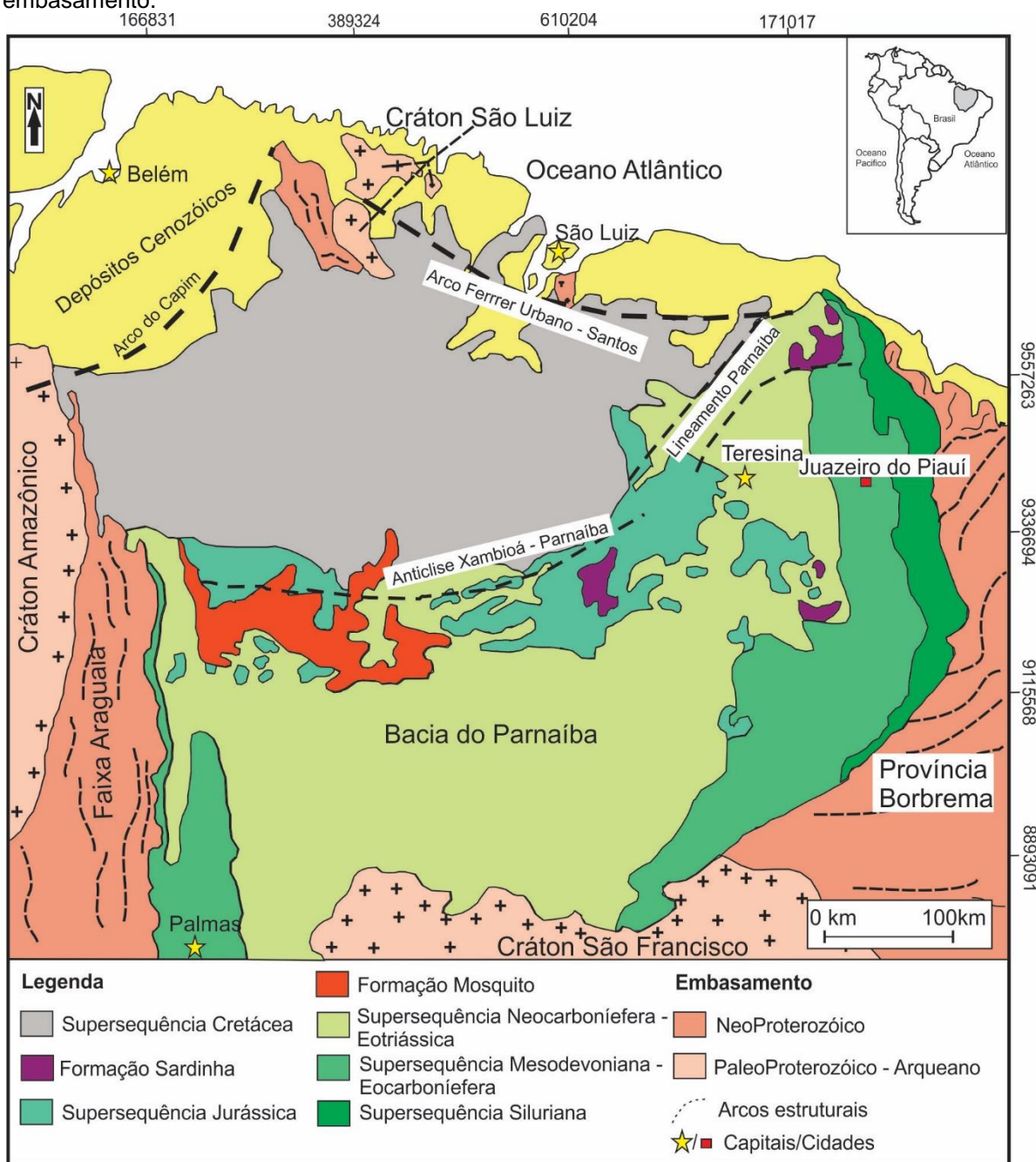
### **2.1 Aspectos tectônicos e deposicionais**

A Bacia Intracratônica do Parnaíba está localizada na porção nordeste da Placa Sul Americana e apresenta extensão de aproximadamente 600.000 km<sup>2</sup> (ALMEIDA et al., 1981; Figura 2). Os seus limites são representados a norte pelo Arco Ferrer-Urbano-Santos, a leste pela Falha Tauá, a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu, a oeste pelo Lineamento Tocantins Araguaia e a norte pelo Arco Tocantins (GOÉS, 1995). O registro sedimentar da Bacia do Parnaíba é da ordem de 3.500 m de espessura, com rochas siliciclásticas e químicas predominantemente paleozóicas, além de rochas vulcânicas de idade juro-cretácea (VAZ et al., 2007; Figura 3).

O embasamento da Bacia do Parnaíba é composto por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares formadas ou retrabalhadas durante o Ciclo Brasileiro. Os espaços de acomodação iniciais foram gerados por atividades finais do Ciclo que promoveram a formação de feições tipo grabens, identificadas por métodos sísmicos, gravimétricos e magnetométricos (ALMEIDA; CARNEIRO, 2004). As principais feições estruturais herdadas do embasamento estão representadas pelos Lineamentos Picos-Santa Inês, Marajó e Transbrasiliiano, que foram importantes na evolução da bacia, pois controlaram as direções dos eixos deposicionais até o Eocarbonífero (VAZ et al., 2007).

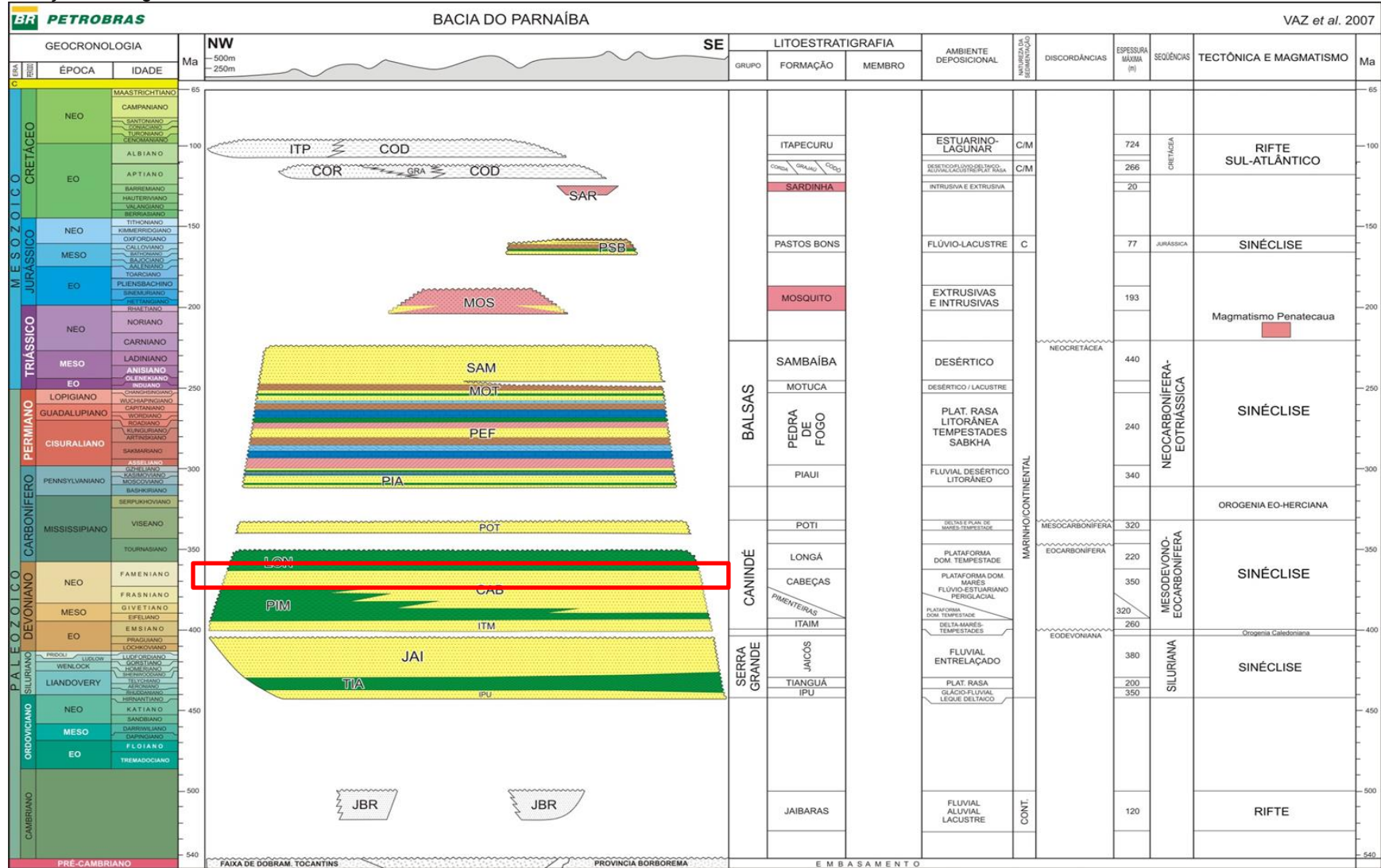
O registro sedimentar da Bacia do Parnaíba pode ser agrupado em cinco Supersequências: Siluriana (Grupo Serra Grande), Mesodevoniana–Eocarbonífera (Grupo Canindé), Neocarbonífera–Eotriássica (Grupo Balsas), Jurássica (Formação Pastos Bons) e Cretácea (formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecurú). A individualização dessas Supersequência foi estabelecida a partir da identificação de discordâncias regionais evidenciadas através de dados sísmicos e bioestratigráficos (GOÉS; FEIJÓ, 1994; VAZ et al., 2007). O Grupo Serra Grande é composto pelas formações Ipu, Tianguá e Jacóis, caracterizadas por sedimentos flúvio-deltaicos a marinho raso que representam um ciclo transgressivo–regressivo completo (GOÉS; SOUZA; TEIXEIRA, 1990; ALMEIDA; CARNEIRO, 2004).

Figura 2 - Localização da Bacia do Parnaíba com as principais feições estruturais herdada do embasamento.



Fonte: Nascimento e Goés (2007).

Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Parnaíba com destaque para o intervalo analisado, que corresponde a transição entre as formações Cabeças e Longá.



Fonte: Vaz et al. (2007)

O Grupo Canindé inclui as formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti cuja sedimentação ocorreu em um ambiente plataformal dominado por processos de maré e tempestades (DELLA FÁVERA, 1990). O Grupo Balsas é composto pelas formações Piauí, Pedra de Fogo, Mutuca e Sambaíba, que registram um progressivo processo de desertificação bacia. Este grupo é caracterizado por depósitos com ambiência clástica/evaporítica de mar raso, gradando em direção ao topo para um ambiente lacustre/desértico (GOÉS, SOUZA; TEIXEIRA, 1990; ANDRADE, 2012; ABRANTES JUNIOR; NOGUEIRA, 2013). O final da sedimentação do Grupo Balsas é marcado por um intenso magmatismo básico, produto da reativação tectônica da Plataforma Sul Americana que gerou esforços responsáveis pela fragmentação do Supercontinente Pangea (VAZ et al., 2007).

A sedimentação pós-paleozóica na Bacia da Parnaíba está representada pela Formação Pastos Bons (Jurássico) e pelas formações Corda, Codó, Grajaú, e Itapecuru, depositadas no Cretáceo. A deposição da Formação Pastos Bons ocorreu em resposta a criação de espaços de acomodação devido ao sobrepeso das rochas vulcânicas intrusivas básicas. A sedimentação da Formação Pastos Bons ocorreu em um ambiente flúvio-lacustre de clima semiárido. No Cretáceo ocorre um rearranjo nas condições de sedimentação na bacia, que resultaram no deslocamento do depocentro para norte e em transgressões marinhas a partir do oceano Atlântico Equatorial (VAZ et al., 2007). Os depósitos da Formação Corda foram gerados em um sistema continental desértico, com dunas eólicas de grande porte e pequenos lagos, em clima semiárido (SANTOS; CARVALHO, 2009). Os sedimentos da Formação Codó foram depositados em um ambiente marinho restrito a lagunar. Esses depósitos ocorrem interdigitados com sedimentos de ambiência litorânea e deltaica da Formação Grajaú (REIS; CAPUTO, 2007). A Formação Itapecuru é caracterizada pelo preenchimento de vales incisos por sedimentos de origem estuarina-lagunar, esporadicamente afetado por tempestades (ROSSETI, GÓES; TRUCKENBRODT, 2001).



## 2.2 Supersequência Mesodevoniana–Eocarbonífera

As rochas da Supersequência Mesodevoniana–Eocarbonífera são litoestratigraficamente definidas como Grupo Canindé, composto pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti (GOÉS; FEIJÓ 1994; VAZ et al., 2007). Os afloramentos dessas unidades ocorrem principalmente na porção sudoeste e leste da bacia e seus estratos estão depositados discordantemente sobre o Grupo Serra Grande. A deposição da Supersequência Mesodevoniana–Eocarbonífera ocorreu em resposta a processos crustais flexurais associados a uma tendência global de elevação do nível do mar (JHONSON et al., 1985; GOÉS, SOUZA e TEIXEIRA, 1990). O resultado desses processos culminou com a implantação de extensos mares epicontinentais e formação de depósitos influenciados por correntes de maré e tempestades (DELLA FÁVERA, 1990).

A Formação Itaim está depositada discordantemente sobre os estratos da Supersequência Siluriana. Essa unidade é constituída por arenito fino esbranquiçado e folhelho bioturbado depositados em ambiente deltaico a plataformal dominado por processos de maré e tempestade (GOÉS; FEIJÓ, 1994; VAZ et al., 2007).

Os estratos da Formação Pimenteiras são representados por camadas de folhelho negro, radioativo, rico em matéria orgânica, intercalados com camadas de siltito e arenito. Essas rochas apresentam uma tendência granodecrescente ascendente cíclica e representam a transgressão marinha mais importante ocorrida na Bacia do Parnaíba. Os depósitos da Formação Pimenteiras foram depositados em ambiente de plataforma rasa, dominada por onda e tempestade (DELLA FÁVERA, 1990; GOÉS; FEIJÓ, 1994).

A Formação Cabeças é constituída predominantemente por arenito médio a grosso cuja a sedimentação ocorreu em ambiente flúvio-deltaico influenciado por processos de maré e onda. Pavimentos estriados sobrepostos por diamictito com clastos estriados, polidos e facetados com dimensões e litologia variadas (p.e. arenito, granito, vulcânica, gnaisse) evidenciam influência glacial no topo dessa unidade (CAPUTO et al., 2008; BARBOSA, 2014).

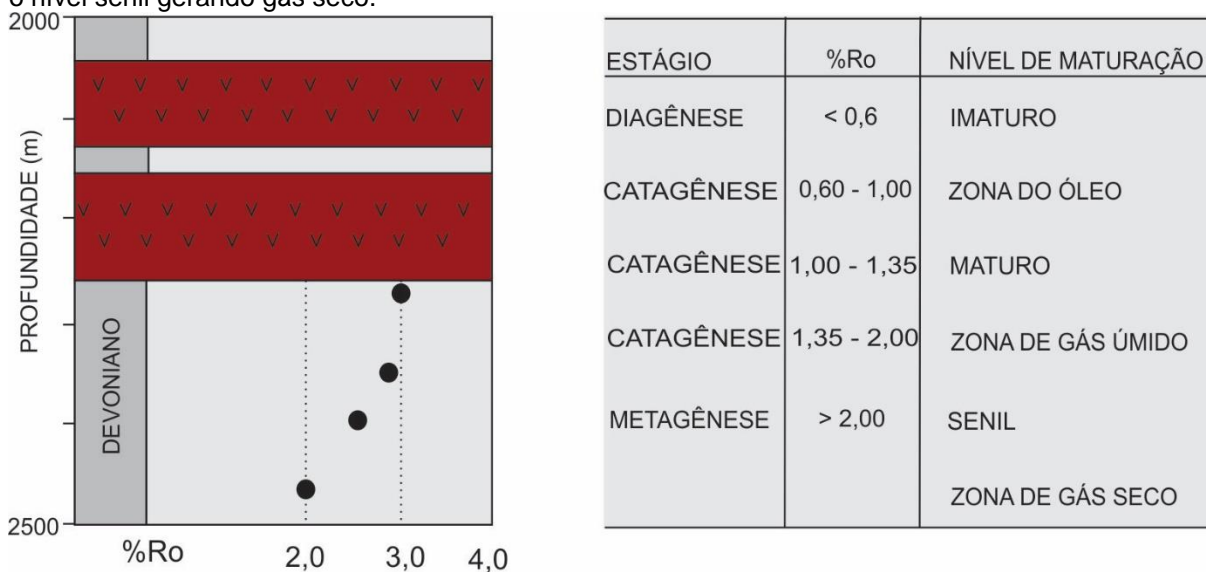
As rochas da Formação Longá são caracterizadas por folhelho escuro, siltito e arenito fino bioturbado que registram um ambiente nerítico plataformal dominado por correntes de tempestade (RODRIGUES, 2003). A Formação Poti é constituída por

arenito fino cinza esbranquiçado intercalado com folhelho e siltito com eventuais níveis de carvão. A sedimentação dessa unidade ocorreu em um ambiente deltaico com influência de correntes de maré (LIMA; LEITE, 1978; GÓES, 1995; MELO; LABOZIAK, 2003). Após a deposição da Formação Poti, a bacia foi palco de processos epigênicos ascendentes associados a Orogenia Hernicana que resultou no soerguimento da bacia e produziu uma discordância erosiva que marca o topo da Supersequência Mesodevoniana–Eocarbonífera (CAPUTO, 1984).

### 2.3 Sistema Petrolífero

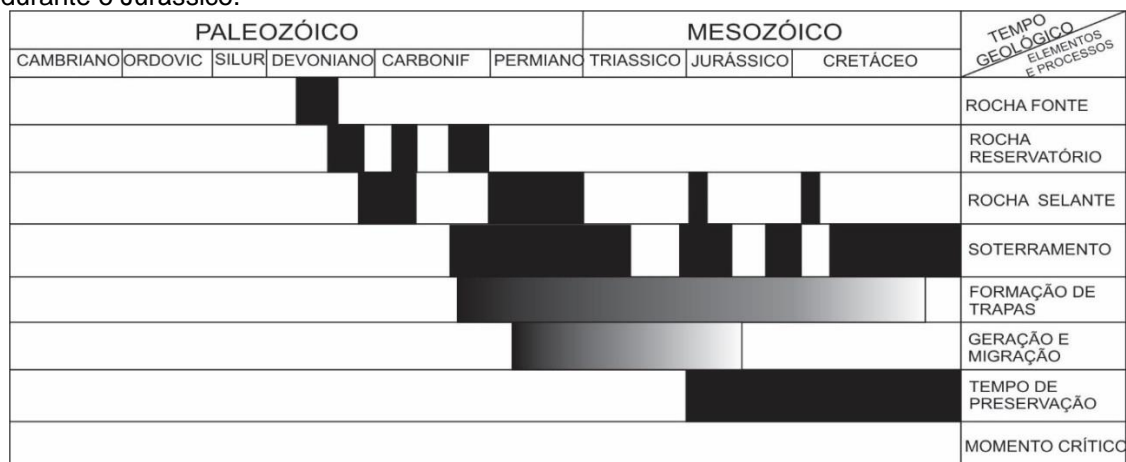
Um sistema petrolífero é definido pela existência de quatro elementos-chave: rocha geradora, rocha reservatório, rocha selante e a armadilha (MILANI; ZALÁN, 1999). Na Bacia do Parnaíba, o principal sistema petrolífero é representado pelo Grupo Canindé, com rocha geradora, reservatório e selante representadas respectivamente pelas formações Pimenteiras, Cabeças e Longá (SANTOS, LIMA FILHO; NEUMANN, 2007; ABELHA, 2013). Os folhelhos negros da Formação Pimenteiras são ricos em matéria orgânica, com valores médios de Carbono Orgânico Total (C.O.T.) entre 2 e 2,5%, podendo atingir picos de 6% e querogênio do tipo II e III (PETERSOHN, 2007). Essas rochas estão depositadas em contato direto com o principal intervalo reservatório, representado por arenitos deltaicos a marinhos rasos da Formação Cabeças. Entretanto, lentes de arenitos intercalados em folhelhos da Formação Pimenteiras podem dar origem a reservatórios secundários (GOÉS; SOUZA; TEIXEIRA, 1990; MILANI; ZALÁN, 1999). O principal tipo de trapeamento é o estrutural, porém podem ocorrer acumulações associadas a *pinch-outs* dos arenitos da Formação Cabeças (MESNER; WOOLDRIDGE, 1964 apud YOUNG, 2006). Os folhelhos Pimenteiras são tipicamente imaturos em termos de evolução térmica, exceto em áreas próximas as intrusões de rochas vulcânicas básicas, onde o grau de maturação da matéria orgânica atingiu o estágio senil, produzindo gás natural (Figura 4). Isso indica que a subsidência termal da Bacia do Parnaíba não exerceu influência significativa na maturação da matéria orgânica dos folhelhos. Dessa forma, as rochas intrusivas ígneas são a principal fonte de calor para a maturação da matéria orgânica e geração de hidrocarbonetos (WANDERLEY FILHO, TRAVASSO e ALVES, 2006).

