

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**O SISTEMA DE EMPURRÕES E DOBRAMENTOS
GRAVITACIONAIS NO SE DA BACIA DO PARÁ-
MARANHÃO E POSSÍVEIS SISTEMAS PETROLÍFEROS
ASSOCIADOS**

ADLER PEREIRA SOARES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Juliano Kuchle

Porto Alegre, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**O SISTEMA DE EMPURRÕES E DOBRAMENTOS
GRAVITACIONAIS NO SE DA BACIA DO PARÁ-
MARANHÃO E POSSÍVEIS SISTEMAS PETROLÍFEROS
ASSOCIADOS**

ADLER PEREIRA SOARES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Juliano Kuchle

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alex Francisco Antunes – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.a Dra. Valéria Centurion Córdoba – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dissertação de Mestrado
apresentada como requisito
parcial para obtenção do
Título de Mestre em
Geociências.

Porto Alegre, 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Soares, Adler

O SISTEMA DE EMPURRÕES E DOBRAMENTOS GRAVITACIONAIS
NO SE DA BACIA DO PARÁ-MARANHÃO E POSSÍVEIS SISTEMAS
PETROLÍFEROS ASSOCIADOS / Adler Soares. -- 2021.

67 f.

Orientador: Juliano Kuchle.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Tectônica gravitacional. 2. Margem equatorial
brasileira. 3. Sistemas petrolíferos. 4. Interpretação
sísmica. I. Kuchle, Juliano, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Juliano Kuchle, agradeço pela oportunidade de fazer mestrado na UFRGS. Por desde o primeiro momento ter me recebido tão bem e me apresentando às pessoas e às dependências do prédio da Pós-Graduação em Estratigrafia. Certamente isso foi essencial para que eu pudesse me sentir à vontade no que viria a ser meu ambiente de trabalho diário. Agradeço pela preocupação constante, sabendo que passei o primeiro ano de mestrado sem bolsa, e principalmente pelos momentos de tutoria, pela clareza e objetividade nos ensinamentos. Por fim, agradeço pela paciência, flexibilidade e confiança diante dos percalços que surgiram.

Aos docentes das disciplinas cursadas, deixo minha gratidão por todos os ensinamentos. Em especial ao Prof. Claiton Scherer, que além de ministrar cursos com conteúdo e didática estarrecedores, acolhe seus alunos como a amigos; e às Prof.as Carla Porcher e Márcia Boscato, pela coragem em empreender a disciplina Geologia dos Andes Centrais, um trabalho de campo que tem como pivô a dinâmica tectono-sedimentar dos Andes Centrais, mas que acaba transpondo fronteiras com diversas áreas fora das geociências e se tornando uma experiência sobre a vida em comunidade.

Agradeço aos técnicos do prédio da Pós-Graduação em Estratigrafia, Carlos Feijó e Rodrigo Theobald, sempre solícitos e dispostos a resolver quaisquer problemas burocráticos ou de T.I. Aos colegas de SeisLab André Schilling, Luan Timm e Victor Sommer, meus agradecimentos pela parceria, pelas discussões e pelas inúmeras dúvidas sanadas gentilmente, em especial a Francyne Bochi, a quem fugiram poucas dúvidas sobre Petrel e outras questões, exímia revisora, e para além da parte técnica, uma pessoa de empatia singular.

Agradeço à UFRGS pela infraestrutura cedida, à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado, à UFPA e ANP pela requisição e cessão, respectivamente, dos dados utilizados no trabalho.

Por fim, agradeço aos meus pais e à minha irmã por me apoiarem nas minhas escolhas e pelo amor que nos une, e à minha companheira Virginia, pelo carinho, companheirismo, bons momentos juntos e pelos incentivos quando eu parecia cansado. Esses são motivos enormes para eu seguir em frente.

RESUMO

Cinturões de dobramentos e empurrões gravitacionais ocorrem comumente em regiões de águas profundas e ultra-profundas de bacias de margem passiva devido ao colapso gravitacional de rochas da plataforma externa e talude, compondo sistemas extensionais-compressivos conectados por uma falha de descolamento. Essas feições têm sido estudadas em inúmeras bacias ao redor do mundo devido ao seu alto potencial para o desenvolvimento de sistemas petrolíferos, como é o caso da Bacia do Pará-Maranhão. Este trabalho analisou uma célula de deslizamentos gravitacionais no talude SE da Bacia do Pará-Maranhão através de interpretação sísmica 3D com suporte de dados de poço. A metodologia utilizada consistiu no mapeamento de horizontes e estruturas ao longo de uma área de 890 km². A análise do arcabouço estrutural mapeado possibilitou a identificação de três zonas com estilos estruturais distintos. A interpretação sugere que os diferentes estilos se deram por diferenças composicionais entre as zonas, resultando em diferentes comportamentos reológicos, ou por variações laterais na geometria do talude e/ou na pressão de fluidos dos folhelhos, afetando a maneira como a deformação se propagou. Baseado no arcabouço estrutural e na sucessão estratigráfica mapeada, foram propostos ainda um modelo cinemático 2D para cada uma das zonas interpretadas e um sistema petrolífero hipotético composto por possíveis reservatórios turbidíticos estruturados pela tectônica gravitacional.

PALAVRAS-CHAVE: Tectônica gravitacional; Margem Equatorial Brasileira; Sistemas Petrolíferos.

ABSTRACT

Gravity thrust and fold belts are commonly found in deep and ultra-deep-water settings of passive margin basins due to the gravitational collapse of rocks on the outer shelf and slope, composing extensional-compressional systems connected by a detachment fault. These features have been extensively studied around the world because of their potential for the development of petroleum systems. This study analyzed an extensional-compressional system on the southeastern slope of the Pará-Maranhão Basin through 3D seismic and borehole data interpretation. The applied methodology consisted on horizons and structural mapping along an area of 890 km². The analysis of the mapped structural framework afforded the identification of three zones with different structural patterns. We propose that the different structural patterns took place because of compositional differences between the three zones, resulting in different rheologies, or due to lateral variations on the paleo-slope geometries and/or shale pore pressures, affecting the way that the deformation spread on each zone. Finally, based on the mapped structural framework and stratigraphic succession, we proposed a kinematic 2D model for each zone and a hypothetical petroleum system composed by possible turbiditic reservoirs structured by the gravitational tectonic event.

KEY-WORDS: Gravitational tectonics; Brazilian Equatorial Margin; Petroleum Systems.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Mapa de localização geográfica..... | 12 |
| Figura 2: Carta cronoestratigráfica da Bacia do Pará-Maranhão..... | 13 |
| Figura 3: Modelo esquemático de uma célula de deslizamentos gravitacionais | 16 |
| Figura 4: Localização dos principais sistemas de empurrões e dobramentos gravitacionais no mundo..... | 17 |
| Figura 5: Estilos estruturais desenvolvidos em descolamentos sobre folhelhos | 18 |
| Figura 6: Mecanismos desencadeadores de tectônica gravitacional..... | 20 |
| Figura 7: Esquema de classificação de dobras relacionadas a empurrões | 21 |
| Figura 8: Modelos para classificação de dobras de inflexão de falha..... | 23 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 9 |
| 2. | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2.1. | APRESENTAÇÃO | 10 |
| 2.2. | JUSTIFICATIVA | 10 |
| 2.3. | OBJETIVOS..... | 11 |
| 3. | ESTADO DA ARTE..... | 11 |
| 3.1. | CONTEXTO GEOLÓGICO | 11 |
| 3.2. | CÉLULAS DE DESLIZAMENTOS GRAVITACIONAIS | 15 |
| 3.2.1. | Descolamentos sobre folhelhos..... | 17 |
| 3.2.2. | Mecanismos desencadeadores de tectônica gravitacional | 19 |
| 3.3. | DOBRAS ASSOCIADAS A FALHAS DE EMPURRÃO | 20 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 5. | ARTIGO CIENTÍFICO | 26 |
| 6. | COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO | 62 |
| 7. | CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS | 62 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 65 |

1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente Dissertação de Mestrado foi estruturada em função do artigo submetido à revista *Journal of South American Earth Sciences*, classificada no estrato *Qualis-CAPES A3*. O documento está organizado em seis capítulos principais:

- i) INTRODUÇÃO, constando uma breve apresentação sobre o tema e área de estudo, a relevância do tema desenvolvido, e os principais objetivos almejados com a realização do trabalho;
- ii) ESTADO DA ARTE, abordando os principais conceitos presentes na literatura sobre: a) contexto geológico da área de estudo; b) células de deslizamentos gravitacionais; c) dobras relacionadas a falhas de empurrão;
- iii) MATERIAIS E MÉTODOS, citando brevemente os dados e a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados e elaboração das discussões apresentadas no artigo;
- iv) ARTIGO CIENTÍFICO, submetido à revista *Journal of South American Earth Sciences*, apresentando os principais resultados obtidos e discutindo suas implicações dentro do contexto geológico estudado;
- v) COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO, constando um e-mail do editorial da revista comprovando que o artigo foi submetido;
- vi) CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS, sintetizando os resultados e discussões apresentados no artigo e propondo pontos a serem desenvolvidos para uma melhor compreensão da área de estudo;
- vii) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, listando a bibliografia citada ao longo do trabalho.

2. INTRODUÇÃO

2.1. Apresentação

As regiões de talude das bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas são marcadas pela ocorrência de cinturões de empurrões e dobramentos gravitacionais (*gravity thrust and fold belts*) que afetam seções siliciclásticas de até 10 km de espessura (ZALÁN, 2011).

Estas feições estruturais ocorrem comumente em regiões de águas profundas e ultra-profundas de bacias de margem passiva devido ao colapso gravitacional de rochas da plataforma externa e talude, compondo células de deslizamentos gravitacionais. As rochas colapsadas são deslocadas talude abaixo através uma superfície de descolamento formada sobre rochas com baixa resistência ao cisalhamento (evaporitos ou folhehos) (ROWAN et al., 2004; BUTLER AND PATON, 2010; PEEL, 2014). Quando a porção frontal do descolamento perde velocidade devido à diminuição do ângulo do descolamento ou a uma barreira física, as rochas se deformam num domínio compressivo, gerando falhas de empurrão e dobramentos associados.

2.2. Justificativa

Células de deslizamentos gravitacionais têm sido estudadas em inúmeras bacias de margem passiva nas últimas décadas devido ao seu alto potencial para o desenvolvimento de sistemas petrolíferos (e.g. campos no Golfo do México, Nigéria e Guiné Equatorial) (BILOTTI; SHAW, 2005; DAILLY et al., 2002; MEYER et al., 2005; ROWAN; PEEL; VENDEVILLE, 2004).

A margem equatorial brasileira (região composta pelas bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar *offshore*), por sua vez, também tem mostrado potencial promissor para a exploração de hidrocarbonetos, conforme apontam descobertas comerciais recentes nas bacias do Ceará e Potiguar (prospectos de Pecém e Pitú, respectivamente), ambas em regiões de águas profundas.

A Bacia do Pará-Maranhão, apesar do histórico exploratório de longa data (desde a década de 70), nunca se destacou como produtora de hidrocarbonetos, limitando-se a descobertas sub-comerciais em águas rasas. A região de águas profundas da bacia permanece como uma área de fronteira exploratória, com parca disponibilidade de dados sísmicos e principalmente de poços.

Descobertas recentes em turbiditos de águas profundas e ultra-profundas na margem equatorial africana, como os campos de Jubilee e Tweneboa-Enyenra-Ntomme (TEN), no *offshore* de Gana, com produções respectivas de 100.000 e 80.000 bbl/d (DAILLY *et al.*, 2013; ZALÁN, 2015, MAIA de ALMEIDA *et al.*, 2020), apontam para a existências de outros ativos de classe mundial na margem equatorial sul-americana. A expectativa foi confirmada com a descoberta do campo de Zaedyus, na Guiana francesa (PELLEGRINI *et al.*, 2018). Todas as descobertas citadas compartilham o mesmo sistema petrolífero, formado por rochas geradoras do intervalo Albiano-Turoniano e reservatórios turbidíticos do intervalo Cenomaniano-Maastrichtiano (ZALÁN, 2015).

O sucesso exploratório supracitado renovou as perspectivas para a região de águas profundas e ultra-profundas na margem equatorial brasileira, que compartilha diversos aspectos paleogeográficos e evolutivos com a Província do Golfo da Guiné (bacias da Costa do Marfim, Gana, Central, Pond, Keta e Togo). O Golfo da Guiné, localizado entre as zonas de fratura Romanche e São Paulo na margem equatorial africana, constitui uma importante província petrolífera, responsável pela segunda maior produção de óleo na costa oeste africana.

2.3. Objetivos

Diante do potencial exploratório e da necessidade de uma melhor compreensão da região de águas profundas da Bacia do Pará-Maranhão, este trabalhou objetivou:

- a) Mapear e caracterizar as estruturas da célula de deslizamentos gravitacionais estudada, analisando a geometria 3D e a cinemática das estruturas e dos estratos deformados;
- b) A partir do arcabouço estrutural mapeado e da sucessão estratigráfica analisada, propor um sistema petrolífero hipotético (nunca antes testado) para a região de águas profundas da bacia.