Figura 4 - Grau de maturação térmica da matéria orgânica dos folhelhos Pimenteiras com base em reflectância da vitrinite. Notar que nas proximidades das rochas intrusivas a matéria orgânica atingiu o nível senil gerando gás seco.



O sincronismo, no tocante a geologia do petróleo, é uma variável fundamental para a definição de um sistema petrolífero e se refere ao fenômeno que possibilita a formação de rochas geradoras, reservatórios, selante, trapas e a migração de hidrocarboneto ocorram em uma escala de tempo adequada para a formação de acumulações (MILANI; ZALÁN, 1999). Apesar do principal sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba ainda ser alvo de investigação, a Figura 5 apresenta a carta de eventos que sintetiza e organiza cronologicamente a formação dos elementos do sistema petrolífero e os principais processos.

Figura 5 - Carta de eventos do sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba. As rochas reservatório da Formação Cabeças e selante da Formação Longá foram formadas no intervalo entre o Mesodevoniano e o Carbonífero. A acumulação de hidrocarboneto ocorreu principalmente durante o Jurássico.



Fonte: Abelha (2013)

### 3 REVISÃO DE CONCEITOS

#### 3.1 Sistema marinho raso dominado por onda e tempestades

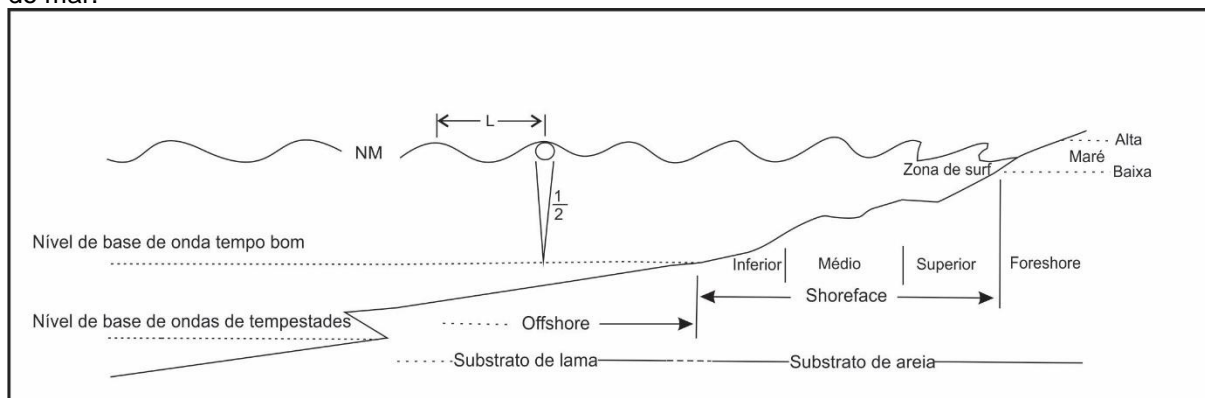
O ambiente marinho raso corresponde a áreas de acumulação de sedimentos formada ao longo da linha de costa sobre a plataforma continental que podem se estender por dezenas a centenas de quilômetros antes de atingir o slope continental. No entanto, também são formados em mares epicontinentais (NICHOLS, 2009).

A sedimentação em plataformas costeiras rasas é influenciada diretamente pelo suprimento sedimentar, amplitude de maré, ação de onda, frequência de eventos de tempestade, mudança do nível do mar e taxa de subsidência. Os sedimentos siliciclásticos em ambientes marinhos rasos normalmente apresentam assembleia composicional e textural matura devido ao longo caminho que o material foi transportado até atingir a plataforma (TUCKER, 1992). Os subambientes em sistemas marinhos dominados por onda e tempestade são distribuídos de maneira contínua sobre a plataforma gradando lateralmente do continente para a bacia da seguinte forma: *foreshore*, *shoreface* e *offshore* (Figura 6).

A zona de praia ou *foreshore* está situada acima do nível médio da maré baixa sendo constituída essencialmente por areias depositadas por processos de *swash* e *back swash* com evidências de exposição subaérea (WALKER; PLINT, 1992). A zona *shoreface* está situada entre o nível médio da maré baixa e o nível de base de ondas de tempo normal. A sedimentação no *shoreface* é predominantemente arenosa e são retrabalhadas por ondas de tempo bom, tempestade e por corrente de deriva costeira. Diversas formas de leito estão presentes no *shoreface*, tais como cordões, lençóis e barras arenosas.

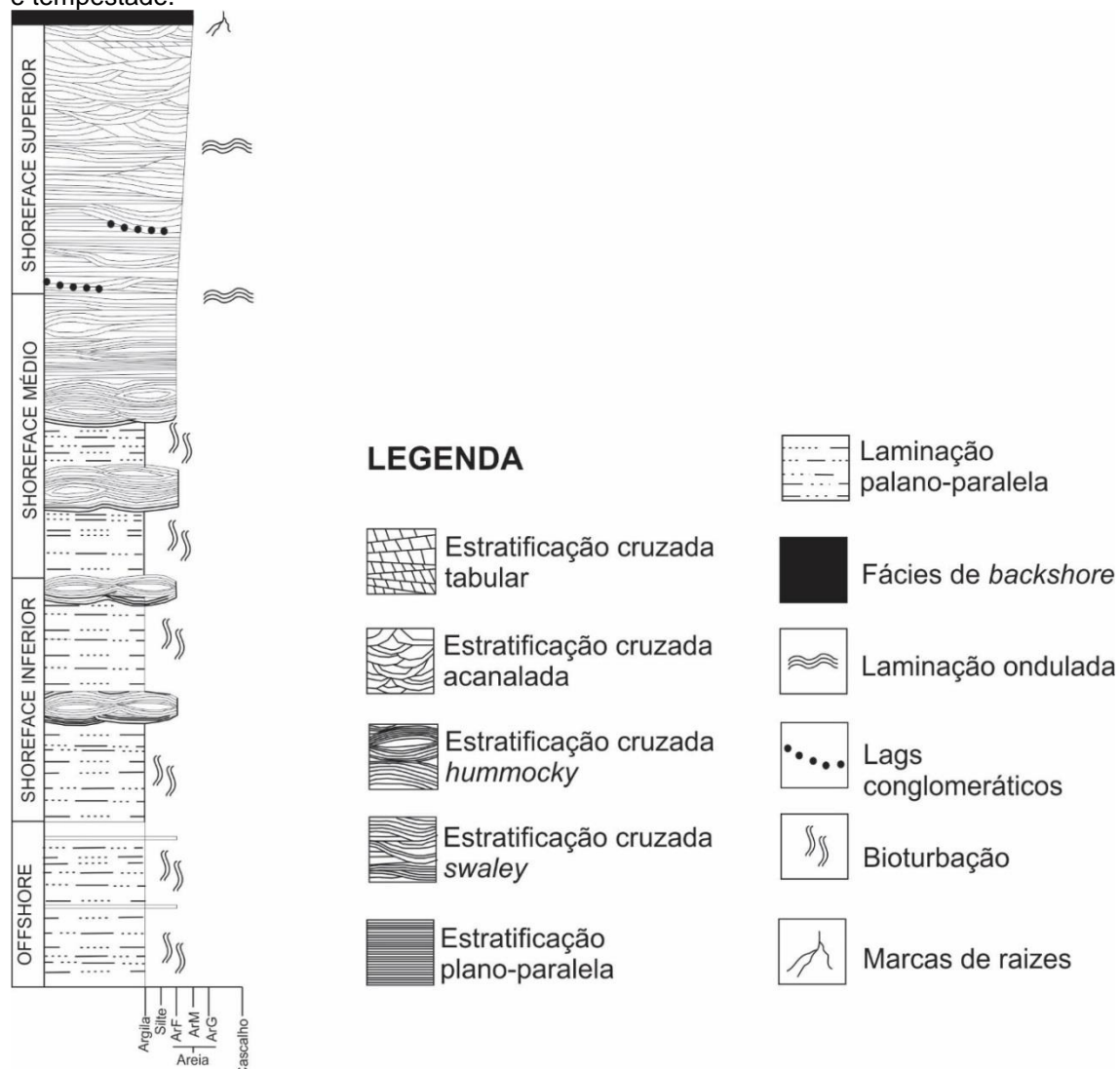
Os arenitos formados nesse subambiente apresentam laminação plana e ondulada, além de estratificação cruzada *swaley* (ECS) e *hummocky* (ECH) (TUCKER, 1991). A porção mais distal do *shoreface* é caracterizada pela presença de depósitos arenosos intercalados a depósitos argilosos (Figura 7). A zona *offshore* está localizada abaixo do nível de base das ondas de tempo normal e a sedimentação é controlada essencialmente por processo de decantação, formando depósitos de argilitos e folhelhos, porém grande quantidade de sedimentos arenosos pode ser transportada para esse ambiente pela ação de tempestades (WALKER; PLINT, 1992).

Figura 6 - Representação esquemática do perfil da linha de costa de uma plataforma marinha rasa dominada por onda e tempestade com a delimitação dos subambientes. Notar que os limites dos subambientes são marcados pelo nível de base das ondas de tempo bom e tempestades. NM = nível do mar.



Fonte: Walker e Plint (1992).

Figura 7 - Perfil esquemático da sucessão de fácies de ambiente marinho raso dominado por onda e tempestade.



Fonte: Adaptado de Nichols (2009).

### 3.1.1 Tempestito

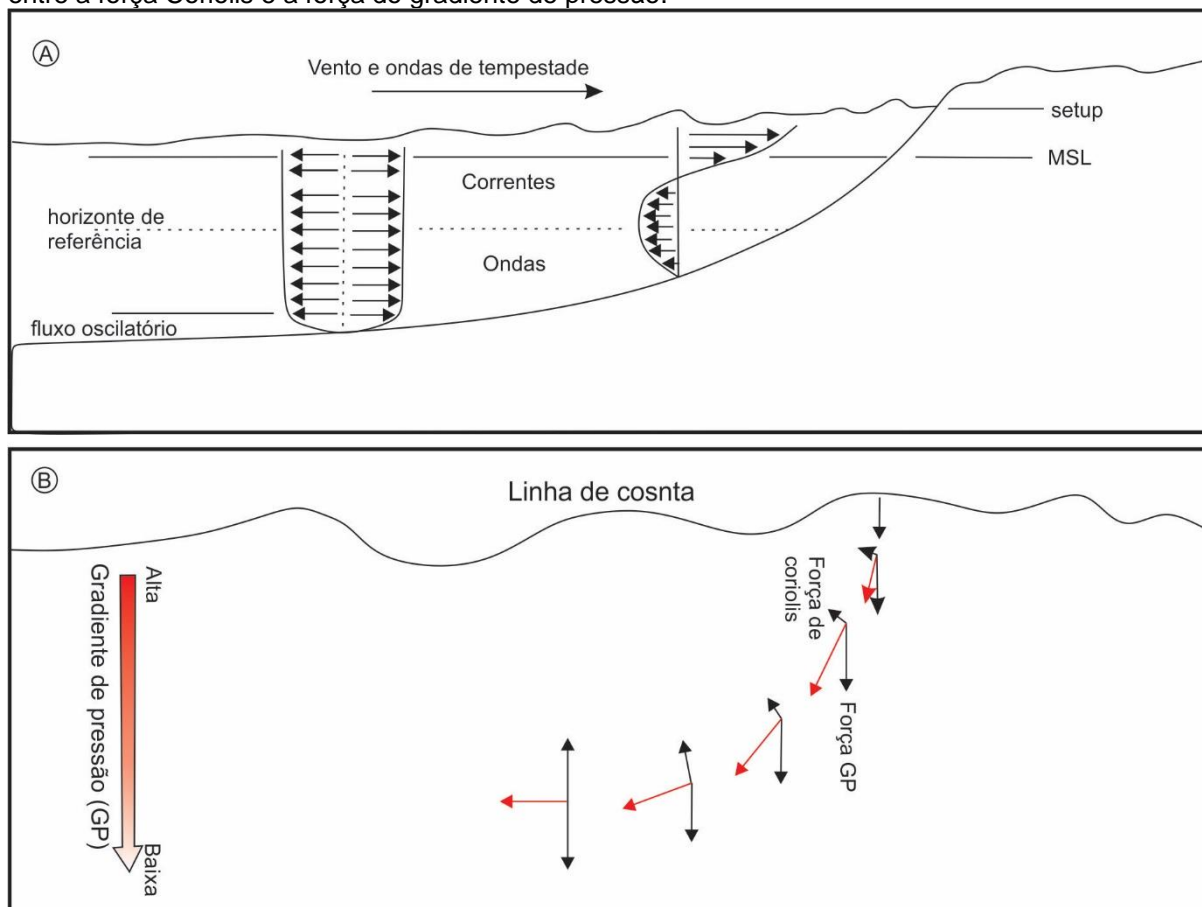
As plataformas marinhas rasas são frequentemente afetadas por tempestades e apesar de ser um evento episódico, seus efeitos de erosão e transporte sedimentar são desproporcionalmente grandes, retrabalhando os sedimentos depositados no *shoreface* e transportando substanciais quantidades de sedimentos arenosos para *offshore*. As formas de leito geradas pela ação de tempestades são denominadas de tempestitos (MYROW; SOUTHARD, 1996).

A atuação de tempestade sobre a plataforma aumenta a amplitude das ondas e produz a elevação do *set-up* costeiro, gerando poderosas correntes de fundo devido a formação de um gradiente de pressão diferencial em sentido *offshore* (Figura 8 A).

Os sedimentos postos em suspensão por evento de tempestade, não são distribuídos de maneira homogênea na coluna d'água, de forma que ficam concentrados na base da coluna, na interfase água-assoalho. Esses sedimentos são depositados sobre a ação de fluxos oscilatório, unidirecional e de fluxo combinado (MYROW; SOUTHARD, 1996). O sentido de transporte da rede de sedimentos é resultado da ação de três principais forças: (1) a força relacionada as correntes geradas pelo gradiente de pressão com sentido para *offshore*; (2) a força de Coriolis, que tem sentido perpendicular ao movimento da água e; (3) a força de fricção do assoalho (Figura 8 B). Em plataformas modernas a resultante dessas forças apresenta sentido paralelo à linha de costa (DUKE, ARNOTT; CHEEL, 1991).

A deposição de tempestitos é controlada pela combinação de três tipos de fluxo: o oscilatório, o unidirecional e o combinado. Estes variam amplamente tanto em sentido de deslocamento como em velocidade, durante a passagem da tempestade. Desta forma, produzem um complexo padrão de distribuição vertical de fácies no registro geológico (MYROW; SOUTHARD, 1991).

Figura 8 - Diagramas esquemáticos ilustrando as principais características da ação de tempestades em plataformas marinhas atuais. A- Perfil longitudinal da plataforma indicando o aumento do *set-up* costeiro e a estratificação dos regimes de fluxo na coluna d'água (MSL = Nível médio do mar). B O Sentido de transporte sedimentar (seta vermelha), paralelo a linha de costa, resultante do balanço entre a força Coriolis e a força do gradiente de pressão.

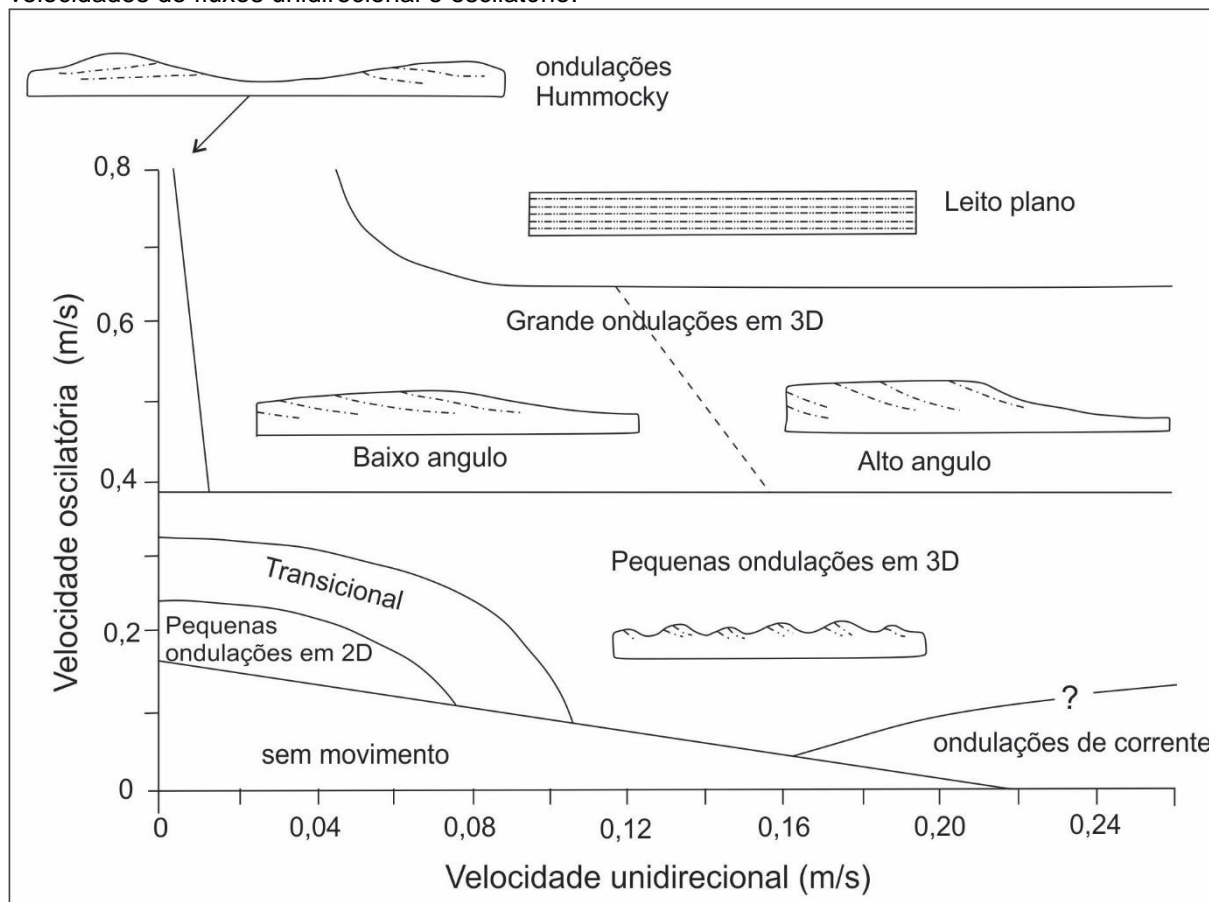


Fonte: Duke (1990)

Com base em estudos experimentais, Arnott e Southard (1990) estudaram as formas de leito geradas em areia fina por fluxo combinado, e elaboraram um diagrama de estabilidade, que relaciona diferentes velocidades de fluxo das componentes oscilatória ( $V_o$ ) e unidirecional ( $V_u$ ) (Figura 9). De acordo com o diagrama a estratificação cruzada *hummocky* simétrica é formada na porção superior esquerda, por fluxo puramente oscilatório, com velocidades superiores a 0,4 m/s e por fluxo combinado predominantemente oscilatório ( $V_o \gg V_u$ ).

As Formas de leitos onduladas assimétricas de grande porte (grande ondulações em 3D) são geradas na porção média do diagrama, por fluxo combinado com velocidades oscilatória e unidirecional moderadas. O acamamento plano é formado na porção superior esquerda do diagrama, pela associação de altas velocidades oscilatórias e unidirecionais.

Figura 9 – Diagrama de estabilidade de formas de leito para fluxo combinado em função das velocidades de fluxos unidirecional e oscilatório.



Fonte: Duke, Arnott e Cheel (1991).

Na parte inferior do diagrama ( $V_o$  menor que 0,4 m/s) são produzidas formas onduladas de pequeno porte em 2D e 3D, que são comuns no topo de acamamentos tempestícos e representam os momentos finais do evento de tempestades.

O outro mecanismo que atua no transporte de sedimentos sobre a plataforma são as correntes de densidade induzidas por tempestades. Myrow e Southard (1996) enfatizam a importância de fluxos de densidades para a formação de espessas camadas de arenitos depositadas sobre a plataforma a quilômetros de distância dentro do *offshore*, com paleofluxos com direção aproximadamente normal a linha de costa, indicados principalmente por marcas de sola. As correntes de densidade são formadas devido à alta concentração de sedimentos colocados em suspensão pelo fluxo combinado, podendo atingir concentrações superiores a 1000 mg/l, que seriam suficientes para desencadear fluxos de densidade. Entretanto, estudos em



plataformas modernas indicam que correntes de densidade não apresentam um papel significativo no transporte de sedimentos para *offshore*, devido principalmente ao baixo ângulo de inclinação do assoalho, que dificulta a formação de fluxos de densidade. Assim, em plataformas atuais, os sedimentos são transportados majoritariamente pela ação de correntes geostróficas com sentido de transporte preferencialmente paralelo à linha de costa (DUKE, 1990).

### 3.2 Turbiditos

Os turbiditos são depósitos siliciclásticos depositados em ambientes de águas profundas que cobrem áreas de milhares de quilômetros quadrados (EINSELE, 1991). O mecanismo responsável por sua formação são as correntes turbidítica, que são fluxos de densidade subaquosos de alta competência e capazes de gerar uma boa segregação das diferentes populações de grãos, produzindo um conjunto característico de fácies (D'AVILA et al., 2008). A estruturação interna dos depósitos turbidíticos depende principalmente da magnitude da corrente turbidítica, do material transportado, da distância da área fonte e da morfologia da bacia (EINSELE, 1991). O acamamento turbidítico clássico é caracterizado pela presença de intercalação de camadas tabulares arenitos e folhelhos em diferentes proporções. As camadas de arenitos apresentam o topo plano e base escavada, além de, *tool marks*, *scour marks*, laminação plana, cruzada, convoluta, *climbing ripple* e estruturas biogênicas (PIRES, 1993). Em várias partes do mundo, os sistemas turbidíticos desempenham um importante papel como rocha reservatório de hidrocarbonetos. No Brasil formam os principais reservatórios siliciclásticos das bacias da Margem Atlântica a exemplo do complexo turbidítico do Campo de Namorado (Albiano-Cenomaniano), rocha reservatório da Bacia de Campos (LIMA, 2003).

#### 3.2.1 Correntes Turbidítica

Correntes turbidíticas são fluxos gravitacionais que atuam em fluidos com diferentes densidades cuja a diferença é gerada entre uma nuvem de sedimentos em suspensão e a massa de água à sua volta. A força de deriva da corrente turbidítica é produto da diferença de densidade, da declividade do assoalho e da espessura da coluna de sedimentos em suspensão (SHANMUGAM, 2001). Sedimentos inconsolidados podem desencadear correntes turbidíticas por uma série de processos, tais como terremotos, erupções vulcânicas, tempestades e

deslizamentos de terra submarinos. No entanto, também podem ser formadas através do aporte direto de sedimentos em suspensão dos sistemas fluviais para bacias receptoras em momentos de grande descarga, por meio de fluxos hiperpicnais (ENSELE, 1991).

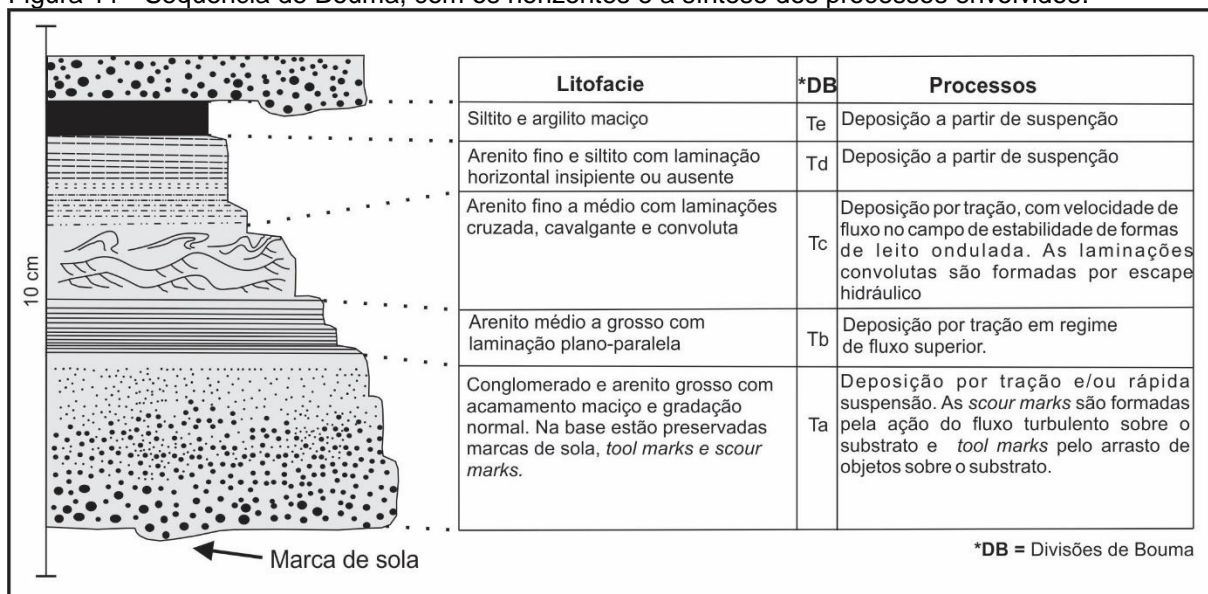
A corrente de turbidítica é definida hidraulicamente como um fluxo bipartido, ou seja, um fluxo caracterizado por uma camada basal granular com comportamento pseudoplástico e uma camada superior mais fina e diluída. Enquanto que na camada basal os sedimentos fluem de maneira aproximadamente linear, na camada superior os sedimentos são transportados em suspensão pelo fluxo turbulento (SHANMUGAM, 2001; Figura 10). Longitudinalmente, o fluxo turbidítico é dividido em três porções com características distintas, a cabeça, o corpo e a calda. A cabeça é a porção frontal do fluxo turbidítico, apresenta a forma lobada com padrão de fluxo circulatório e progradante, que concentra os grãos grossos e tem um alto potencial erosivo. O corpo é a parte central da corrente turbidítica na qual o fluxo é mais uniforme e apresenta espessura aproximadamente constante. A calda representa a parte final mais diluída, onde ocorre um rápido adelgaçamento do fluxo (STOW, 1986).

### 3.2.2 Deposição e sucessão de fácies turbidíticas

A corrente turbidítica é o principal e mais importante mecanismo responsável pela deposição de acamamentos turbidíticos, todavia processos de *slump*, *slides* e fluxo de grãos também estão presentes no registro geológico de turbiditos (STOW, 1986). O modelo ideal para acamamento turbidíticos consiste em uma monótona intercalação de arenitos e folhelhos, por dezenas a centenas de metros, formando camadas com topo plano e base erosiva. As camadas de arenito exibem gradação normal e uma sucessão vertical de estruturas características que consiste em base erosiva com marcas de sola com estrutura maciça, seguida por laminação plano-paralela, ondulada e o topo composto por siltio e argilitos, depositados por decantação. Essas estruturas indicam a desaceleração do fluxo para o topo (PIRES, 1993).



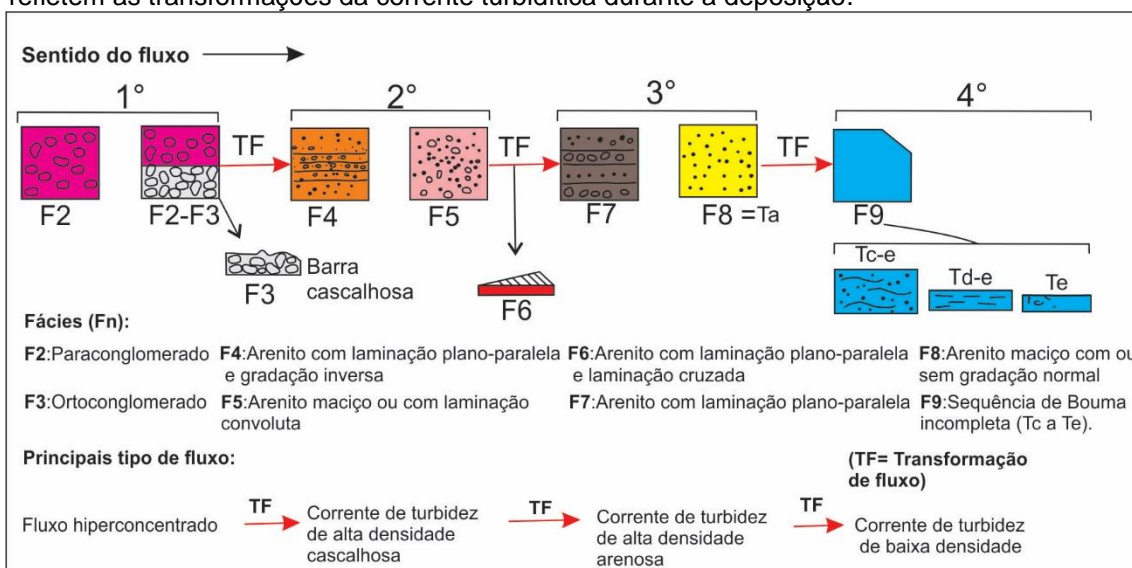
Figura 11 - Sequencia de Bouma, com os horizontes e a síntese dos processos envolvidos.



Fonte: D'Ávila et al. (2008).

A corrente turbidítica seleciona a carga transportada em quatro populações de granulométricas: a primeira (1°) de matações até seixos; a segunda (2°), de seixos a areia grossa; a terceira (3°) de areia média a fina e a quarta (4°) de areia fina a lama. E essas populações são depositadas por ondas de sedimentação a medida que a corrente de turbidítica perde a energia e o poder de transporte (Figura 12).

Figura 12 - Sucessão lateral de fácies em acamamento turbidítico. A ordem de deposição das principais populações granulométricas (1°, 2°, 3° e 4°) com suas respectivas fácies (F2 a F9) que refletem as transformações da corrente turbidítica durante a deposição.



Fonte: Modificada de Mutti et al. (1999) *apud* D'Ávila (2008).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Análise de fácies**

Na análise de fácies de exposições ao longo da rodovia estadual PI-115, na região de Juazeiro do Piauí, foi utilizada a técnica de modelamento de fácies de Walker (1990) e Walker e Plint (1992). Essa técnica consiste na identificação e individualização das fácies sedimentares através da avaliação da geometria externa dos corpos, texturas, estruturas sedimentares, conteúdo fóssilífero e do padrão de paleocorrente. Desta forma, são identificados os processos sedimentares responsáveis pela formação de cada fácies individualmente. Os subambientes são definidos a partir da associação das fácies interpretadas como geneticamente ou ambientalmente relacionadas e auxiliadas por comparações com sistemas atuais e antigos bem estudados. Os resultados são apresentados na forma blocos diagrama que representam o modelo tridimensional das associações de fácies. O código de fácies foi adaptado da proposta de Miall (1977), dessa forma todas as fácies foram representadas por meio de abreviações, em que a primeira letra maiúscula indica a litologia principal e as demais letras, minúsculas, representam a estrutura sedimentar. Em cada uma das unidades foram coletadas amostras orientadas das principais fácies arenosas para análise petrográfica as quais complementarão as descrições faciológicas.

A descrição de fácies, em escala de afloramentos, foi auxiliada com a confecção de perfis colunares e seções panorâmicas, estas últimas obtidas a partir de fotomosaicos. Os fotomosaicos foram elaborados por meio da captura de uma sequência de fotos parcialmente sobrepostas e lateralmente contínuas, tomadas de pontos equidistantes do afloramento e buscando o máximo de paralelismo entre o plano focal da câmera e o plano do afloramento (WIZEVICH, 1991; ARNOT, GOOD e LEWIS, 1997). Os fotomosaicos foram montados e tratados com a utilização do *software* Corel DRAW X7.

### **4.2 Petrografia sedimentar**

Para a análise petrográfica foram confeccionadas quadro lâminas delgadas orientadas e impregnadas com epoxy azul no Laboratório de Laminação da Faculdade de Geologia (FAGEO). A análise e o registro microfotográfico foram

realizados em microscópio petrográfico modelo Zeiss AxioKop 40, com câmera acoplada AxioCam HRc, locado no Laboratório de Petrografia Sedimentar do Grupo de Análise de Bacias Sedimentares da Amazônia (GSED). Por meio da contagem de no mínimo 300 pontos em cada lâmina, foram classificados e quantificados os constituintes primários, diagenéticos, porosidade (CHOQUETTE; PRAY, 1970), bem como foram definidas as classificações das rochas (FOLK, 1974), o grau de seleção e o índice de empacotamento (KAHN, 1956; BEARDY; WEYL, 1973).

## 5 SUCESSÃO SEDIMENTAR DA REGIÃO DE JUAZEIRO DO PIAUÍ (PI), BORDA NORDESTE DA BACIA DO PARNAÍBA.

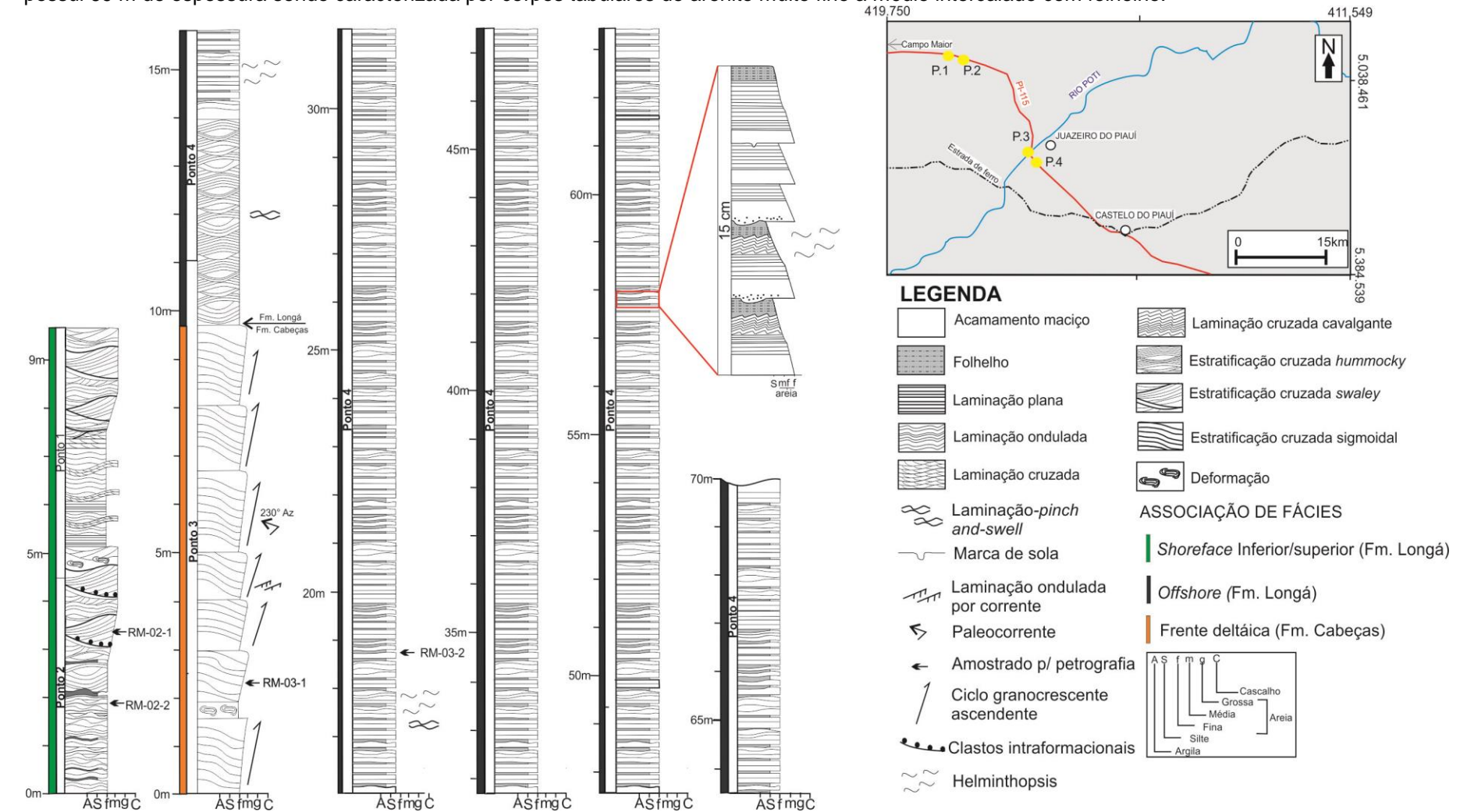
### 5.1 Análise de fácies

#### 5.1.1 Generalidades

A sucessão sedimentar exposta na região de Juazeiro do Piauí foi descrita ao longo da rodovia estadual PI-115 em quatro afloramentos que incluem cortes de estrada, pedreira de exploração de placas de arenito e no leito do rio Poti. Os perfis colunares elaborados apresentam nove metros e 70 metros de espessura, onde a Formação (Fm) Cabeças ocupa 10 metros e a Fm. Longá ocorre com aproximadamente 70 metros (Figura 13). A Formação Cabeças é caracterizada por arenito médio a grosso, de coloração cinza, que ocorre na forma lobos sigmoidais amalgamados. Já a Formação Longá é composta por folhelho e arenito fino a médio, de coloração castanha claro, caracterizada por estratos tabulares a ondulados (Figura 14).

A análise de fácies permitiu a individualização de onze fácies (Tabela 1): folhelho (Fl), siltito maciço (Sm), arenito maciço (Am), arenito com laminação plana (Ap), arenito com laminação ondulada (Ao), arenito com laminação cruzada (Ac), arenito com laminação cruzada cavalgante (Acv), arenito com estratificação cruzada *hummocky* (Ah), arenito com estratificação cruzada *swaley* (Asw), arenito deformado (Ad) e arenito com estratificação cruzada sigmoidal incipiente (Asg). A associação dessas fácies permitiu a caracterização de três subambientes ou associação de fácies (AF): Frente deltaica (AF1) da Formação Cabeças, além de *offshore* (AF2) e *shoreface* (AF3) da Formação Longá, que integram um sistema marinho raso dominado por onda e tempestade.