3. ESTADO DA ARTE

3.1. Contexto geológico

A Bacia do Pará-Maranhão está situada na margem equatorial brasileira, abrangendo a costa dos estados do Pará e Maranhão, ocupando uma área de 48.000 km². Limita-se a sudeste com a Bacia de Barreirinhas e a noroeste com a Bacia da Foz do Amazonas (Figura 1).

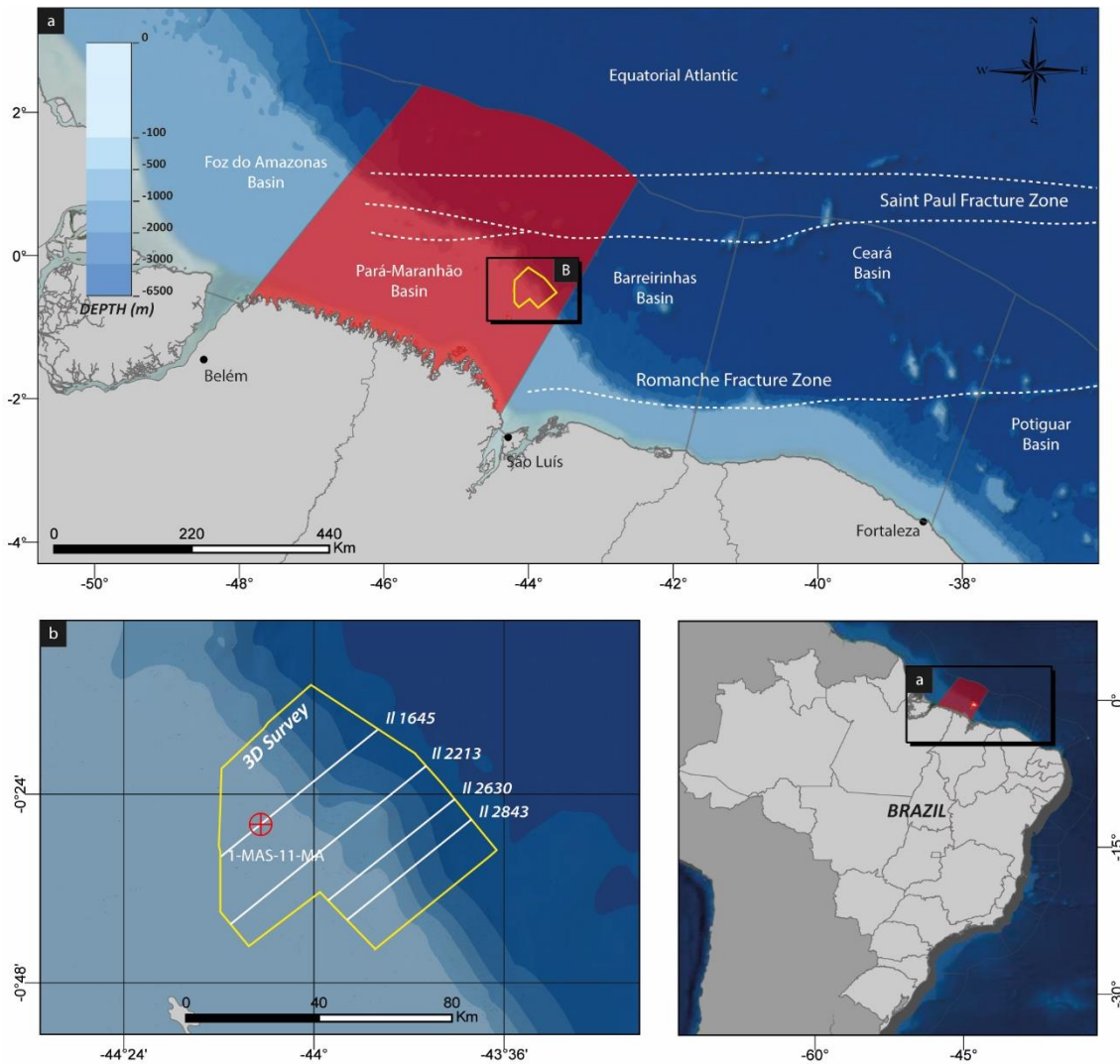


Figura 1: (a) Mapa de localização das bacias da margem equatorial brasileira. Bacia do Pará-Maranhão destacada em vermelho. Linhas tracejadas em branco representam zonas de fratura oceânicas. O polígono em amarelo marca a localização da base de dados utilizada. (b) Detalhe da base de dados utilizada. Linhas brancas representam as seções sísmicas ilustradas no artigo. O círculo vermelho ilustra a localização do poço utilizado. Zonas de fratura traçadas segundo Zalán (2011).

As bacias da margem equatorial brasileira apresentam algumas particularidades evolutivas em relação às bacias margem leste, como: início tardio (Aptiano - Albiano) da fase rifte; tectônica transcorrente controlando a fase rifte, originando riftes *pull-apart* de evolução diácrona; e ausência da fase evaporítica típica em várias bacias da margem leste brasileira.

A evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Pará-Maranhão, assim como toda a margem equatorial brasileira, é dividida em três estágios principais: pré-rifte, rifte e pós-rifte ou drifte (SOARES, et al. 2007; ZANOTTO AND SZATIMARI, 1987) (Figure 2).