Figura 13 - Perfil colunar das formações Cabeças e Longá na região de Juazeiro do Piauí, borda nordeste da Bacia do Parnaíba. A Formação Cabeças apresenta 10 m de espessura e é caracterizada por lobos sigmoidais amalgamados de arenito médio a grosso. Já a Formação Longá possui 69 m de espessura sendo caracterizada por corpos tabulares de arenito muito fino a médio intercalado com folhelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 14 - Principais feições das exposições analisadas do Grupo Canindé na região de Juazeiro do Piauí. A- Fotografia aérea com a localização dos pontos 3 e 4 (P3 e P4). Observe que o limite entre as formações Cabeças e Longá é evidenciado pela quebra de relevo (tracejado vermelho) (GOOGLE EARTH, 2015). B- Aspecto geral da Formação Cabeças, composta por arenitos na forma de lobos sigmoidais amalgamados (Ponto 3). C- Aspecto geral da Formação Longá, composta por arenitos com geometria tabular intercalado com folhelhos (Ponto 4).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo

Tabela 1 - Síntese das fácies e processos sedimentares das formações Cabeças e Longá, região de Juazeiro do Piauí.

FÁCIES	Descrição	Processo Sedimentar
Folhelho (Fl)	Lâminas lateralmente descontínuas de folhelho. Ocorrem intercalados com fácies areníticas, apresentam base conformante e topo irregular.	Decantação de argilas em ambiente de baixa energia. A foliação é formada pela organização dos argilominerais depositados paralelamente ao plano de acamamento. A descontinuidade das lâminas e o topo irregular estão associados a erosão por correntes de turbidez e/ou processos de fluidificação.
Siltito maciço (Sm)	Camadas tabulares e onduladas de siltito maciço, com espessura máxima de 15 cm. De forma geral, ocorrem limitando os <i>co-sets</i> do acamamento tempestítico.	A deposição é controlada por processos de decantação de silte em ambientes de baixa energia.
Arenito maciço (Am)	Camada tabulares de arenito muito fino a fino com espessura máxima de 3 cm. Por vezes, apresentam intraclastos de folhelho subangulosos com diâmetro máximo de 0,5 mm. Os limites superior e inferior estão deformados. Ocasionalmente estão presentes traços fósseis epiestratais na forma de tubo meandrante e sem ramificações.	O acamamento maciço foi gerado por rápida deposição por suspensão associado a desaceleração de corrente turbidítica, aliado a ausência de contraste granulométrico. Os intraclastos são produto da erosão e incorporação do material lamoso do substrato. Os limites deformados remetem a processos de fluidificação. Já os traços fósseis são formados pelo retrabalhamento do substrato arenoso por organismos invertebrados detritívoros.
Arenito com laminação plana (Ap)	Camadas tabulares a lenticulares de arenito muito fino a médio com até 50 cm de espessura com laminação plana e <i>sets</i> de até 0,5 cm. Por vezes, os limite dessa fácies são irregulares e deformados.	Migração de lençóis de areia sobre a ação de corrente trativa, em regime de fluxo superior e/ou por fluxo oscilatório de alta frequência. Limites deformados associados a fluidificação.
Arenito com laminação ondulada (Ao)	Corpos ondulados de arenito fino com até 30 cm de espessura. As laminações apresentam cristas simétricas, arredondadas e comprimento de onda máximo de 25 cm e amplitudes inferiores a 2 cm.	Retrabalhamento e agradação de formas de leito arenosas sob a ação de fluxo oscilatório.
Arenito com laminação cruzada (Ac)	Camada de arenito fino a muito fino, com <i>sets</i> lenticulares e espessura de até 6 cm. As laminações cruzadas apresentam ângulos de mergulho entre 35° e 10° e sentidos variados, por vezes opostos.	Migração de forma de leito arenosa (3D) sob a ação de fluxo combinado com predomínio da componente unidirecional.
Arenito com laminação cruzada cavalgante (Acv)	Lentes de arenito fino a muito fino com laminação cruzada cavalgante subcrítica e, espessura entre 0,5 e 1,5 cm. Os limites dessa fácies são irregulares e deformados.	Migração de marca ondulada arenosa por tração, em regime de fluxo inferior, com alto influxo sedimentar. O alto influxo sedimentar permite a migração da forma de leito com preservação do <i>stoss side</i> . Limites deformados associados a fluidificação.
Arenito com estratificação cruzada <i>hummocky</i> (Ah)	Camadas lenticulares a ondulada com espessura entre 0,3 e 2,5 m composta por areia muito fina a fina e bem selecionada com estratificação cruzada <i>hummocky</i> . Internamente apresenta laminação paralela, suavemente inclinada (< 10°), por vezes formando truncamento de baixo ângulo.	Migração de formas de leito arenosas sob a ação de fluxo combinado, predominantemente oscilatório, relacionado a ondas de tempestades. Truncamento de baixo ângulo são produtos da erosão do substrato pela passagem ondas fora de fase.

Tabela 1 - Continuação.

FÁCIES	Descrição	Processo Sedimentar
Arenito com estratificação cruzada <i>swaley</i> (Asw)	Camadas onduladas, com espessura entre 30 e 50 cm, compostas por areia fina a média com estratificação cruzada <i>swaley</i> . Os estratos cruzados apresentam mergulho entre 10° e 15°. Os <i>sets</i> possuem base erosiva, com intraclastos arenosos(?) subarredondados com diâmetro de até 2 cm.	Migração de formas de leito arenosa sob a ação de fluxo combinado influenciado por tempestades. Intraclastos argilosos são produto da erosão e incorporação do substrato.
Arenito com estratificação cruzada sigmoidal incipiente (Asg)	Lobos sigmoidais de arenito médio a grosso com estratificação cruzada sigmoidal incipiente e espessura entre 50 a 150 cm. Localmente, os lobos exibem gradação inversa, com topo destacado por marcas onduladas com crista sinuosa e descontínua.	Geometria relacionada a progradação e agradação de macroformas sigmoidais produzidas pela desaceleração de influxo arenoso, sob a ação de fluxo unidirecional de alta energia e com grande carga de sedimentar. Marcas onduladas formadas pela migração de formas de leito secundárias sobre a macroforma.
Arenito deformado (Ad)	Camadas onduladas e sigmoidais de arenito médio a grosso, com laminação na forma de dobras irregulares e assimétricas.	Fluidificação de sedimentos inconsolidados e saturados em água.

Fonte: Elaborada pelo autor

## 5.1.2 Descrições das fácies

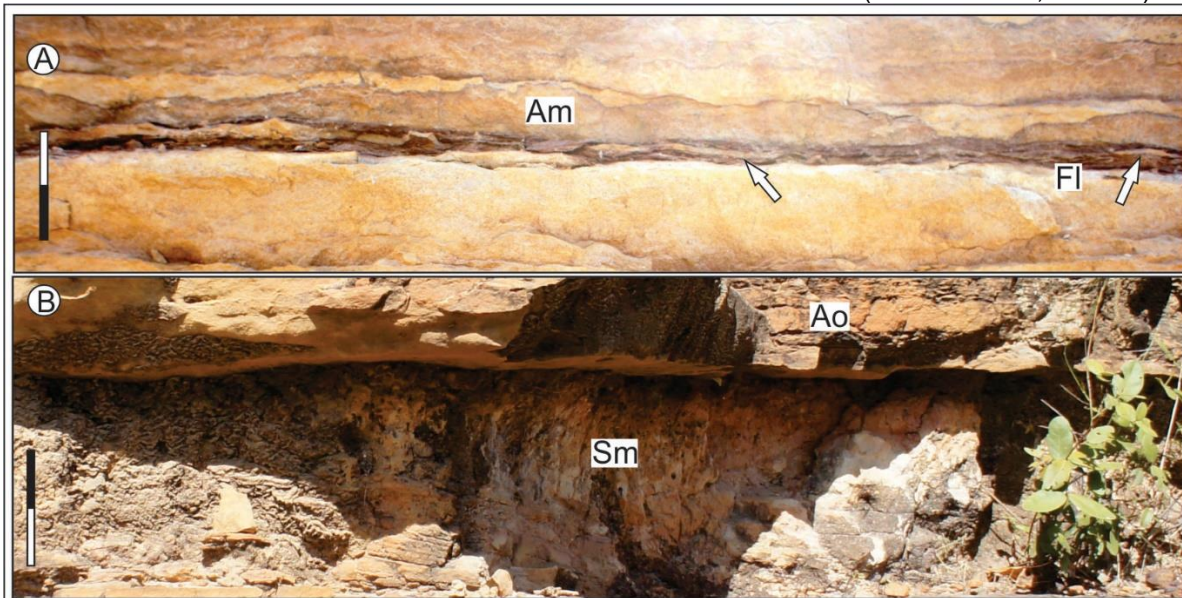
### 5.1.2.1 Folhelho (FI)

A fácies FI é caracterizada por lâminas irregulares e lateralmente descontínuas, com espessura máxima de 0,5 cm (Figura 15 A). De maneira geral, ocorrem intercalados com fácies arenosas, exibem base conformante e topos irregulares. Os planos de foliação da fácies FI apresentam terminações em *on lap* quando em contato com fácies arenosas, no entanto também podem ser encontrados de forma irregular e deformados.

#### *Interpretação*

O folhelho é formado por meio de decantação de material argiloso em ambiente de baixa energia. A laminação plana é produto da orientação preferencial dos sedimentos argilosos, principalmente os filossilicatos, que tendem a se depositar paralelamente ao plano do acamamento (TUKER, 1991). Os topos irregulares e a descontinuidade lateral dessa fácies é resultado de processos erosivos associados a corrente de turbidez (STOW, 1986; ENSELE, 1991). A terminação em *on lap* com fácies arenosas intercaladas, aliada a planos de foliação irregulares coaduna com a interpretação.

Figura 15 - Principais feições das fácies folhelho (Fl), siltito maciço (Sm) e arenito com laminação ondulada (Ao). A-. Laminas descontinuas da fácies Fl, intercalada com camadas tabulares com limites deformados da fácies Am. Notar a presença de lentes de arenito inclusas no plano de foliação da fácies Fl (seta branca; escala: 2,5 cm; Ponto 4). B- Camadas da fácies Sm em contato com a fácies Ao. Observe o contato levemente ondulado entre as fácies (escala: 20 cm; Ponto 2).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

#### 5.1.2.2 Siltito maciço (Sm)

A fácies Sm é caracterizada por corpos ondulados a tabulares, composto por siltito com estrutura maciça e espessura máxima de 15 cm (Figura 15 B). Esta fácies ocorre destacando os *co-sets* das fácies Ah e Asw.

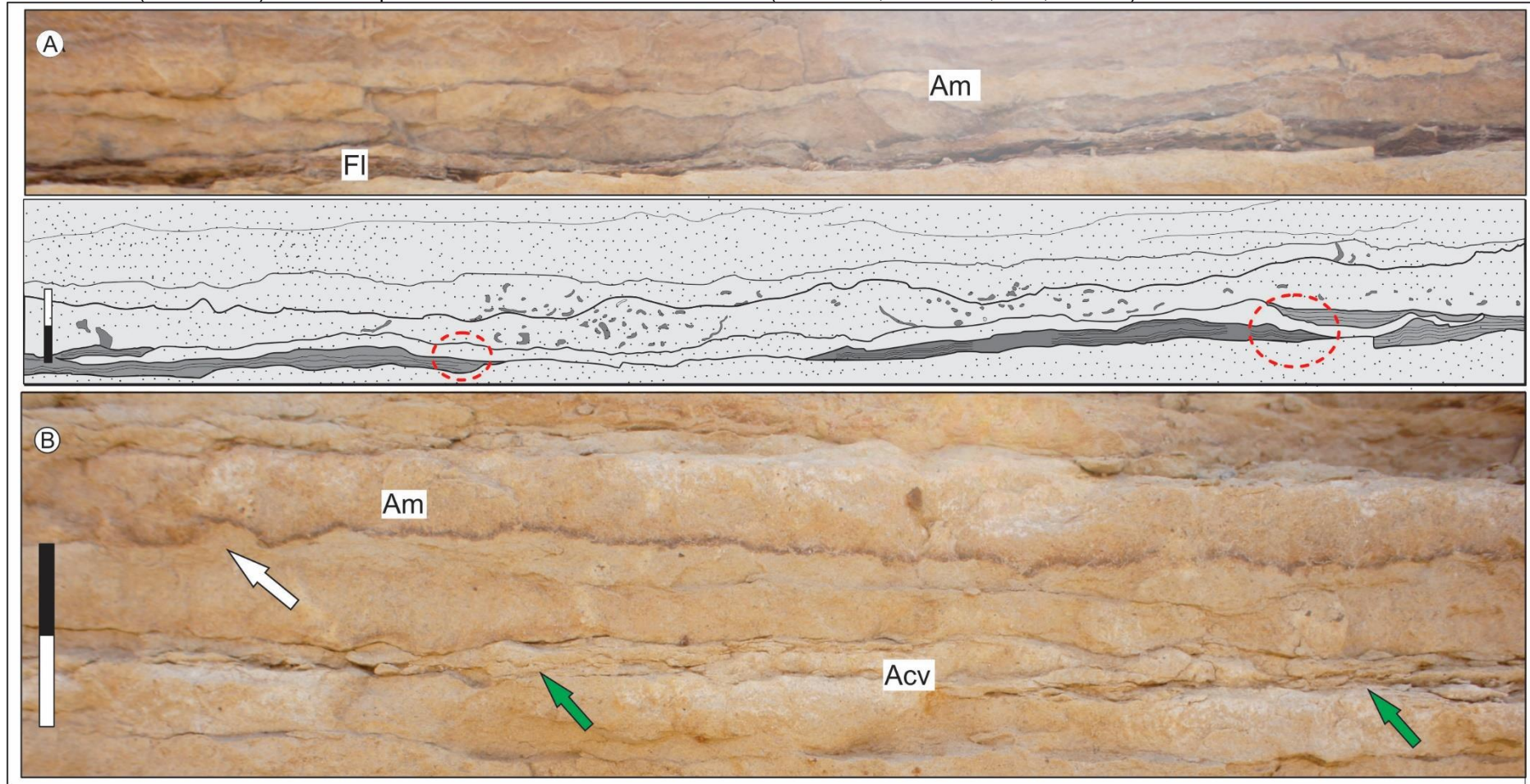
#### *Interpretação*

O processo de formação dessa fácies está relacionado a deposição de silte a partir de processos de suspensão em ambiente de baixa energia. A estrutura maciça foi formada devido a ausência de contraste granulométrico aliada a floculação das argilas durante a deposição, que não permitiu uma orientação preferencial das partículas sedimentares argilosas (TUCKER, 1991).

#### 5.1.2.3 Arenito maciço (Am)

A fácies Am é caracterizada por estratos com geometria tabular, composta por areia muito fina a fina e espessura máxima de 3 cm. Internamente, apresenta estrutura maciça e intraclastos de folhelho subangulosos com diâmetro entre 0,2 e 0,5 cm dispersos de maneira randômica (Figuras 16 A e B). O limite inferior da fácies Am é erosivo, no entanto também são encontrados feições de deformação.

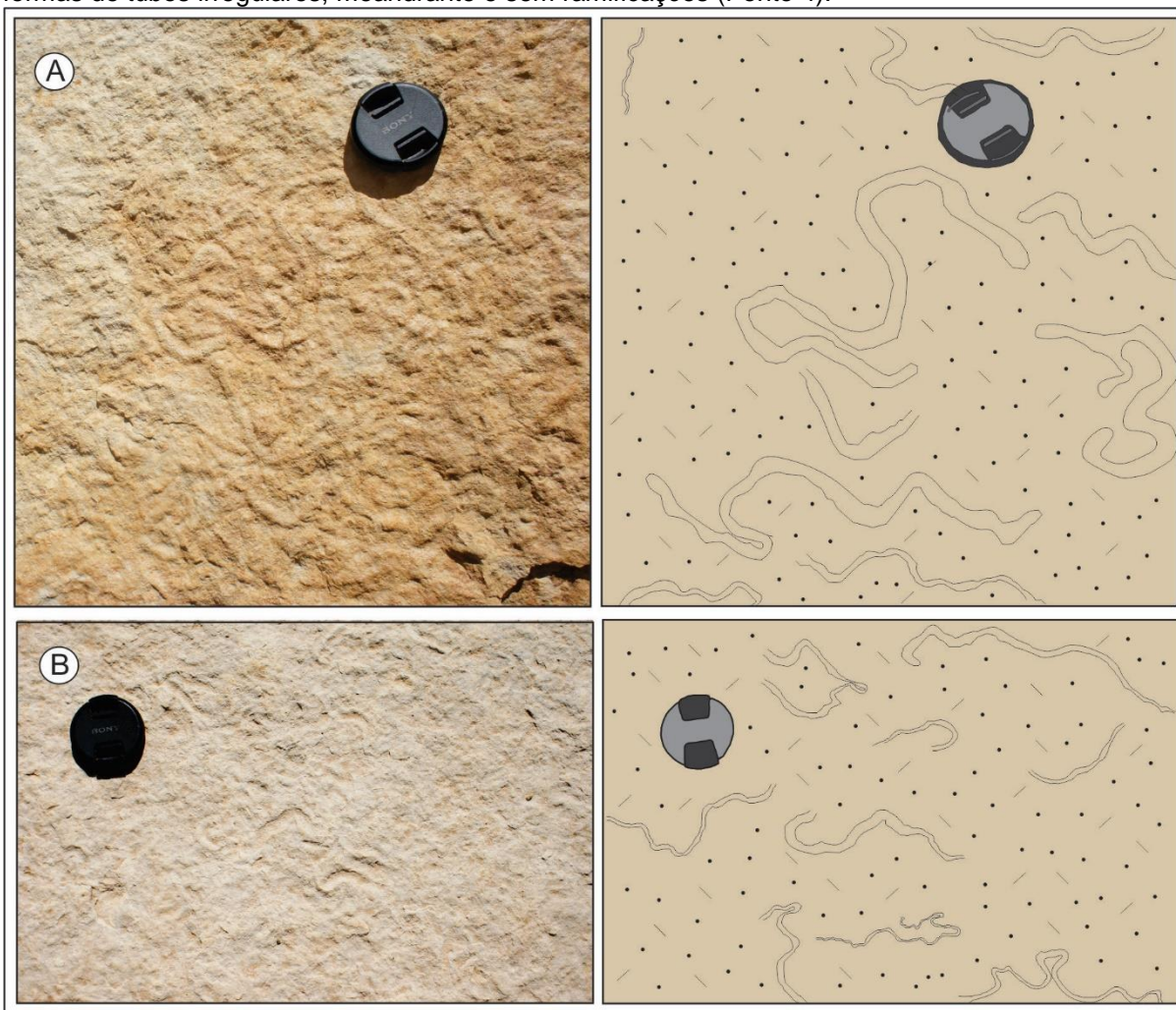
Figura 16 - Camadas tabulares e lenticulares com as fácies folhelho (FI), arenito maciço (Am) e arenito com laminação cruzada cavalgante (Acv). A- Camada com a fácies Am com base irregular e erosiva intercalada com laminais da fácies FI. Observe que os clastos intraformacionais de folhelho ocorrem imersos na fácies Am e que os planos de foliação da fácies FI estão em *on lap* (círculos vermelhos) com lâminas de arenito (Ponto 4). B- Detalhe dos limites deformados da fácies Am (seta branca) destacado pela fácies FI e lentes com a fácies Acv (seta verde; escalas: 2,5 cm; Ponto 4).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

O topo da fácies Am apresentam traços fósseis epiestratais, com formas de tubos irregulares, meandранtes, sem ramificações e diâmetros entre 0,5 e 1,5 cm (Figuras 17 A e B). Essas feições estão preservadas no contato entre as fácies Am e Fl, tanto em epi quanto endo relevo.

Figura 17 - Vista em planta da fácies Am com esboços esquemáticos indicando traços fósseis na formas de tubos irregulares, meandранte e sem ramificações (Ponto 4).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

### *Interpretação*

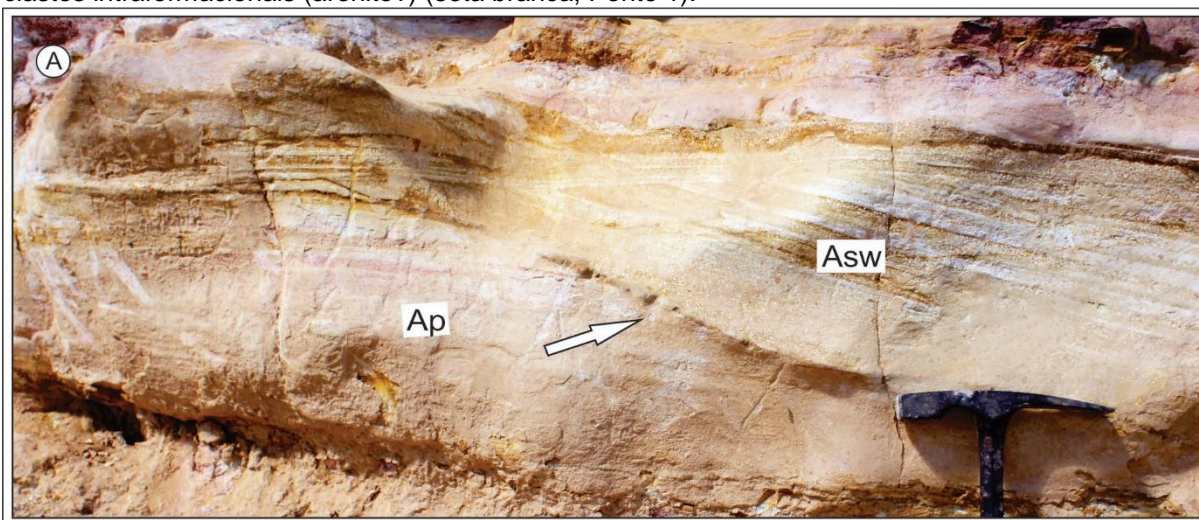
A estrutura maciça foi gerada através da rápida deposição de sedimentos arenosos por suspensão, relacionada a desaceleração de correntes turbidíticas de alta densidade, e/ou por processo pós-deposicionais de fluidificação e liquefação, que destroem as estruturas sedimentares previamente formada (PICKERING, et al., 1986). Os intraclastos de folhelho são produto da erosão e incorporação de material do substrato lamoso (ENSELE, 1991). Limites deformados foram interpretados como estrutura de sobrecarga (marca de sola), formada em sedimentos inconsolidados e

supersaturados em água devido ao contraste vertical de densidade entre camadas de areia depositadas sobre camadas de argila (TUKER, 1991). As características dos traços fósseis descritas foram definidas como icnofósseis de pastagem, relacionada ao icnogenero *Helminthopsis*, produto do retrabalhamento do substrato arenoso por invertebrados marinhos detritívoros a procura de alimentos, que viveram em habitat marinhos profundos (WETZEL; BROMLEY, 2006).

#### 5.1.2.4 Arenito com laminação plana (Ap)

A fácies Ap é constituída por camadas tabulares a lenticulares de arenito muito fino a médio, com espessura entre 5 e 50 cm e sets de até 0,5 cm (Figura 18). A estruturação interna é composta por laminação plana formada pela intercalação entre areia muito fina e média. Por vezes, a fácies Ap ocorre associada com as fácies Asw, Ah e Ao, gradando lateralmente e/ou verticalmente a partir destas e ainda formando terminações em *on lap* com as fácies Asw e Ah.

Figura 18 - Contato erosivo entre as fácies arenito com laminação plana (Ap) e fácies arenito com estratificação cruzada *swaley* (Asw). O contato basal da fácies Asw é caracterizado por ser côncavo, erosivo e assimétrico. Essa geometria é destacada por terminações em *on lap* da fácies Ap, e por clastos intraformacionais (arenito?) (seta branca; Ponto 1).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

#### *Interpretação*

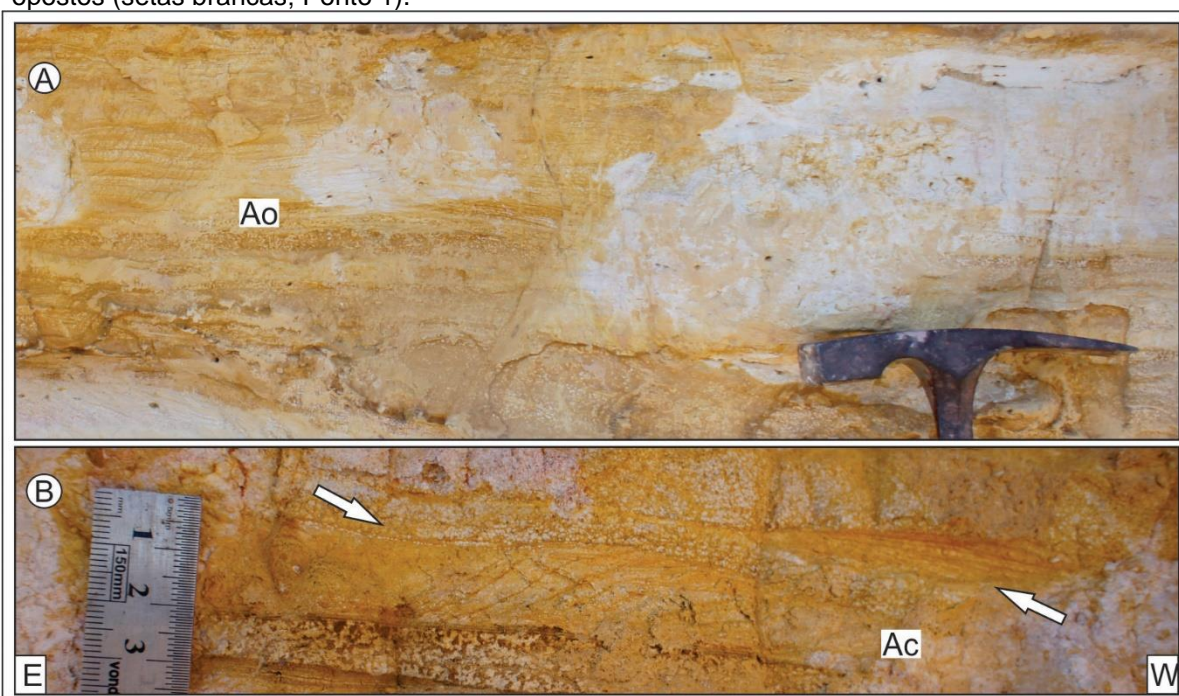
A formação de laminação plana em estratos tabulares é atribuída a migração de formas leito arenosas (lençóis de areia) sob a ação de correntes unidirecionais e em regime de fluxo superior (NICHOLS, 2009). Por outro lado, em camadas lenticulares a laminação plana pode ser gerada por fluxo oscilatório e por fluxo

combinado (ARNOTT; SOUTHARD, 1990; MYROW; SOUTHARD 1996). Em fluxo oscilatório a laminação plana é formada por movimentos orbitais de alta frequência e grande amplitude, enquanto que em regime fluxo combinado são produto de situações em que a componente oscilatória apresenta alta velocidade orbital e a componente unidirecional exibe velocidade de moderada a alta (WALKER; PLINT, 1992; DUMAS; ARNOT, GOOD e LEWIS, 1997; Figura 9).

#### 5.1.2.5 Arenito com laminação ondulada (Ao)

A fácies Ao é caracterizada por corpos com geometria ondulada composta por arenito muito fino a fino com espessura máxima de 30 cm (Figura 19 A). Internamente apresentam laminações onduladas com crista simétricas, arredondadas e flancos com mergulho inferior a  $10^\circ$ . As ondulações exibem comprimento de onda entre 25 cm e 15 cm e amplitudes inferiores a 2 cm.

Figura 19 - Forma de ocorrência das fácies arenito com laminação ondulada (Ao) e arenito com laminação cruzada (Ac). A- Laminações onduladas com cristas simétricas, e flancos com baixo ângulo de mergulho ( $>10^\circ$ ), da fácies Ao (Ponto 1). B- Sets aproximadamente lenticulares, com base ondulada, da fácies Ac, apresentando laminações cruzadas com mergulhos em sentidos opostos (setas brancas; Ponto 1).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.



### *Interpretação*

Laminações onduladas com perfil simétrico, crista arredondadas e baixos ângulos de mergulhos dos flancos são características morfológicas de formas de leito relacionadas a ação de fluxo oscilatório (BASILICI, LUCA e POIRE, 2012). O fluxo oscilatório é produzido pela ação do vento na superfície da água que gera um padrão circular de movimentação nas partículas de água. Em águas rasas, o movimento oscilatório pode interagir com o substrato arenoso inconsolidado, retrabalhando os sedimentos e produzindo laminações onduladas (TUCKER, 1991).

#### 5.1.2.6 Arenito com laminação cruzada (Ac)

A fácies Ac é caracterizada por camadas onduladas composta por areia muito fina a fina, com espessura entre 3 e 6 cm. Internamente fácies Ac apresenta *sets* lenticulares, com o topo convexo, base ondulada e irregular. As laminações cruzadas apresentam mergulho entre 10° e 35°, com sentidos variados, por vezes opostos (Figura 19 B).

### *Interpretação*

As laminações cruzadas com *sets* com lenticulares, base ondulada e irregular, e laminações mergulhando com sentidos variados, são características relacionadas a migração de formas de leito arenosas em 3D, sob a ação de fluxo combinado de baixa energia e com o predomínio da componente unidirecional (ARNOTT; SOUTHARD, 1990; Figura 9). As condições do fluxo combinado variam amplamente durante a tempestade tanto em sentido quanto em velocidade das componentes unidirecional e oscilatória, produzindo uma distribuição randômica nos sentidos e ângulos de mergulho dos *sets* de laminação cruzada (MYROW; SOUTHARD, 1996). A formação de laminações cruzadas de pequeno porte por fluxo combinado, esta associado ao declínio da energia nos momentos finais do evento de tempestade (JOHNSON; BALDWIN, 1986).

#### 5.1.2.7 Arenito com laminação cruzada cavalgante (Acv)

A fácies Acv é composta por lentes restritas lateralmente de arenito muito fino a fino com laminação cruzada cavalgante supercrítica com até 1 cm de espessura

(Figura 16 B). Ocasionalmente, a fácies Acv apresenta limites irregulares e deformados.

#### *Interpretação*

A laminação cruzada cavalgante supercrítica é formada pela migração de marcas onduladas arenosas por tração, em regime de fluxo inferior, associada ao influxo de sedimentos por suspensão, que produz uma componente de agradação vertical. A relação entre a taxa de migração (tração) e a taxa de agradação (suspensão) determina o grau de preservação da forma de leito. Nesse sentido, a formação fácies Acv supercrítica esta associada a altas taxas de agradação que permitiram a migração da marca ondulada com a preservação do *stoss side* (TUKER, 1991; NICHOLS, 2009).

#### 5.1.2.8 Arenito com estratificação cruzada *hummocky* (Ah)

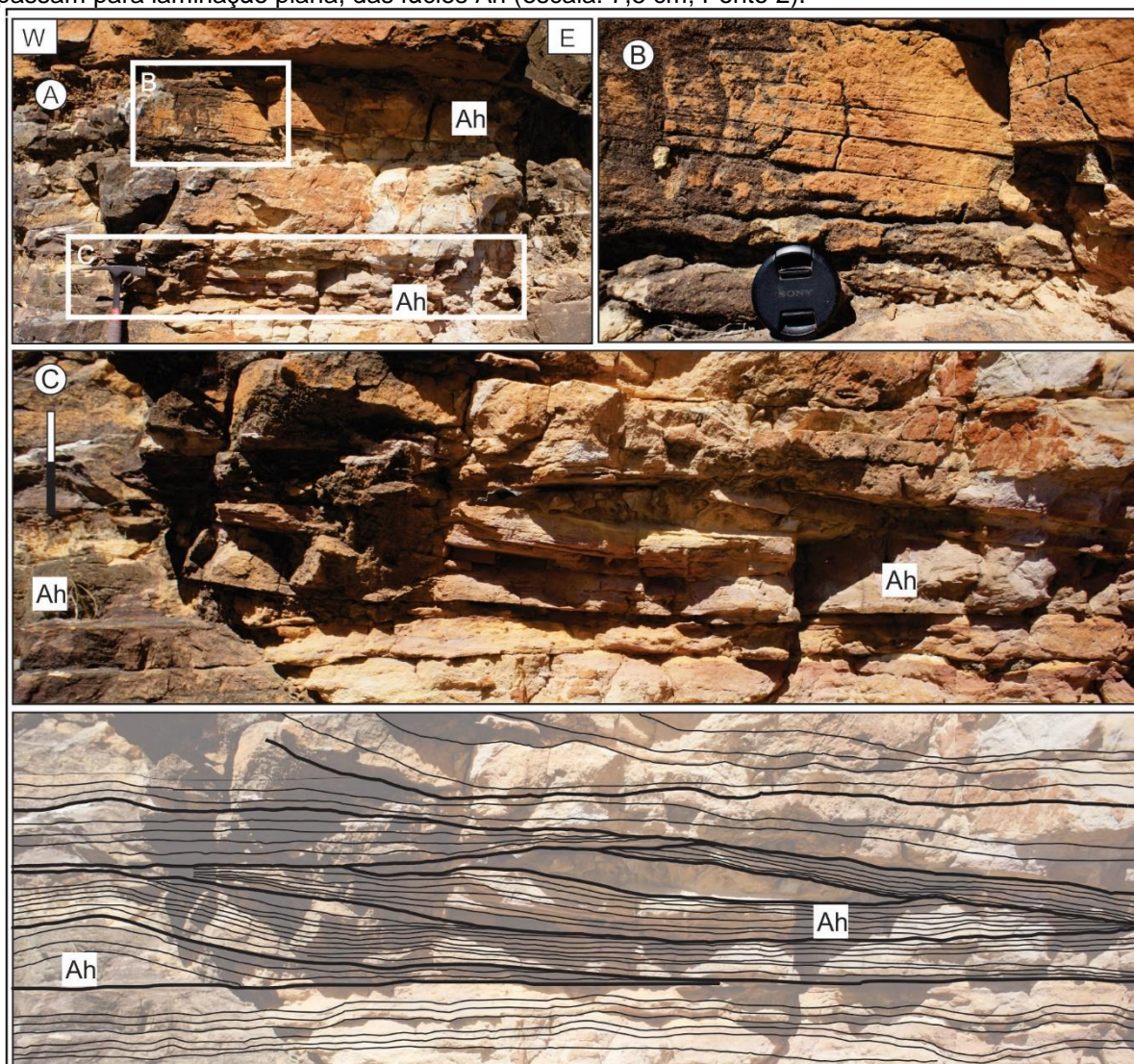
Essa fácies é caracterizada por corpos com geometria lenticular a ondulada, composta de arenito muito fino a fino bem selecionado e com espessuras entre 0,3 m a 2,5 m (Figuras 20 A a C). A fácies Ah exhibe base erosiva e côncava, com predomínio de formas assimétricas, por vezes formando truncamentos de baixo ângulo, enquanto o topo apresenta o perfil convexo para cima. Ocasionalmente, as camadas da fácies Ah desenvolvem espessamento e adelgaçamento lateral (*pinch-and-swell*). As laminações internas apresentam ângulos de inclinação menores que 10°, são organizadas paralelamente ao topo e base do acamamento e lateralmente passam para laminação ondulada a plana.

#### *Interpretação*

O processo de formação de estratificação cruzada *hummocky* esta relacionado a ação de fluxo combinado (fluxo oscilatório + fluxo unidirecional), gerado pela ação de tempestades. A atuação de tempestades produzem poderosas correntes de fundo (fluxo unidirecional) e ondas com grande amplitude (fluxo oscilatório). Desse modo, passam a retrabalhar juntos os sedimentos depositados sobre a plataforma em profundidades superiores ao nível de base das ondas de tempo normal. A formação de Ah é favorecida por fluxo combinado predominantemente

oscilatório (componente oscilatória >> componente unidirecional) e por alta taxa de agredação que preservam a geometria monticulada da estrutura (DUMAS; ARNOTT, 2006). O adelgaçamento a espessamento lateral na espessura das camadas é produto da variação nas condições do fluxo combinado durante a atuação da tempestade.

Figura 20 - Principais características da fácies arenito com estratificação cruzada *hummocky* (Ah). **A-** Corpos de arenito amalgamados com forma aproximadamente lenticular das fácies Ah (Ponto 2). **B-** Detalhe da foto A, indicando o truncamento em baixo ângulo das laminações internas e ainda o adelgaçamento e espessamento lateral das laminações, na parte inferior da foto a acima da escala (Ponto 2). **C-** Detalhe da foto A com esboço esquemático. Camada com forma lenticular, apresentando o topo convexo e base côncava da fácies Ah. O esboço esquemático evidencia os *sets* com base erosiva, compostos por laminações paralelas, suavemente inclinadas e que lateralmente passam para laminação plana, das fácies Ah (escala: 7,5 cm; Ponto 2).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

#### 5.1.2.9 Arenito com estratificação cruzada *swaley* (Asw)

A fácies Asw é caracterizada por camadas onduladas de arenito fino a médio, com espessura entre 0,5 a 1,5 m (Figuras 17). Esta fácies é caracterizada por

apresentar base erosiva côncava e assimétrica, por vezes destacada por clastos intraformacionais de arenito (?) subarredondados com diâmetro máximo de 2 cm. Já o topo do acamamento é concordante, plano ou levemente ondulado. Internamente as laminações ocorrem inclinadas com ângulos em torno de 15°, gradando lateral e verticalmente para laminação plana a ondulada.

#### *Interpretação*

A formação da estratificação cruzada *swaley* é atribuída a atuação de fluxo combinado gerado pela ação de ondas de tempestades, tal como a estratificação cruzada *hummocky* (Ah). Porém, a ocorrência de estratificação cruzada *swaley* está associada a zonas com lâmina d'água mais rasas onde a componente unidirecional do fluxo combinado é mais atuante. Desta forma, não ocorre a agradação vertical da forma de leito preservando apenas a escavação (DUMAS; ARNOTT, 2006).

#### 5.1.2.10 Arenito com estratificação cruzada sigmoidal incipiente (Asg)

A fácies é caracterizada por estratos na forma de lobos amalgamados de arenito médio a grosso, com estratificação cruzada sigmoidal incipiente e espessura entre 0,5 e 1,5 m (Figura 21 A e B). Os lobos sigmoidais exibem gradação inversa e limites deformados. As laminações internas acompanham a geometria externa do corpo e tendem a horizontalidade nos *toe sets*. Além disso, no topo dos lobos estão preservadas marcas onduladas com cristas sinuosas e descontínuas com paleofluxo orientado para 234°Az (Figura 21 C).

#### *Interpretação*

Formas de leito sigmoidais são formadas por correntes unidirecionais com alta carga sedimentar em suspensão que desaguam em uma bacia de receptação com baixa energia (ELLIOTT, 1986). A preservação da geometria sigmoidal está relacionada a processo de progradação aliada a uma componente de agradação que permite a preservação da base e topo da macroforma arenosas (BHATTACHARYA; BHATTACHARYA, 2005). A gradação inversa coaduna com a progradação dos lobos sigmoidais. Deformação nos limites dos lobos remete a processos de fluidificação em sedimentos inconsolidados e supersaturados em água, favorecido por anisotropias primárias da rocha (TUCKER, 1991). A presença de marcas

onduladas 3D no topo dos lobos é atribuída a migração de formas de leito parasíticas sob fluxo unidirecional e regime de fluxo inferior (ELLIOTT, 1986).