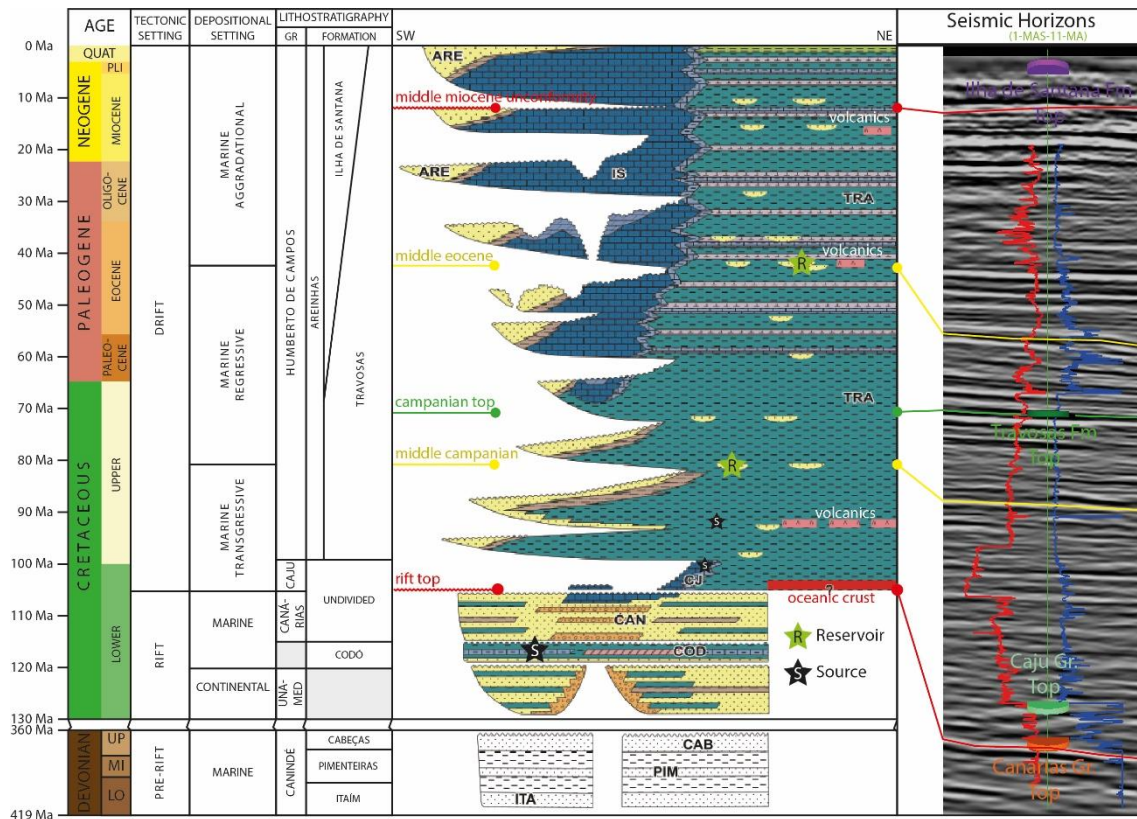


Figura 2: Carta cronoestratigráfica da Bacia do Pará-Maranhão (modificada de Soares et al., 2007). Horizontes citados ao longo do artigo são mostrados em vermelho (discordâncias), amarelo e verde. Estrelas pretas e verdes indicam rochas geradoras e reservatórios no sistema petrolífero proposto no artigo. O tamanho das estrelas representa a relevância dos elementos dentro do sistema petrolífero proposto.

Durante o período Jurássico, as bacias do proto-Atlântico equatorial encontravam-se contíguas à África Ocidental, com as sinéclises paleozóicas do Parnaíba e do Amazonas adentrando parcialmente o continente africano (ZANOTTO; SZATIMARI, 1987). Na Bacia de Barreirinhas, basicamente uma continuação para SE da Bacia do Pará-Maranhão, foram amostradas rochas de idade devoniana (equivalentes ao Grupo Canindé na Bacia do Parnaíba). Apesar da ausência de amostragem desse intervalo na Bacia do Pará-Maranhão, um pacote de refletores na base das seções sísmicas é associado a esses depósitos intracratônicos paleozóicos, constituindo a seção pré-rifte da bacia (SOARES et al., 2007).

Durante o Neocomiano, com o progresso da abertura no Atlântico Sul, uma mudança na direção de transporte tectônico condicionou o início da fase rifte na margem equatorial, originando uma série de calhas *pull-apart* de direção principal E-W e SE-NW (ZANOTTO; SZATIMARI, 1987). Esse evento corresponde à fase sin-transformante proposta por Matos (2000), marcando a ocorrência dos primeiros centros de espalhamento que deram origem à abertura do Atlântico Equatorial. As zonas de fraturas Chain, Romanche e São Paulo desenvolveram papel fundamental no desenvolvimento de riftes *pull-apart* transpressivos e transtensivos. Esses depocentros apresentam padrões de preenchimento diferenciados frente às assinaturas típicas de riftes divergentes, como ausência de conglomerados de falhas de borda e de falhas lítricas (MATOS, 2000).

A partir do Neoalbiano o principal mecanismo de subsidência passou a ser o resfriamento crustal (ZANOTTO; SZATIMARI, 1987), marcando o início da fase drifte. A discordância que capeia os depósitos da fase rifte (discordância do *break-up*) foi datada por Soares et al. (2007) em 102 Ma. A fase drifte é dividida por Soares *et al.* (2007) em três ciclos deposicionais de acordo com o padrão de empilhamento dominante em cada um deles. Inicialmente desenvolveu-se um ciclo transgressivo (Albiano Superior – Campaniano Médio), seguido por um ciclo regressivo (Campaniano Médio – Eoceno Médio), sobreposto por um ciclo agradacional que perdura até o Recente (Figura 2).

O ciclo transgressivo é composto na base por rochas carbonáticas do Grupo Caju, uma plataforma carbonática incipiente que teve início ainda na fase rifte, sobrepostas por rochas siliciclásticas do Grupo Humberto de Campos. O Grupo Humberto de Campos é composto por arenitos plataformais da Formação Areinhas e argilitos, siltitos, folhelhos e eventuais turbiditos da Formação Travosas (Figura 2). Esse ciclo é marcado pelo evento anóxico global do Turoniano (SOARES *et al.*, 2007), facilmente reconhecido em perfis de poço ao longo de toda a margem equatorial brasileira (Figura 2). Destaca-se ainda a presença de um evento vulcânico básico datado em 90 Ma, cujo efeito térmico amplificou discordâncias ao longo da bacia. A discordância do Campaniano Médio marca o início de uma tendência regressiva após um período de domínio transgressivo. Juntamente com a discordância do *break-up*, constituem as principais discordâncias da margem equatorial (SOARES et al., 2007).

O ciclo regressivo é composto na base por rochas das formações Areinhas na porção proximal e Travosas na porção distal, até o Eomaastrichtiano, quando uma plataforma carbonática incipiente começou a se nuclear. Esta plataforma carbonática

dominou o registro geológico na plataforma durante os próximos milhões de anos, compondo a Formação Ilha de Santana, formada principalmente por calcarenitos e *grainstones* na plataforma interna, *wackestones* e *mudstones* na plataforma externa, e margas, *mudstones* seixosos, folhelhos e eventuais turbiditos em águas profundas e ultra-profundas (SOARES *et al.*, 2007). Pontualmente a contribuição siliciclástica à bacia prevaleceu sobre os depósitos carbonáticos, resultando em intercalações com arenitos deltáicos da Formação Areinhas (Figura 2). O limite superior do ciclo regressivo representa um importante evento erosivo durante o Eoceno Médio, ocasionando a incisão de vales sobre a plataforma carbonática (SOARES *et al.*, 2007).