Figura 21 - Camadas sigmoidais da fácies arenito com estratificação cruzada sigmoidal incipiente (Asg). **A-** Seção longitudinal de lobos sigmoidais amalgamados com laminações que acompanham a geometria externa do corpo e tendem a horizontalidade no sentido do *toe set* (Ponto 3). **B-** Lobo sigmoidal apresentado a base deformada (linha pontilhada; Ponto 3). **C-** Vista em planta de marcas onduladas com cristas assimétricas, sinuosas e descontinuas no topo do lobo sigmoidal (Ponto 3).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

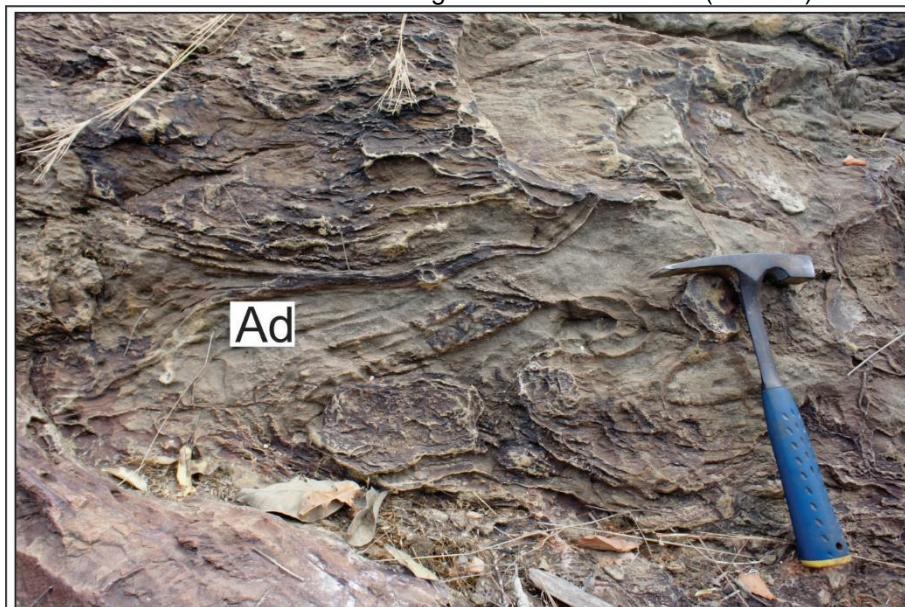
#### 5.1.2.11 Arenito deformado (Ad)

A fácies Ad é caracterizada por camadas restritas lateralmente, com geometria lenticular e sigmoidal, composta de arenito médio a grosso (Figura 22). As laminações internas são contorcidas e formam dobras irregulares e assimétricas.

#### *Interpretação*

As laminações convolutas são formadas por altas taxa de sedimentação associada a liquefação diferencial e escape hidráulico em sedimentos inconsolidados e saturados em água. Desta forma, o escape hidráulico fomenta fluxos interestratais que deformam as estruturas previamente formadas (TUKER, 1991).

Figura 22 - Arenito deformado (fácies Ad) apresentando laminações contorcidas na forma de dobras irregulares e assimétricas (Ponto 3).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

## 5.2 Textura e caracterização dos constituintes detríticos, diagenéticos e poros.

Para a análise petrográfica foram coletadas uma amostra da Formação Cabeças (fácies Asg) e três amostras da Formação Longá (Am, Ao e Asw), descritas a seguir (Figura 13; Tabela 2).

### 5.2.1 Formação Cabeças

A fácies Asg apresenta granulometria areia média a grossa, bem selecionada, com grãos predominantemente subarredondados e foi classificada como quartzarenito (FOLK, 1974). De forma geral, o arcabouço é sustentado por grãos com contatos intergranulares predominantemente do tipo pontual (Figura 23 A).

A composição detrítica é representada por quartzo monocristalino com extinção ondulante fraca (54,89%) e, de maneira subordinada, quartzo policristalino (1,45%). Grãos de feldspato potássico (3,21%) ocorrem intensamente dissolvidos e com feições de substituição para argilominerais indiferenciáveis. O zircão é o único representante de minerais pesados e ocorre na proporção de 1,82% do volume total da rocha.

Tabela 2 - Constituintes detríticos, diagenéticos e poros dos arenitos das formações Cabeças e Longá.

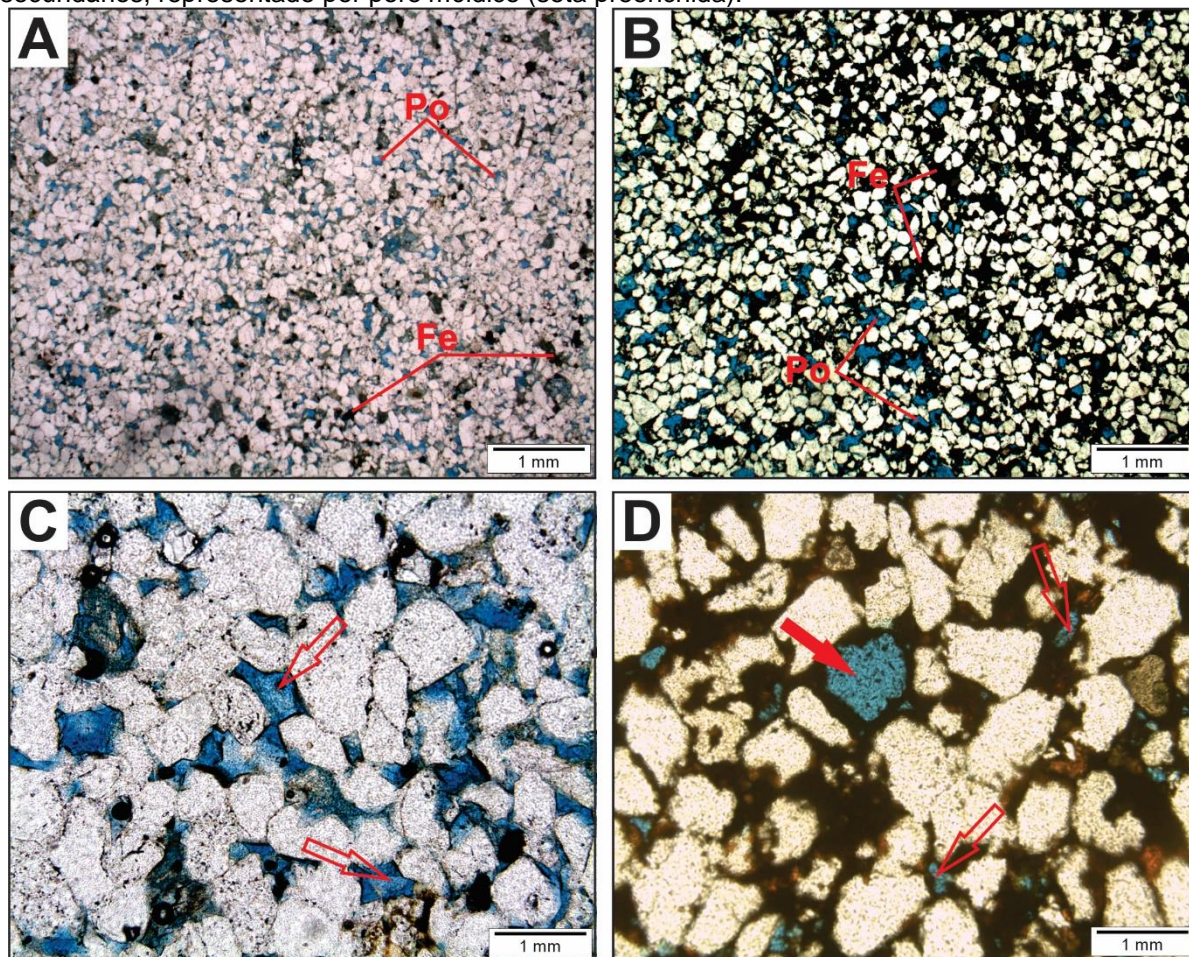
	Formação Longá				Formação Cabeças
	Asw (RM -02-1)	Ao (RM-02-2)	Am (RM-03-2)	média	As(RM-03-1)
<b>Constituintes Detríticos (%)</b>					
Quartzo monocristalino					
extinção ondulante fraca	54.15	49.06	54.54	<b>52.58</b>	54.89
extinção ondulante forte	*	*	*		12.67
Quartzo policristalino					
planar	*	1.13	0.31	<b>0.48</b>	1.45
Feldspato					
feldspato potássio indiferenciado	15.77	15.94	14.73	<b>15.48</b>	3.21
plagioclásio	*	*	5.64	<b>1.88</b>	
Micas					
muscovita	0.3	*	1.12	<b>0.47</b>	*
clorita	*	*	0.31	<b>0.10</b>	*
Minerais Pesados					
zircão	1.54	0.62	1.03	<b>1.06</b>	1,82
turmalina	1.23	*	0.61	<b>0.61</b>	*
titanita	*	*	1.25	<b>0.42</b>	0.63
anfیبólio	*	*	0.51	<b>0.17</b>	*
Mineral autigênico					
glaconita	*	0.94	*	<b>0.31</b>	*
<b>constituintes detríticos totais</b>	<b>72.99</b>	<b>67.69</b>	<b>80.05</b>	<b>73.58</b>	<b>72.85</b>
<b>Constituintes Diagenéticos (%)</b>					
Óxido/hidróxido de ferro					
maciço	8.92	12.13	5.96	<b>9.00</b>	2.04
botroidal	2.15	2.47	2.19	<b>2.27</b>	1.32
substituição de const. primário indiferenciado	*	*	0.63	<b>0.21</b>	0.80
Argila autigenica					
recristalização de feldspato	*	0.64	0.32	<b>0.32</b>	3.22
<b>total de constituintes diagenéticos</b>	<b>11.07</b>	<b>15.24</b>	<b>9.10</b>	<b>11.59</b>	<b>7.38</b>
<b>Porosidade (%)</b>					
Primária					
intergranular	9.54	4.68	4.52	<b>6.25</b>	12.79
<b>Total de porosidade primária</b>	<b>9.54</b>	<b>4.68</b>	<b>4.52</b>	<b>6.25</b>	<b>12.79</b>
Secundária					
intergranular em feldspato indiferenciado	6.24	8.12	4.70	<b>6.35</b>	5.63
moldica	0.92	4.44	1.69	<b>2.35</b>	1.33
<b>Total de porosidade secundária</b>	<b>7.16</b>	<b>12.56</b>	<b>6.27</b>	<b>8.66</b>	<b>6.96</b>
<b>Total de Porosidade</b>	<b>16.7</b>	<b>17.24</b>	<b>10.79</b>	<b>14.91</b>	<b>19.75</b>
<b>Total de pontos contados</b>	<b>325</b>	<b>315</b>	<b>319</b>		<b>302</b>
Volume de Grãos (%)	72.99	67.99	80.05	<b>73.68</b>	72,85
Volume intragranular (%)	27.77	31.84	19.44	<b>26.35</b>	23.65
Grau de empacotamento	45	28	38	<b>37</b>	34
Seleção	bem selecionada	bem selecionada	bem selecionada		moderadamente selecionada
Aredondamento	sub-arredondado	sub-arredondado	sub-anguloso		subanguloso
Classificação (Folk 1974)	subarcóseo	subarcóseo	subarcóseo		quartzo-arenito

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os componentes diagenéticos são caracterizados por cimento de óxido/hidróxido de ferro e por argilas autigênicas indiferenciadas (3,22%) formadas a partir da alteração do feldspato potássico. O cimento de óxido/hidróxido de ferro ocorre com os seguintes hábitos cristalinos: maciço (2,04%), preenchendo total ou parcialmente os poros; botroidal (1,32%), formando aglomerados de cristais nas bordas dos grãos do arcabouço e; substituindo parcialmente ou completamente os grãos detríticos (0,80%). O sistema de poros na fácies Asg é representado por poros primários e secundários. A porosidade primária é do tipo intergranular (12,79%) com diâmetros entre 0,6 e 1,2 mm (Figura 23 C). Já porosidade secundária

é representada por poros intragranulares (5,63%) e móldicos (1,33%), o último em especial, formado pela dissolução total de grãos de feldspato potássico.

Figura 23 - Microfotografias das formações Cabeças e Longá. **A** e **B**- Aspectos texturais e composição do arcabouço com a indicação do cimento de oxido/hidróxido de Ferro (Fe) e dos poros (Po) das formações Cabeças e Longá, respectivamente. **C**- Sistema de poros da Formação Cabeças caracterizado principalmente por poros primários do tipo intergranular (setas vazadas). **D**- Sistema de poros da Formação Longá apresentando poros do tipo primários intergranular (setas vazadas) e secundários, representado por poro móldico (seta preenchida).



Fonte: Microfotografia tirada pelo autor.

### 5.2.2 Formação Longá

Os arenitos Longá apresentam a granulometria fina a média, com grãos subangulosos a subarredondados e foram classificados como subarcóseos (FOLK, 1974). O arcabouço da rocha é sustentado por grãos e os contatos intergranulares são predominantemente pontuais (Figura 23 B).

A composição detrítica é representada majoritariamente por grãos de quartzo e feldspato. O principal tipo de quartzo é o monocristalino com extinção ondulante fraca (valores médios de 52,58%) e de maneira subordinada o policristalino com



valores médios de 0,48%. Os grãos de feldspato são representados pelo tipo potássico (média de 15,48%) e por plagioclásio (média de 1,88%), ambos com feições de substituição para argilominerais indiferenciáveis. A assembleia de minerais pesados é constituída por grãos de zircão (1,06%), turmalina (0,61%), titanita (0,42%), anfibólio (0,17%) e glauconita (0,31%).

Os constituintes diagenéticos estão representados por cimento de óxido/hidróxido de ferro e argilas autigênicas. O cimento de óxido/hidróxido de ferro é o principal constituinte diagenético e ocorre com os seguintes hábitos cristalinos: maciço (média de 9,00%), obliterando parcial ou totalmente os poros primários e secundários e; botroidal (média de 2,27%), formando uma película nas bordas dos grãos do arcabouço. As argilas autigênicas indiferenciadas (média de 0,32%) são geradas a partir da substituição parcial de grãos de feldspatos potássico e plagioclásios.

O sistema de poros consiste de poros primários e secundários. A porosidade primária é do tipo intergranular, ocorre com a proporção média de 6,20% e exibe diâmetro máximo de 3 mm (Figura 23 D). A porosidade secundária é representada por poros intragranulares e móldicos. O tipo intragranular (média de 6,35%) foi formado pela dissolução parcial de grãos de feldspato potássio e de plagioclásio, enquanto que o tipo móldico (média de 2,35%) foi resultado da dissolução total de grãos de feldspato e indiferenciáveis.

### 5.3 Associação de fácies

As fácies descritas foram agrupadas em três associações de fácies (AF), que representam os subambientes: frente deltaica (AF1) da Formação Cabeças, além de *shoreface* (AF2) e *offshore* (AF3) da Formação Longá. As associações de fácies e os respectivos subambiente estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Associação de fácies das formações Cabeças e Longá na região de Juazeiro do Piauí.

FÁCIES	ASSOCIAÇÃO	SUBAMBIENTE	SISTEMA DEPOSICIONAL	UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA
Asg, Ad e Am	AF1	Frente deltaica	Deltaico	Formação Cabeças
Ao, Ap, Ac, Ah, Asw e Ad	AF2	<i>Shoreface</i>	Plataformal	Formação Longá
Fl, Am, Ap, Acv, Ah e Asw	AF3	<i>Offshore</i>		

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.3.1 Associação de fácies AF1- Frente deltaica

A AF1 é representada por lobos sigmoidais amalgamados de arenito fino a médio, com espessura de até dez metros e que afloram no ponto 3 (Figura 13; Tabela 3). Os lobos são estruturados internamente com as fácies Asg, Ad e Am que estão organizados em ciclos granocrescente ascendente com até 1,5 m. O limites dos lobos são destacados pela fácies Ad, no entanto em porções não deformadas ocorrem marcas onduladas com cristas sinuosas e descontínuas (Figuras 14 B, 21 e 22).

#### *Interpretação*

A presença de corpos de arenitos com geometria sigmoidal, com tendência granocrescente ascendente e compostos pelas fácies Asg são produto da progradação e agradação de macroformas arenosas em bacias receptoras de baixa energia, transportadas por correntes unidirecionais trativas (paleocorrente para 234° Az) com alta carga de sedimentos em suspensão (BHATTACHARYA, 2006). O acamamento maciço (fácies Ad) e deformações nos limites dos lobos (fácies Ad) estão relacionados ao processo de fluidificação de sedimentos inconsolidados e saturados em água e coadunam com o elevado influxo de sedimentos (NICHOLS, 2009). Por sua vez, marcas onduladas no topo dos lobos atestam para migração de formas de leito 3D parasíticas sobre a macroforma sigmoidal.

As características da AF1 são compatíveis com a progradação de lobos sigmoidais deltaicos formados em desembocadura de sistemas fluviais por rápida desaceleração do influxo sedimentar. Nesse sentido, o processo de descanalização fluvial produz espessos pacotes arenosos através da amalgamação de corpos sigmoidais multilobados (BHATTACHARYA, 2006). Apesar do retrabalhamento de sedimentos de frente deltaica por processos baciais ser comum, não foram constatados feições relacionadas a onda e maré nos lobos sigmoidais, o que pode indicar que os processos construtivos da frente deltaica (sistema fluvial) eram superiores aos processos destrutivos (GANI; BHATTACHARYA, 2007; CORRAL, POCIANO e DELLA FAVERA, 2009).

### 5.3.2 Associação de Fácies AF2- *Shoreface*

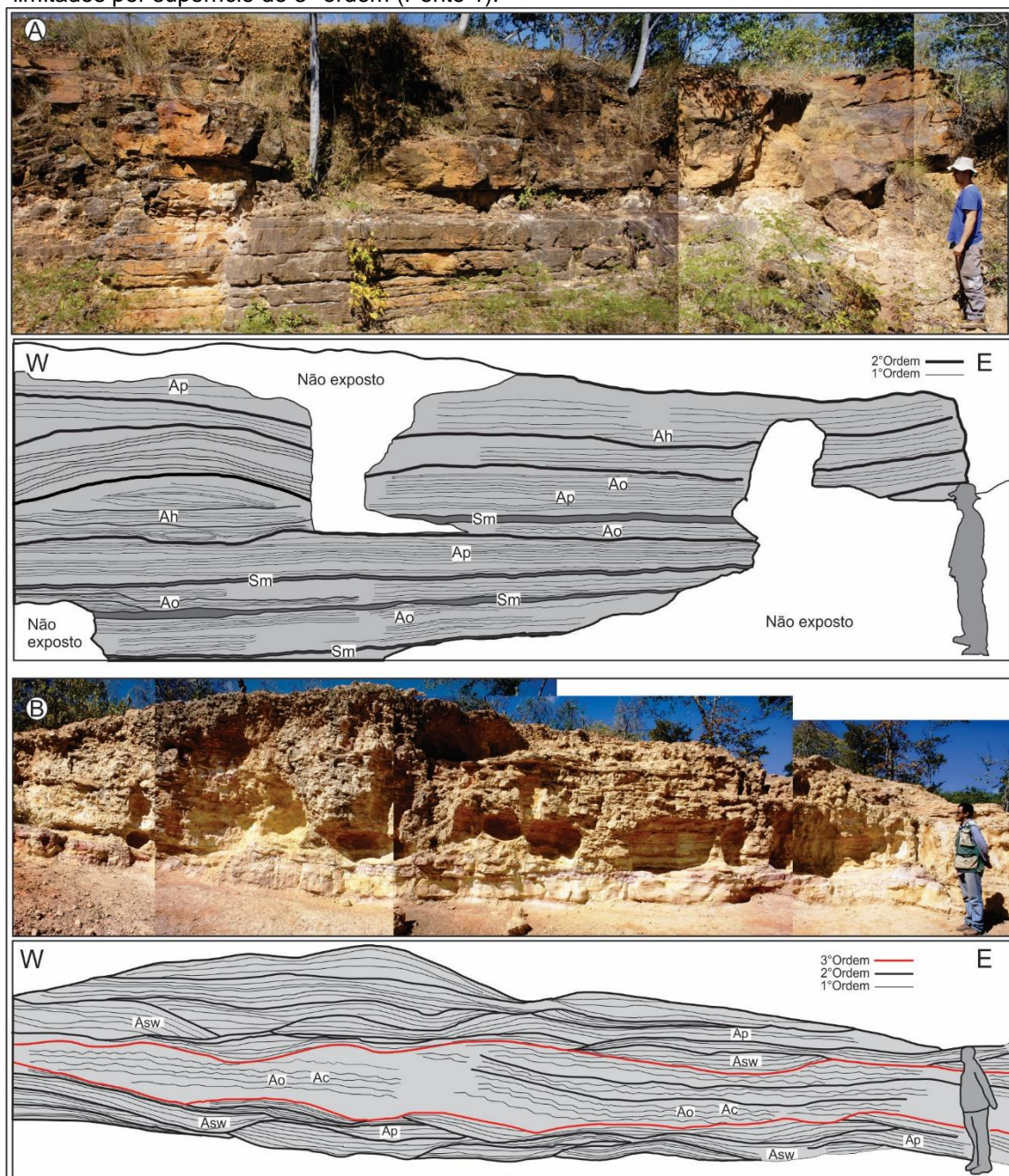
A AF2 é caracterizada por corpos com geometria ondulada com espessura de até nove metros e que afloram nos pontos 1 e 2 (Figura 13; Tabela 3). Os corpos ondulados de arenito são limitados por superfícies de 3º ordem ou por camadas da fácies Sm. As camadas de arenito são internamente estruturadas com a fácies Ah que lateralmente passam para acamamento plano (fácies Ap) a ondulado (fácies Ao; Figura 24 A). Em direção ao topo, ocorre o adelgaçamento da fácies Sm e nos corpos de arenitos feições de escavação (fácies Asw) são as mais predominantes, a última em especial, com limites destacados por deformações da fácies Ad. Por vezes, no limite superior das fácies de arenito estão preservados laminações cruzadas da fácies Ac (Figura 24 B).