Os processos gravitacionais responsáveis pela formação dos cinturões de empurrões e dobramentos ocorreram durante o Eoceno Médio (SOARES *et al.*, 2007; ZALÁN, 2011). Baseados em feições sísmicas, os autores acima propuseram um evento vulcânico como causa da tectônica gravitacional. Segundo eles, o edifício vulcânico agiu como anteparo para a formações dos empurrões e dobras associadas, e a sua colocação atuou como gatilho para o colapso gravitacional do talude. Os cinturões de empurrões e dobramentos gravitacionais se estendem ao longo de milhares de km² ao longo das bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas, afetando a sucessão sedimentar do Coniaciano ao Holoceno (ZALÁN, 2011). A deformação resultou em alterações no relêvo batimétrico, desenvolvendo altos e baixos estruturais que foram balizadores dos processos deposicionais em águas profundas.

O ciclo agradacional se iniciou no Lutetiano, com predominância dos depósitos carbonáticos da Formação Ilha de Santana (Figura 2). Um importante evento transgressivo, conhecido como Mar de Pirabas, ocorreu durante esse ciclo, representando a máxima expansão da plataforma carbonática (SOARES *et al.*, 2007).

A discordância do Mioceno Superior (Figura 2) também é notável na margem equatorial brasileira, com expressão em seções sísmicas, testemunhos e afloramentos (ROSSETTI, 2001). Acima dessa discordância ocorre uma nova progradação siliciclástica sobre a plataforma, representada pelos sedimentos costeiros da Formação Barreiras, amplamente distribuídos sobre a margem equatorial.

3.2. Células de deslizamentos gravitacionais

Cinturões de empurrões e dobramentos (*thrust and fold belts*) são feições clássicas de ambientes convergentes, como orógenos acrescionários e colisionais. No entanto, sua

ocorrência não está restrita a estes ambientes. Estas feições ocorrem com certa frequência em bacias de margem passiva afetadas por tectônica gravitacional, associadas a células de deslizamentos gravitacionais, por vezes abrigando acumulações de hidrocarbonetos (e.g.: Delta do Níger, Golfo do México). A compreensão dos mecanismos desencadeadores, da temporalidade dos eventos, da geometria das estruturas, da evolução termal e do soterramento é um fator chave para a exploração bem sucedida dessas áreas (McCLAY, 2011).

Nas bacias de margem passiva essas áreas são caracterizadas por amplas zonas de deformação em que falhas essencialmente gravitacionais ocasionam o colapso e translação dos estratos pós-rite talude abaixo. A deformação é acomodada por um sistema extensional proximal, conectado a um sistema compressivo distal através de uma ou mais superfícies de descolamento (ROWAN *et al.*, 2004) (Figura 3). A compressão distal pode ser acomodada por diversas feições estruturais, como empurrões e dobramentos, diapirismo ou halocinese, possível compressão (esmagamento) de diápiros, ou combinações entre os termos.

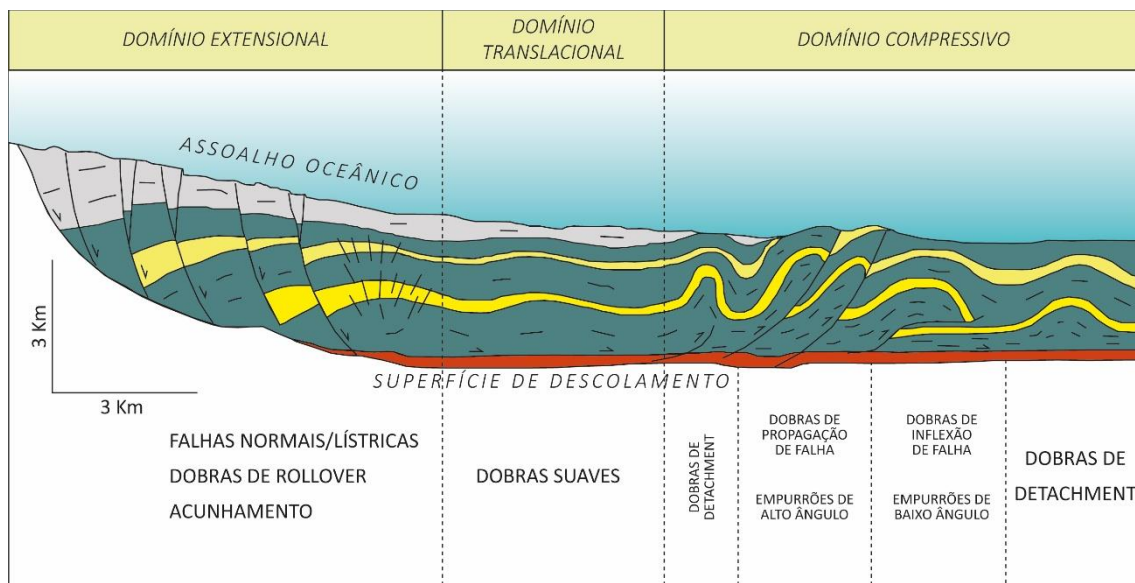


Figura 3: Modelo esquemático de uma célula de deslizamentos gravitacionais abordando possíveis estruturas em cada domínio do sistema. Modelo baseado na Bacia da Foz do Amazonas. Modificado de Zalán (2001).

As superfícies de descolamento, essenciais para o desenvolvimento dos sistemas, formam-se tipicamente sobre camadas de evaporitos ou folhelhos. O sal é um material viscoso, que flui sob esforços mínimos, de modo que sua deformação se inicia tipicamente

logo após sua deposição. O folhelho, no entanto, é um material plástico, requerendo esforços maiores para que o coeficiente de fricção seja superado.

A Figura 4 mostra a localização dos principais sistemas de empurrões e dobramentos gravitacionais de águas profundas no mundo, classificando-os em tipos 1a (superfície de descolamento em folhelhos) e 1b (superfície de descolamento em evaporitos), típicos de bacias de margem passiva, além das variantes do tipo 2, sistemas de empurrões e dobramentos gravitacionais de águas profundas inerentes a ambientes tectônicos convergentes.