#### *Interpretação*

A associação das fácies Ap, Ah, Asw, Ao e Ac são típicas de depósitos de tempestades formados sobre a ação de fluxo combinado (BHATTACHARYA; BHATTACHARYA, 2005). O ambiente *shoreface* está localizado acima do nível de base das ondas de tempo normal, desta forma a distribuição das fácies é controlada pela dinâmica das ondas de tempo normal e pela passagem de tempestades (MYROW; SOUTHARD, 1996).

Em períodos normais a amplitude das ondas é pequena e as correntes de fundo são fracas ou ausentes. A movimentação de sedimentos arenosos é restrita as porções mais rasas da plataforma e nas porções mais profunda a sedimentação é controlada por decantação de sedimentos finos (fácies Sm). Próximo ao limite de base das ondas de tempo normal, os sedimentos são retrabalhados por movimentos orbitais simétricos, gerando laminações onduladas simétricas (fácies Ao). Em direção a costa, o movimento orbital das ondas desenvolve uma assimetria e produzem laminação ondulada e cruzada (fácies Ac) (DUKE, ARNOTT e CHELL, 1991; DUMAS; ARNOTT, 2006).

Figura 24 - Geometria deposicional do *shoreface* (AF2) **A**- Porção basal da AF2 composta por corpos ondulados arenito com as fácies Ah, Ao e Ap, intercalados com camadas descontínuas da fácies Sm (Ponto 2). **B**- Porção superior da AF2, os corpos ondulados passam a ser constituídos exclusivamente por arenito com contatos erosivos côncavos e assimétricos da fácies Asw que lateralmente passa para a fáies Ap. Observe que os corpos ondulados são limitados por superfície de 3º ordem (Ponto 1).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

Em eventos de tempestade, a maior velocidade do vento induz o aumento da amplitude das ondas e a elevação do *setup* costeiro, produzindo movimentos orbitais maiores e poderosas correntes de fundo (DUMAS; ARNOTT, 2006). Desta forma, os sedimentos da plataforma passam a ser retrabalhados por fluxo combinado. Nas regiões próximas ao nível de base de onda de tempestade os sedimentos arenosos

formam a fácies Ah através do fluxo combinado predominantemente oscilatório e associado a alta taxa de agitação (DUMAS; ARNOTT, 2006). No sentido da costa, a componente unidirecional do fluxo combinado torna-se mais poderosa, o que favorece a formação das fácies Asw e Ap, nas porções mais rasas do *shoreface* (ARNOTT; SOUTHARD, 1990). Desta forma, a AF2 foi interpretada como um subambiente de *shoreface* de uma plataforma marinha rasa dominada por onda de tempo normal e tempestade.

### 5.3.3 Associação de fácies AF3- *Offshore*

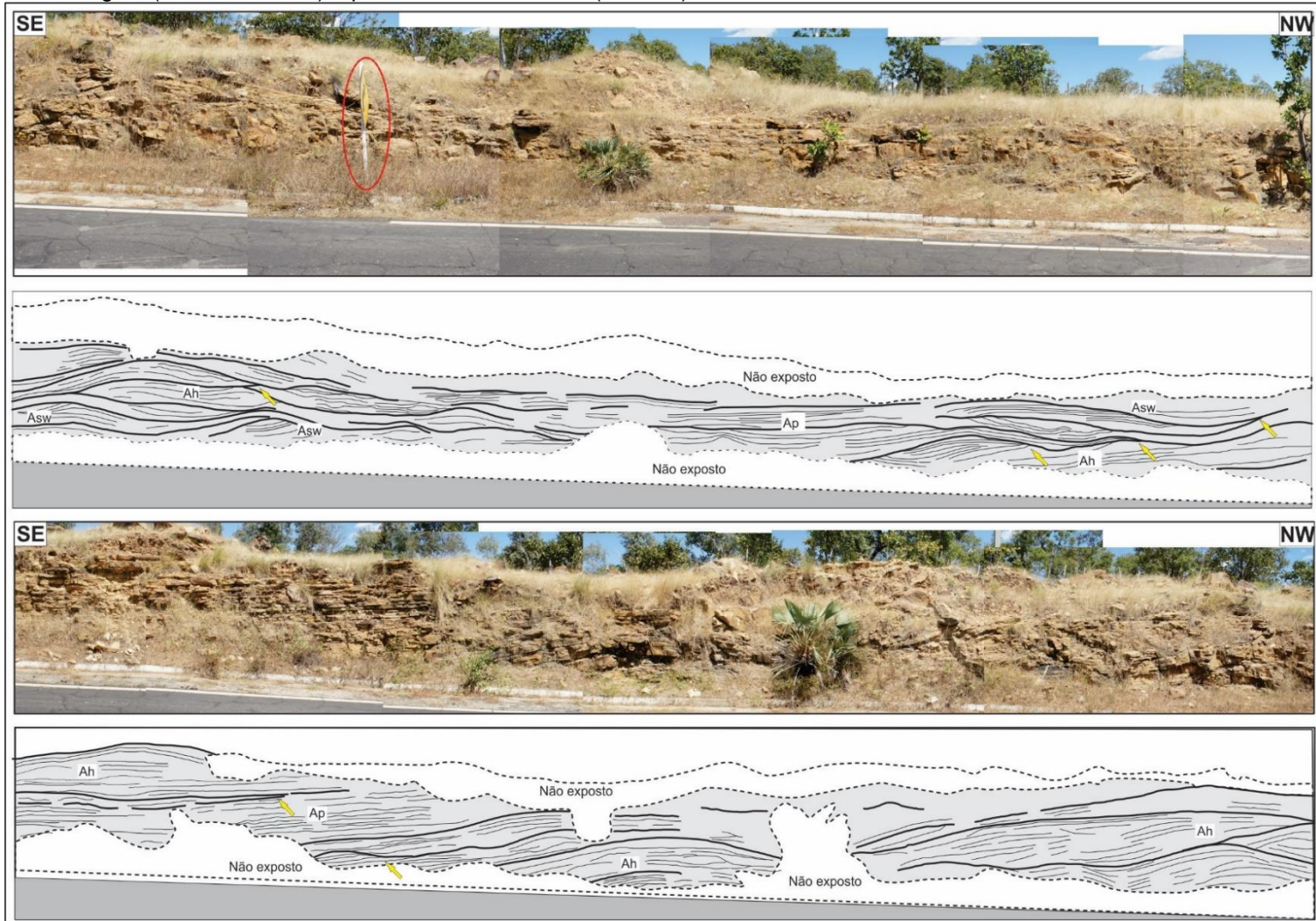
A AF3 é constituída por estratos ondulados e tabulares de folhelho e arenito muito fino a fino, com espessura de até 60 metros e que afloram nos pontos 3 e 4 (Figura 13; Tabela 3). Os corpos ondulados constituem a base da AF3, exibem espessura máxima de 5 metros, comprimento de onda da ordem de dezenas de metros e amplitudes superiores a 3 metros, internamente estruturados com as fácies Ap, Ac, Ah e Asw (Figura 25). Localmente, as camadas onduladas apresentam adelgaçamento e espessamento lateral (acamamento *pinch-and-swell*), além disso o limite basal dos *sets* são erosivos, com terminações em *on lap* que podem desenvolver truncamento de baixo ângulo.

Os corpos tabulares da AF3 formam exposições lateralmente contínuas por centenas de metros, com até 55 metros de espessura e internamente compostos pelas fácies Fl, Am, Ap e Acv (Figura 26). Os corpos tabulares são caracterizados por um empilhamento de estratos cíclicos que apresenta a base erosiva com a fácies Am, sobreposta pelas fácies Ap, Acv e Fl. De forma geral, o contato entre as fácies são irregulares e os ciclos são aproximadamente simétricos, com espessura média de 2 cm, no entanto raramente ocorrem completos. No topo dos ciclos eventualmente estão preservados trações fósseis epiestratais relacionados ao icnogeno *Helminthopsis*.

#### *Interpretação*

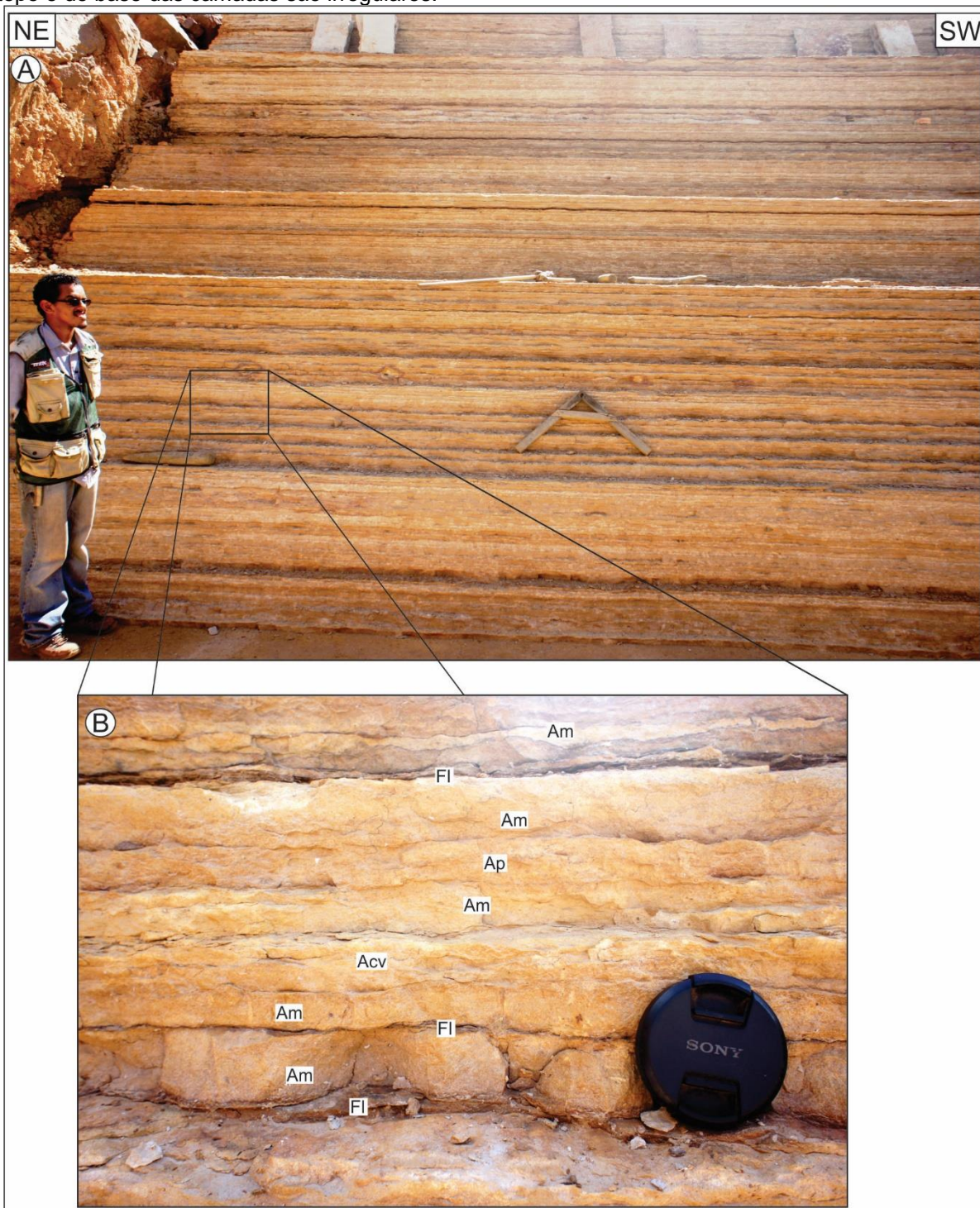
A deposição no *offshore* é controlada essencialmente por decantação de sedimentos finos a partir de suspensão todavia, sedimentos arenoso podem ser transportados para esse ambiente por eventos de tempestades e por correntes turbidíticas (WALKER; PLINT, 1992).

Figura 25 - Geometria deposicional da AF3. Corpos de arenito com acamamento ondulado internamente estruturado com as fácies Ah, Asw e Ap. O contato entre as fácies é erosivo na forma de escavações côncavas, assimétricas, com truncamento em baixo ângulo (setas amarelas) e por vezes concordante (Ponto 3).



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

Figura 26 - Depósito turbidítico da AF3. A- Camadas tabulares, lateralmente contínuas de arenito intercalado com folhelho (Ponto 4). B- Detalhe para a estruturação interna das camadas de arenito composta pelas fácies Am, Ap, Acv e limitadas por laminas descontinuas de folhelhos. Os contatos de topo e de base das camadas são irregulares.



Fonte: Fotografia tirada durante o trabalho de campo.

Em eventos de tempestade são geradas poderosas correntes de fundo e ondas de grande amplitude que passam a fomentar o fluxo combinado (fluxo

unidirecional + fluxo oscilatório), transportando sedimentos arenosos para *offshore*. As condições do fluxo combinado variam amplamente durante a tempestade a medida que as velocidades das componentes unidirecionais e oscilatórias vão se alterando. Assim, a interação entre o fluxo unidirecional e oscilatório formam um complexo padrão de inter-relação entre as fácies Ah, Asw e Ap (MYROW; SOUTHARD, 1996). Nos momentos finais da tempestade ocorre a diminuição na energia do fluxo combinado gerando laminações cruzadas de pequeno porte da fácies Ac no topo das macroformas onduladas (ARNOTT; SOUTHARD, 1990).

Nas camadas tabulares a sucessão interna das fácies indica deposição de sedimentos arenosos por desaceleração de correntes unidirecionais (fácies Am, Ap, Acv), que culminam com a deposição de argila por suspensão (fácies FI). Essa sucessão de fácies pode ser correlacionada com os horizontes Ta a Td da sequência da Bouma (1962) e com as fácies F8 e F9 do modelo de Mutti et al. (1999 apud D'AVILA, 2008) para turbiditos.

Os turbiditos são formados por correntes de densidade (corrente turbidítica) caracterizado por ser um fluxo bipartido. Ou seja, na base os sedimentos mais grossos são transportados por um fluxo aproximadamente linear, enquanto que no topo os sedimentos mais finos são transportados em suspensão por um fluxo turbulento (SHANMUGAM, 2001). A deposição dos sedimentos ocorre de maneira contínua a medida que a corrente perde energia e o poder de transporte, produzindo uma sucessão vertical de estruturas atestam a desaceleração do fluxo. Desta forma, cada ciclo é formado por um único evento de resedimentação por corrente turbidítica (STOW, 1986).

A presença de folhelho e de traços fósseis representam respectivamente a retomada das condições normais de sedimentação e o retrabalhamento do assoalho arenoso/argiloso por invertebrados marinhos, após o término da corrente turbidítica. Os limites deformados entre as camadas estão relacionados ao reajuste plástico pós-deposicional de sedimentos inconsolidados saturados em água (WALKER; PLINT, 1992).

Turbiditos plataformais ocorrem com geometria de *fan deltas* formados em momentos de grande descarga dos sistemas fluviais ou devido a ação de tempestades (MUTTI, et al., 1999; LAMB et al., 2008). A associação entre os corpos



tabulares interpretados como de origem turbidítica e estratos ondulados gerados a correntes de tempestades sugerem que os turbiditos podem ter sido desencadeados por eventos de tempestades. A semelhança textural com os sedimentos da AF2 (areias subarcoseanas) coaduna com essa interpretação. A atuação de tempestades sobre a plataforma disponibiliza uma grande quantidade de sedimentos em suspensão que ficam concentrados na base da coluna d'água. Desta forma, valores de concentração de sedimentos em torno de 10g/l já seriam suficientes para gerar correntes turbidíticas, definidas como *wave-modified turbidity currents* (MYROW; SOUTHARD, 1996). Espessos pacotes de arenito com gradação normal e com a sequência de Bouma incompleta podem ser depositados em *offshore* por sucessivos eventos de tempestades (WALKER; PLINT, 1992; MYROW et al., 2002; LAMB et al., 2008).

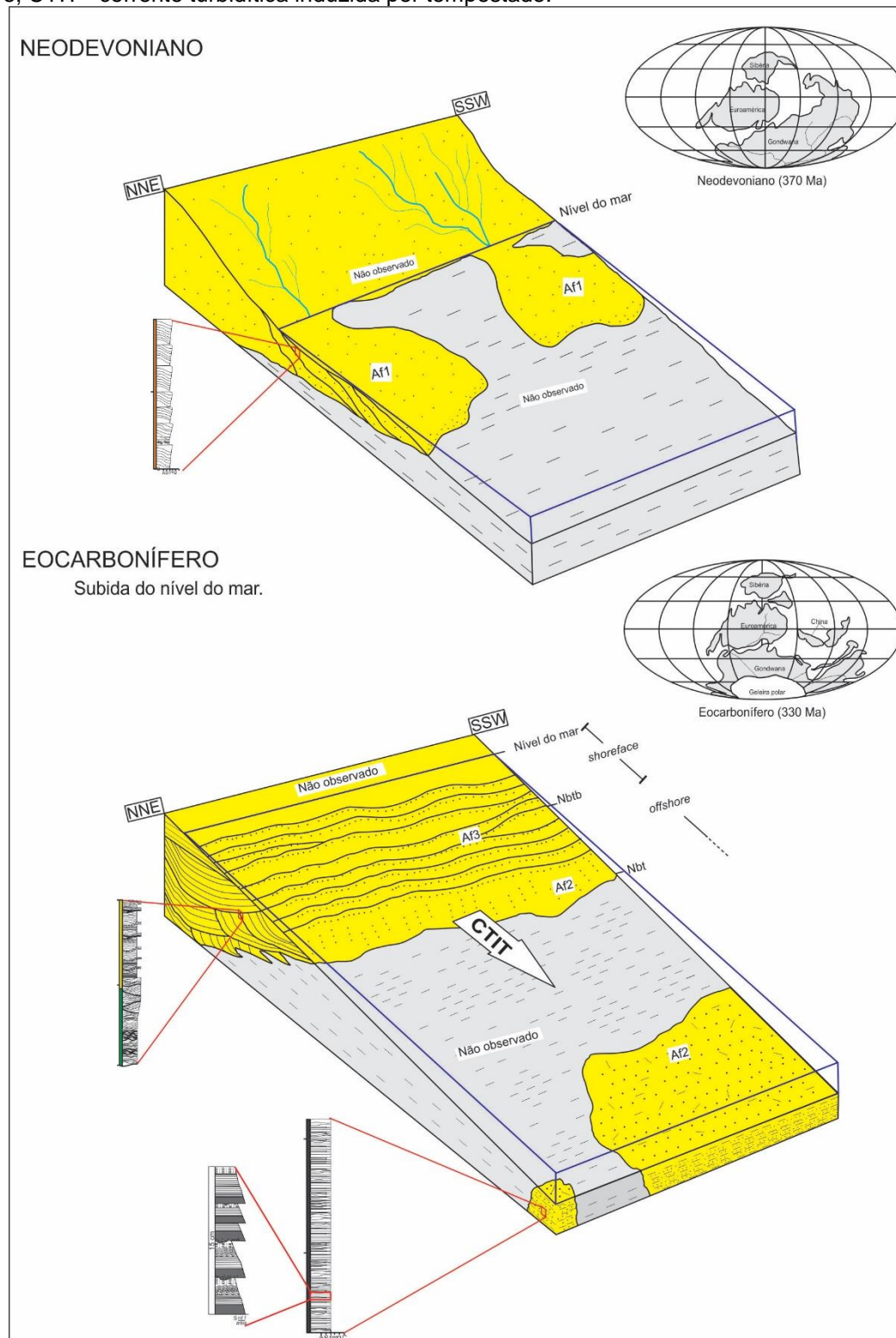
Assim, a AF3 foi interpretada como depositada em ambiente *offshore* por eventos episódicos de tempestades, sob a ação de fluxo combinado e por correntes turbidíticas induzidas por tempestades (*wave-modified turbidity currents*).