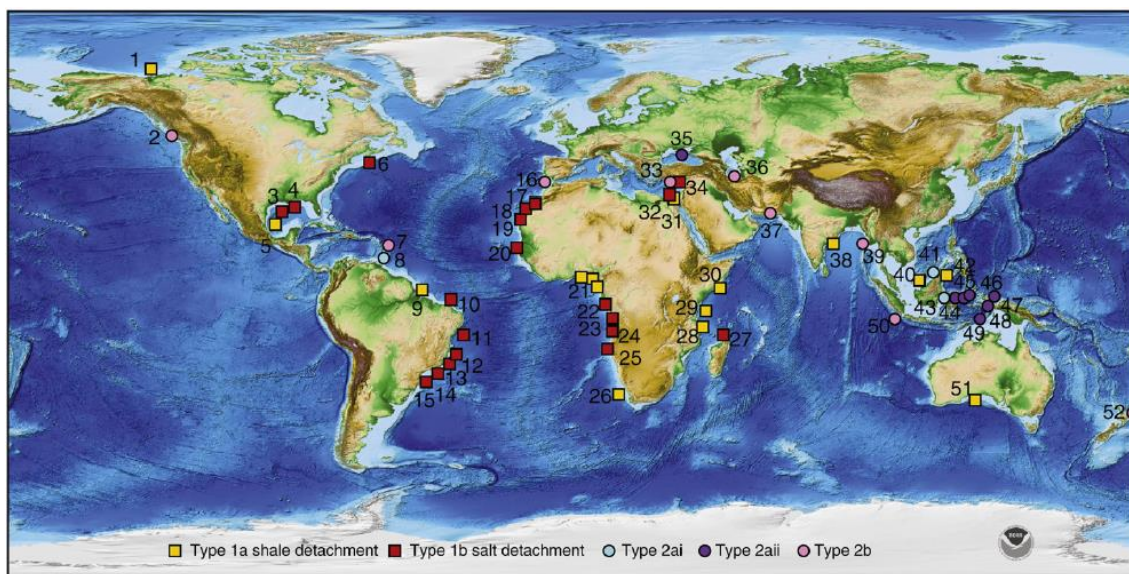


Figura 4: Mapa de localização de sistemas de empurrões e dobramentos gravitacionais no mundo. Tipo 1a: margem passiva com descolamento sobre folhelhos; Tipo 1b: margem passiva com descolamento sobre evaporitos; Tipo 2: margens ativas. Fonte: Morley *et al.* (2011).

3.2.1. Descolamentos sobre folhelhos

O coeficiente de fricção dos folhelhos é reduzido sob altas pressões de fluido, de forma que a deformação geralmente se inicia após um soterramento considerável. Altas pressões de fluido podem ser geradas por altas taxas de sedimentação, geração de hidrocarbonetos e compactação tectônica durante o encurtamento (BARKER, 1990; MORLEY & GUERIN, 1996). Altas pressões de fluido podem ser constatadas indiretamente pela ocorrência de diápiros de folhelho ou pela ocorrência de anomalias de *pull-down* na sísmica.

O limite entre folhelhos com pressões de fluido normais e folhelhos sob alta pressão de fluido migra em direção à bacia à medida que a carga sedimentar prograda.

Isso acaba gerando uma tendência de propagação das estruturas em direção à bacia, evidenciada por empurrões mais novos com ângulos progressivamente mais baixos (ROWAN *et al.*, 2004). Entretanto, a possibilidade de decompressão dos folhelhos por desidratação pode ocasionar empurrões fora de fase.

Três estilos estruturais típicos de descolamentos sobre folhelhos são destacados por Rowan *et al.* (2004) (Figura 5): (a) descolamentos sobre folhelhos falhados, apresentando empurrões imbricados com vergência para a bacia, onde a assimetria das estruturas tipifica descolamentos friccionais, com resistência à deformação relativamente alta e pressões de fluido no máximo moderadas; (b) descolamentos sobre folhelhos dobrados, caracterizados por dobras de *detachment* simétricas, onde a simetria das estruturas sugere baixa resistência à deformação, com pressões de fluido altas; e (c) descolamentos sobre folhelhos super-pressurizados, caracterizados por uma ampla gama de estruturas, incluindo diápiros de folhelhos. No último caso, é possível delimitar a zona de alta pressão da zona de pressão moderada a partir da transição de dobras de *detachment* simétricas para empurrões imbricados assimétricos.

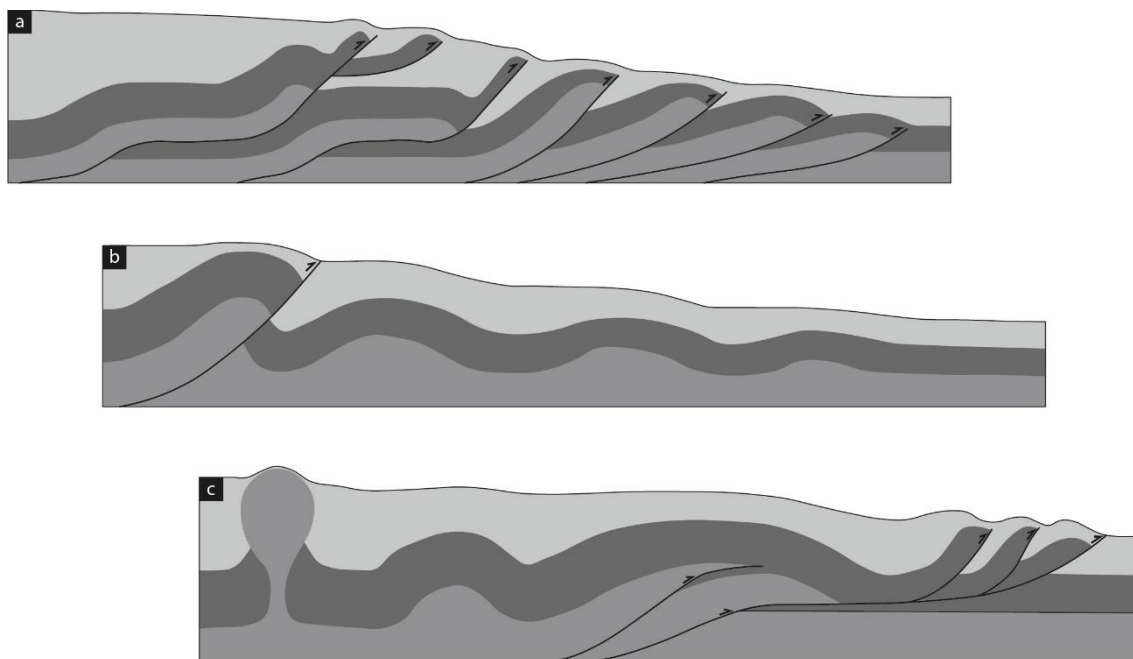


Figura 5: Principais estilos estruturais desenvolvidos em descolamentos sobre folhelhos. (a) Folhelhos falhados; (b) Folhelhos dobrados; (c) Folhelhos super-pressurizados. Modificado de Rowan *et al.* (2004).

3.2.2. Mecanismos desencadeadores de tectônica gravitacional em margens passivas

Os mecanismos desencadeadores de tectônica gravitacional em águas profundas propostos na literatura são o deslizamento gravitacional (*gravity gliding*) e o espalhamento gravitacional (*gravity spreading*) (Figura 6) (ROWAN et al., 2004; MORLEY et al., 2011).

O deslizamento gravitacional é definido como a translação de um corpo rígido talude abaixo, com vetores de deslocamento paralelos à superfície de descolamento (Figura 6a). O fator chave no deslizamento gravitacional é o mergulho da superfície de descolamento, de modo que mergulhos mais altos implicam numa componente do peso paralela ao descolamento maior, fazendo com que a resistência ao deslocamento seja superada mais facilmente.

O espalhamento gravitacional, por sua vez, é o colapso vertical e espalhamento lateral de um bloco de rocha sob seu próprio peso devido ao declive do talude (Figura 6b). Os fatores chave nesse caso são o mergulho da superfície do talude, o mergulho do descolamento basal, o coeficiente de fricção ao longo do descolamento e a resistência interna da massa alóctone.

Progradações na plataforma externa e talude superior mantêm ou aumentam o mergulho do talude, favorecendo o espalhamento gravitacional. Já o *by pass* de sedimentos da plataforma para o talude inferior e planície abissal levam a uma diminuição do mergulho do talude, retardando o espalhamento.

Na prática, ambos os processos acabam contribuindo para a tectônica gravitacional, visto que o deslizamento gravitacional comumente envolve uma superfície de talude inclinada, de modo que o modelo híbrido (Figura 6c) reflete essa realidade.

A tectônica gravitacional tem um caráter auto-limitante, uma vez que a compressão distal encurta e espessa a pilha de sedimentos, tornando-a mais resistente à deformação (ROWAN et al., 2004). Assim, se o potencial gravitacional permanece constante, a tectônica se estabiliza. Além disso, a extensão proximal e a compressão distal diminuem o mergulho da batimetria do talude, diminuindo a força motriz da deformação.

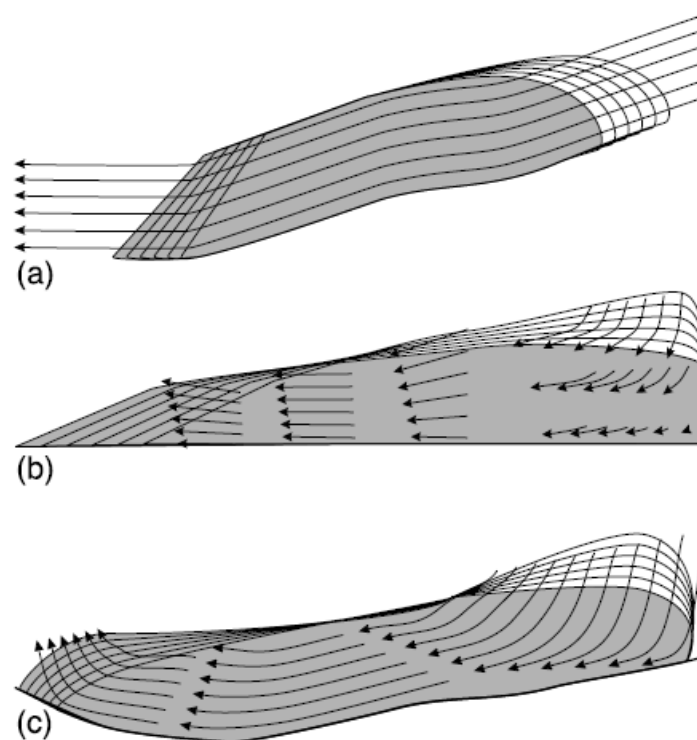


Figura 6: Ilustração dos principais mecanismos desencadeadores de tectônica gravitacional em margens passivas: (a) deslizamento gravitacional; (b) espalhamento gravitacional; (c) modelo híbrido. Fonte: Rowan *et al.* (2004).

3.3. Dobras associadas a falhas de empurrão

Dobras associadas a falhas de empurrão são tipicamente classificadas em (1) dobras de detachment, (2) dobras de propagação de falha e (3) dobras de inflexão de falha. Cada um dos tipos difere fundamentalmente na maneira como se formam, dependendo da estratigrafia mecânica e do estilo estrutural associado, e conseqüentemente, resultam em geometrias e evoluções cinemáticas distintas (WALLACE *et al.*, 2004).

A geometria do empurrão abaixo das dobras é a característica essencial para a distinção entre cada um dos termos possíveis. (WALLACE *et al.*, 2004). Dobras de *detachment* são estruturas caracteristicamente simétricas, formadas sobre superfícies de descolamento horizontais ou de baixo ângulo, quando o descolamento apresenta baixa resistência friccional. Geralmente estão associadas a camadas incompetentes sobrepostas por camadas competentes. A estrutura anticlinal é inicialmente flanqueada por sinclinais de tamanho similar. Um aumento na intensidade do encurtamento, no entanto, resulta em geometrias mais apertadas, com aumento da área do anticlinal e diminuição da área dos sinclinais (MITRA, 2002). Falhas podem ser desenvolvidas simultaneamente nos dois

flancos do anticlinal, resultando em estruturas *pop-up* simétricas, limitadas por falhas de mergulhos opostos (Figura 7). Eventualmente, uma dessas falhas pode se desenvolver mais, conectando-se com o descolamento basal e possibilitando a evolução para uma estrutura assimétrica (MITRA, 2002).

Dobras de propagação de falha são dobras formadas nas extremidades de falhas de empurrão, que crescem à medida que o empurrão se propaga (SUPPE & MEDWEDEFF, 1990). Apresentam caracteristicamente uma geometria assimétrica, composta por um flanco curto e inclinado adjacente à falha de empurrão, em contraste com o flanco anterior, normalmente mais longo e de mergulho mais suave (Figura 7).

Já as dobras de inflexão de falha, conhecidas na literatura como *fault-bend folds*, são estruturas geradas pelo movimento de uma frente de empurrão sobre uma rampa, quando o empurrão desenvolve uma geometria em patamar-rampa-patamar (*flat-ramp-flat*) (Figura 7).