#### **5.4 Modelo deposicional**

A sucessão sedimentar da região de Juazeiro do Piauí é testemunha da evolução neodevoniana-eocarbonífera da Bacia do Parnaíba. A análise faciológica permitiu a definição de três subambientes, frente deltaica (AF1), *shoreface* (AF2) e *offshore* (AF3), que atestam a transição de um sistema deltaico no topo da Formação Cabeças para um sistema marinho plataformal dominado por ondas de tempo bom e tempestades na Formação Longá (Figura 27).

O final do Devoniano é marcado pela deposição de espessos pacotes areníticos, formados pela progradação do delta Cabeças para SW. A formação de lobos sigmoidais amalgamados com gradação inversa (AF1) é produto da rápida desaceleração do fluxo formada nas desembocaduras dos sistemas fluviais (BHATTACHARYA, 2006). A ausência de feições de remobilização de sedimentos arenosos por processos baciais (onda e maré) sugerem que o delta Cabeças era dominado por processos de construção fluvial (deltas dominados por rios).

Figura 27 – Modelo deposicional da sucessão Neodevôniana–Eocarbonífera na região de Juazeiro do Piauí. No Neodevôniano foi implantado o sistema deltaico (AF1) na borda nordeste da Bacia do Parnaíba que prograda para SW. No Eocarbonífero ocorre uma elevação do nível do mar e a implantação de um sistema plataforma dominado por ondas de tempo bom e tempestades. A alta energia deposicional da plataforma fomentava a geração de correntes turbidíticas que transportavam sedimentos arenosos para *offshore* (Nbtb= nível de base de onda de tempo bom; Nbt= nível de base de onda de tempestade e; CTIT= corrente turbidítica induzida por tempestade).



Fonte: Adaptado de Torsvik e Cocks (2011).

No Eocarbonífero ocorre o aumento do nível do mar local, associado a mudança de condições glaciais para pós-glaciais na bacia e a uma tendência global de elevação do nível do mar (JOHNSON; KLAPPER; SANDBERG, 1985; BARBOSA, 2014). Nesse sentido, a elevação do nível de mar local resultou no afogamento e remobilização dos sedimentos arenosos do sistema deltaico da Formação Cabeças e implantação de um sistema plataformal dominado por ondas de tempo bom e tempestades (AF2 e AF3) na base da Formação Longá. Desta forma, a sedimentação passa a ser controlada essencialmente por fluxo oscilatório e por fluxo combinado. Adicionalmente, a elevada energia da plataforma fomentava a remobilização de sedimentos para *offshore* por correntes turbidíticas (*wave-modified turbidity currents*).

Apesar da região de *offshore* ser caracterizada pelo predomínio de sedimentos argilosos, a quantidade “anormal” de areia na AF3 foi resultado de eventos episódicos de alta energia (tempestades) nas porções mais rasas da plataforma que depositaram grandes quantidades de sedimentos arenosos em direção ao *offshore* através de correntes de turbidez. A presença de lâminas de folhelho, de traços fósseis atribuídos ao icnogênero *Helminthopsis* e do acamamento turbidítico atestam a ambiência profunda do depósito.

## 6 CONCLUSÃO

A análise faciológica e estratigráfica em exposição com aproximadamente 80 m de espessura das formações Cabeças e Longá na região de Juazeiro do Piauí (PI), possibilitaram a individualização de 11 fácies sedimentares agrupadas em 3 associações de fácies (AF), que incluem: (AF1) – frente deltaica; (AF2) – *shoreface* e; (AF3) – *offshore*. As AF identificadas registram mudanças nas condições de sedimentação de uma frente deltaica (AF1) da Formação Cabeças que evoluiu para uma plataforma dominada por onda de tempo bom e tempestade (AF2 e AF3) da Formação Longá em função de condições pós-glaciais e elevação do nível de mar local.

O sistema deltaico (AF1) representa depósitos do topo da Formação Cabeças que era suprido por áreas-fonte situados a NE da região estudada. O predomínio de lobos sigmoidais com ausência de feições relacionadas a ondas e marés associados sugerem que o sistema deltaico era dominado por processos construtivos fluviais. Petrograficamente as rochas da AF1 foram classificados como quartzo-arenitos, com volume de poros na ordem de 19,75 %.

A AF2 e a AF3 ocupam a base da Formação Longá e foram depositadas em um sistema marinho plataformal dominado por ondas de tempo bom e tempestades. A AF2 representa a porção rasa da plataforma, próximo ao limite de base das ondas de tempo normal, enquanto que a AF3 representa a porção mais profunda da plataforma, abaixo do nível de base das ondas de tempestades. Petrograficamente as rochas da AF2 e da AF3 foram classificadas como subarcóseos, com volume médio de poros na ordem de 14,91 %.

Este trabalho descreve, pela primeira vez, fácies sedimentares associadas a depósitos turbidíticos na Formação Longá. Esse fato levanta a possibilidade de um intervalo poroso na rocha selante do sistema petrolífero Mesodevoniano-Eocarbonífero da Bacia do Parnaíba, que pode funcionar como um reservatório secundário. Desta forma, essas conclusões fomentam a necessidade de realização de estudos petrofísicos mais refinados nos depósitos turbidíticos, no sentido de testar a potencialidade desta rocha como um possível reservatório secundário do sistema petrolífero.

## REFERENCIAS

- ABELHA, M. **Rodada de licitações de petróleo e gás**. 12. 2013. Disponível em: <[http://www.brazil-rounds.gov.br/arquivos/Seminarios\\_R12/apresentacao/r12\\_04\\_parnaiba.pdf](http://www.brazil-rounds.gov.br/arquivos/Seminarios_R12/apresentacao/r12_04_parnaiba.pdf)>. Acesso em 11 mai. 2014.
- ABRANTES, F. R.; NOGUEIRA, A. C. R. Reconstituição paleoambiental das formações Mutuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do estado do Maranhão, Brasil. **Geologia USP série Científica**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 65-82. 2013.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados In: \_\_\_\_\_. **Geologia da Plataforma Sul Americana evolução da obra de Fernando Marques de Almeida**. Local: Beca, 2004, p. 43-45.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, .A. Brazilian structural provinces: na introduction. **Earth Sci.Rev.**, v. 17, p. 1-29. 1981.
- ANDRADE, L. S. **Fácies e estratigrafia da porção superior da Formação Pedra de Fogo, Permiano da Bacia do Parnaíba, região de Filadélfia – TO**. 2012. 87f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2012.
- ARNOT, M. J.; GOOD, T. R.; LEWIS J. J. M. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale outcrop data. **Journal of Sedimentary Resouce**, v. 67, n. 5, p. 984-987, 1997.
- ARNOTT, R. W.; SOUTHARD, J. B. Exploratory flow-duct experiments on combined flow bed configuration, and some considerations for interpreting storm event stratification. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 60, n. 2, p. 211- 219, 1990.
- BARBOSA, R. C. M. **Paleoambiente e proveniência da Formação Cabeças da Bacia do Parnaíba**: evidências da glaciação famenniana e implicações na potencialidade do reservatório. 2014. 124f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2014.
- BASILICI, G.; LUCA, P. H. V.; POIRÉ, D. G. Hummocky cross-stratification-like structures and combined-flow ripples in the Punta Negra Formation (Lower-Middle Devonian, Argentine Precordillera): a turbiditic deep-water or storm dominated prodelta inner-shelf system?. **Sedimentary Geology**., v. 267-268, p. 73-92, Ago. 2012.
- BEARDY, D. C.; WEYL, P.K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. **AAPG Bulletin**, n. 57, p. 349-369, 1973.
- BHATTACHARYA, H. N.; BHATTACHARYA, B. Storm event beds in paleoproterozoic rift basin, Aravalli supergroup, Rajasthan, India. **Gondwana Research**, v. 8, n.2, p. 231-239, 2005.

BHATTACHARYA, J. P. Deltas. In: POSAMENTIER, H. W., WALKER, R. G. **Facies models revisited**. Local: Tulsa, Oklahoma, U.S.A *SEPM (Society for Sedimentary Geology)*, 2006. p 237 – 293

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. PREFÁCIO. In: \_\_\_\_\_. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, v. I, 2003. p. 227-334.

BOUMA, A.H. **Sedimentology of some flysch deposits**. Amsterdam: Elsevier, 1962.168p.

CAPUTO, M. V.; MELO, J. H .G.; STREEL, M.; ISBELL, J. L. Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America. **The Geological Society of America**. Special Paper, n. 441, p.1-13, 2008.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology, and paleogeography of Northern basins of Brazil**. 1984. 583 f. Tese (Doutorado) - University of California, Santa Barbara, 1984.

CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L, C. Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG Bull.**, v. 54, n. 2, p.207-250, 1970.

CORRAL, L.; PONCIANO, M.O.; DELLA FÁVERA, J. C. Flood-dominated fluvio-deltaic system: a new depositional model for the Devonian Cabeças Formation, Parnaíba Basin, Piauí, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v. 81, n. 4, p. 769-780, 2009.

D'ÁVILA, R.S.F.; AREIENTI, L. M.; VESELY, F. F.; ARAGÃO, M. A. N. F.; SANTOS, S. F.; VOELCKER, H. E.; VIANA, A. R.; KOWSMANN, R. O.; MOREIRA, J. L. P.; CAOURA, A. P.; PAIM, P. S. G.; MATOS, R. S.; MACHADO, L. C. R. Ambiente marinhos profundos. In: SILVA, A. J. C. L. P.; ARAGÃO, M. A. N. F.; MAGALHÃES, A. J. C. (org.) **Ambientes de sedimentação siliciclástica do Brasil**. São Paulo. 2008, p 244-302.

DELLA FÁVERA, J.C. **Tempestitos da Bacia do Parnaíba**. 1990. 590f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

DUKE, L. W. Geostrophic circulation or shallow marine turbidity current? The dilemma of plaeoflow patterns in storm influenced prograding shore line systems. **Journal of Sedimentary Petrology**. v. 60, n. 6, p 870-883, 1990.

DUKE, L. W.; ARNOTT, R. W., CHEEL, R. J. Shelf sandstone and hummocky cross stratification: New insights on stormy debate. **Geology**, v. 19, p. 625-628, 1991.

DUMAS, S.; ARNOTT, R.W.C. Origin of hummocky cross and swaley stratification – the controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. **Geology**, v. 34, n. 12, p. 1073-1076, 2006.

EINSELE, G. Submarine mass flow deposits and turbidites. In: EINSELE, G.; RICKEN W.; SEILAHER (eds), A. **Cyclic and event in stratigraphy**. Springer Science + Business Media.1991, p. 313-340.

ELLIOTT, T. Deltas. In: READING, H. G. **Sedimentary environments and facies**. 2. ed. London: Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1986, p.113-154.

FOLK, R.L. **Petrology of sedimentary rocks**. Austin, Texas: Hemphill Publishing Company, 1974. 159 p.

GANI, M. R.; BHATTACHARYA, J. P. Basic building blocks and process variability of a cretaceous delta; internal facies architecture reveals a more dynamic interaction of river, wave and tidal processes than is indicated by external shape. **Journal Sedimentary Research**. v. 77, p. 284-302, 2007.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Relatório Interno, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57-67, 1994.

GÓES, A.M. **A Formação Poti (Carbonífero Inferior) da bacia do Parnaíba**. 1995. 171 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1995.

GÓES, A.M.O.; SOUZA J.M.P.; TEIXEIRA L.B. Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, p. 55-64, 1990.

GOOGLE EARTH. 2015. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place>>. Acesso em 25 mai. 2015.

JOHNSON, H. D.; BALDWIN, C. T. Shallow Siliciclastic Seas. In: READING, H. G. **Sedimentary environments and facies**. 2. ed. Oxford London: Blackwell Scientific Publications, 1986, p. 229-282.

JOHNSON, J.G.; KLAPPER, G.; SANDBERG, C. A. Devonian eustatic fluctuations in Euroamerica. **Geological Society of America Bulletin**, v. 96, p. 567-587, 1985.

KAHN, J.S. The analysis and distribution of the properties of packing in sandstone. **Journal of Geology**, v. 64, p. 385-395, 1956.

LAMB, M. P.; MYROW, P. M.; LUKENS C.; HOUCK K.; STRAUSS, J. Deposits From Wave-Influenced Turbidity Currents: Pennsylvanian Minturn Formation, Colorado, U.S.A. **Journal of Sedimentary Research**, v.78, p.480-498, 2008.

LIMA, E.A.M.; LEITE, J.F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba** – integração geológica-metalogenética. DNPM/CPRM, v.2. 1978.

LIMA, F. M. **Análise estratigráfica dos reservatórios Campo de Namorado**. 2003. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus Rio Claro. 2003.

LUCA, P. V.; BASILICI, G. Analogos de reservatório de rampa de água profunda: sistemas ricos em lama (unidade de Apiúna-SC) e em areia (Formação Punta Negra, Pré-Cordilheira Argentina). **Revista Brasileira de Geociências**. v.38, p.140-158. 2008.

MELO, J.H.G.; LOBOZIAK, S. Devonian-early carboniferous miospore biostratigraphy of the Amazon Basin, Northern Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 124, n. 3-4, p.131- 202, 2003.

MIALL, A. D. A review of the braided river depositional environment. **Earth Science Reviews**, v.13, p. 1-62, 1977.

MILANI, E. J.; ZALÁN P. V. An outline of the geology and petroleum system of the Paleozoic interior basins of south America. **Episodes**, v. 22, n. 3, p. 199-205. 1999.

MUTTI, E.; TINTERRI, R.; MAGALHAES, P. M.; BASTA, G. Deep-water turbidites and their equally important shallower water cousins. In: SEARCH AND DISCOVERY ARTICLES, ANNUAL CONVENTION, 1999, Long Beach, California. **Annual**. Long Beach, California, 1999. p. 1-4. Disponível em: <<http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2007/08096mutti/images/mutti.pdf.html>>. Acesso em 15/05/2015

MYRON, P. M.; SOUTHARD, J. B. Combined flow model for vertical stratification sequence in shallow marine storm deposited bed. **Journal of sedimentary petrology**, v. 61, n. 2, p. 202-210, 1991.

MYRON, P. M.; SOUTHARD, J. B. Tempestite deposition. **Journal of sedimentary petrology**, v.66, n.5, p. 875-887. 1996.

NASCIMENTO, M. S.; GÓES, A. M. Petrografia de arenitos e minerais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luís Luís-Grajaú, norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 1, n. 37, p. 50-63, 2007.

NICHOLS, G. **Sedimentology and stratigraphy**, 2. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009.

PETERSOHN, E. **Rodada de licitações de petróleo e gás Bacia do Parnaíba**, 9. 2007. Disponível em : <[http://www.brasilrounds.gov.br/arquivos/Seminarios\\_R9/apresentacao/r9\\_04\\_parnaiba.pdf](http://www.brasilrounds.gov.br/arquivos/Seminarios_R9/apresentacao/r9_04_parnaiba.pdf)>. Acesso em 07 mai. 2014.

PICKERING, K.; STOW, D.; WATSON, M; HISCOTT R. Deep-water facies, processes and models: a review and classification Scheme for modern and ancient sediments. **Earth-Science Reviews**, v.23, p. 75-174, 1986.

PIRES, F.A. O estado de Arte dos depósitos de Turbidito. **Revista IG**. São Paulo, v. 1, n.14, p. 55-64, 1993.

REIS, D.E.S.; CAPUTO, M.V. Potencial industrial e energético do folhelho pirobetuminosos Formação Codó, Bacia do Parnaíba. In: **PDPETRO**, 4., 2007,. Campinas, 2007. p.21-24.

RODRIGUES, R. M. M. **Estudo faciológico das formações Longá e Poti (Famenniano e Tournasiano), na região de Floriano, Oeste do estado do Piauí**. 2003. 108f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2003.



ROSSETI, D. F.; GOÉS, A. M.; TRUCKENBRODT, W. **O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém-PA: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001.

SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S. **Paleontologia das Bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís**. Rio de Janeiro : CPRM Serviço Geológico de Brasil, 2009. 215 p.

SANTOS, V.H.; LIMA FILHO, M.F.; NEUMANN, V.H. Quais as possibilidades de um sistema petrolífero na Bacia do Parnaíba? In: **PDPETRO**, 4., Campinas, SP, 2007. p. 1-10.

SHANMUGAM, G. Ten turbidite myths. **Earth Science Reviews**, n. 58, p. 311-341, 2001.

STOW, D. A.V. Deep clastic seas. In: READING, H. G. **Sedimentary environments and facies**. 2. ed. Oxford: London : Blackwell Scientific Publications, 1986. p. 339 - 345.

TROSVIK, T. H., COCKS, L. R. M. The paleozoic palaeogeography of central Gondwana. In: Van HINSBERGEN, D.J.; BUITER, S.J.H.; TORSVIK, T.H.; GAINA, C.; WEBB, S. J. (eds) **The formation and evolution of Africa: a synopsis of 3.8 Ga of Earth History**. London : Geological Society. Special Publications, 2011. p. 137-168.

TUCKER, M. E. Sedimentary petrology an introduction to the origin of sedimentary rocks. 2.ed. Oxford: Blackwell Science Ltd. 1992.

VAZ, P.T.; REZENDE, N.G.A.M.; WANDERLEY FILHO, J.R.; TRAVASSOS, W.A.S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n.2, p. 253-263, 2007.

WALKER, R.G. Facies modeling and sequence stratigraphic. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 60, p. 777-786, 1990.

WALKER R.G.; PLINT, W.S. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: WALKER, R.G.; JAMES, N.P. **Facies models and sea level changes**. Local: Stittsville, Ontario: Geological Association of Canada, 1992. p.219-239.

WANDERLEY FILHO, J.R.; TRAVASSO, W.A.S.; ALVES, D.B O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas – herói ou vilão? **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.14, n. 1, p. 177-184, 2006.

WETZEL, A.; BROMLEY, R. G. Re-evaluation of the ichnogenus Helminthopsis – a new look at the type material. **Palaeontology**, v. 39, n. 1, p. 1-19, 2006.

WIZEVICH, M.C. Photomosaics of outcrops: useful photographic techniques. In: MIAL, A.D.; TYLER, N. (Eds). **The Three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and Its Implications for hydrocarbon Discovery and Recovery**. Tulsa Oklahoma: SEPM, 1991. p. 22-24. (Conc. Sedim. and Paleont., 3).

YOUNG, C. G. K. **Estratigrafia de alta resolução da Formação Pimenteiras (Devoniano da Bacia do Parnaíba)**. 2006 174f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.