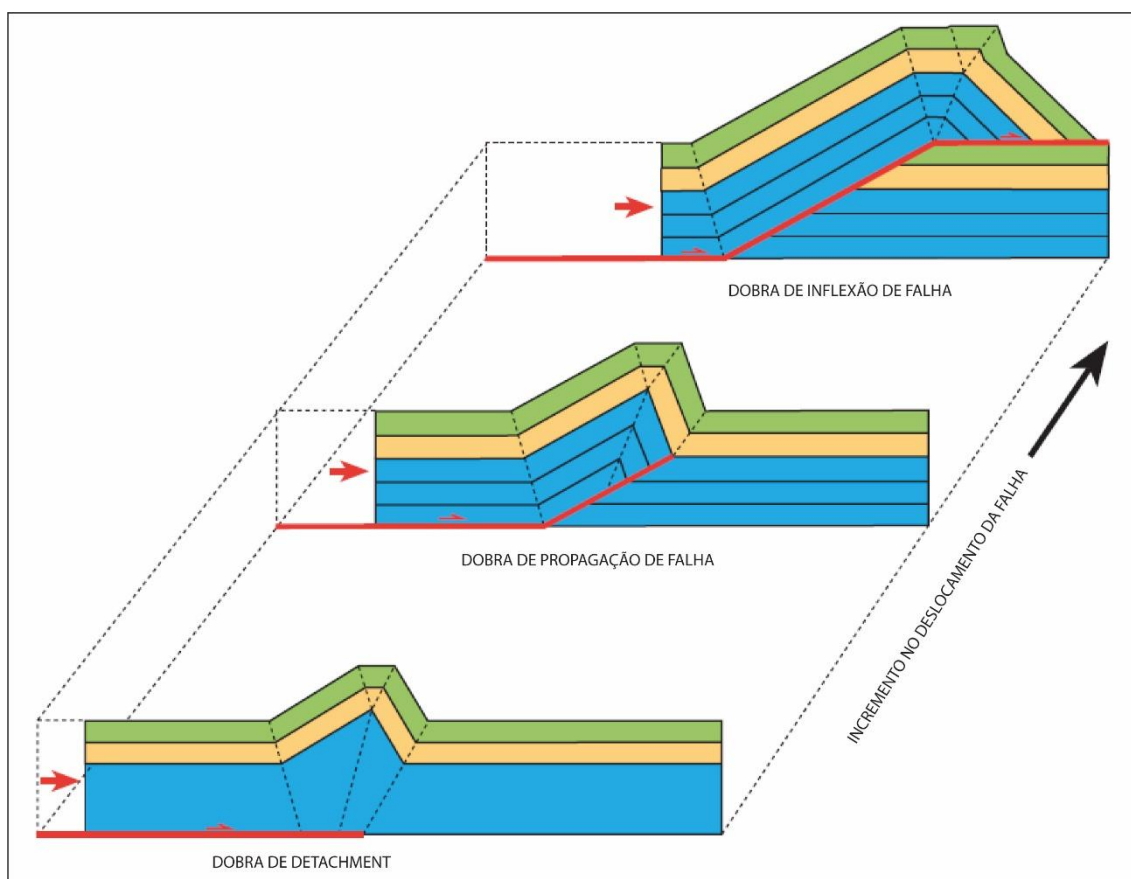


Figura 7: Esquema de classificação de dobras relacionadas a empurrões. Modificado de McClay (2004).

As dobras de inflexão de falha foram inicialmente discutidas por Suppe *et al.* (1983), com a teoria das dobras de inflexão de falha convencionais, seguida pela teoria das dobras de inflexão de falha por cisalhamento, uma nova classificação proposta por Suppe *et al.* (2004). Ambas as teorias se baseiam em análises geométricas qualitativas e quantitativas dos estratos sintectônicos (seções de crescimento), dos planos de falha e dos estratos dobrados. São considerados aspectos como o ângulo de mergulho dos empurrões, dos flancos e dos planos axiais das dobras, além do deslocamento e da espessura do descolamento, possibilitando reconstruções cinemáticas e previsões sobre o comportamento ds estruturas em subsuperfície.

A teoria das dobras de inflexão de falha clássicas (SUPPE *et al.*, 1983) considera modelos onde não existe cisalhamento interno às camadas do teto da falha, resultando em dobras com o mergulho do flanco anterior paralelo ao plano de falha (Figura 8). O crescimento das dobras se dá estritamente por mecanismo de migração de bandas *kink*, não havendo rotação de flancos, resultando em seções de crescimento não deformadas.

Já a teoria de dobras de inflexão de falha por cisalhamento (*shear fault-bend folds*) (SUPPE *et al.*, 2004) considera a estratigrafia mecânica das camadas acima do descolamento. Contrariamente às dobras de inflexão de falha clássicas, o flanco anterior das dobras apresenta mergulhos mais suaves que o mergulho das respectivas falhas de empurrão (Figura 8). Com o aumento da deformação, o ângulo de mergulho do flanco anterior e o comprimento dos flancos aumentam progressivamente. O crescimento das dobras de inflexão de falha por cisalhamento geralmente se dá pela combinação de mecanismos de migração de bandas *kink* e rotação dos flancos, resultando em seções de crescimento deformadas, a depender da velocidade da deformação em relação à taxa de aporte sedimentar.

Os aspectos geométricos das dobras definem ainda se a deformação se deu por cisalhamento puro ou simples (Figura 8). Nas dobras de inflexão de falha por cisalhamento simples o deslocamento da falha de descolamento fica restrito à rampa do empurrão, não havendo deslocamento na porção basal do descolamento. Já nas dobras de inflexão de falha por cisalhamento puro as camadas basais deslizam sobre o descolamento, apresentando encurtamento paralelo e espessamento perpendicular aos estratos.

O principal critério qualitativo para distinção entre dobras de inflexão por cisalhamento simples ou puro se dá pela análise da superfície axial do sinclinal formado logo acima da base do empurrão (SUPPE *et al.*, 2004). Nas dobras de inflexão por cisalhamento simples, o plano axial do sinclinal encontra-se alinhado à base do empurrão (Figura 8). Nas dobras de inflexão por cisalhamento puro, no entanto, o plano axial do sinclinal não permanece alinhado à base da falha de empurrão devido ao espessamento dos estratos (SUPPE *et al.*, 2004). Outro critério de distinção citado pelos autores é a observação dos planos axiais do sinclinal e do anticlinal do flanco anterior das dobras. Em dobras de inflexão por cisalhamento puro, os planos axiais terminam ambos contra o mesmo horizonte, ao passo que em dobras de inflexão de falha por cisalhamento simples, os planos axiais terminam ambos contra a rampa de empurrão, porém em horizontes distintos (Figura 8).

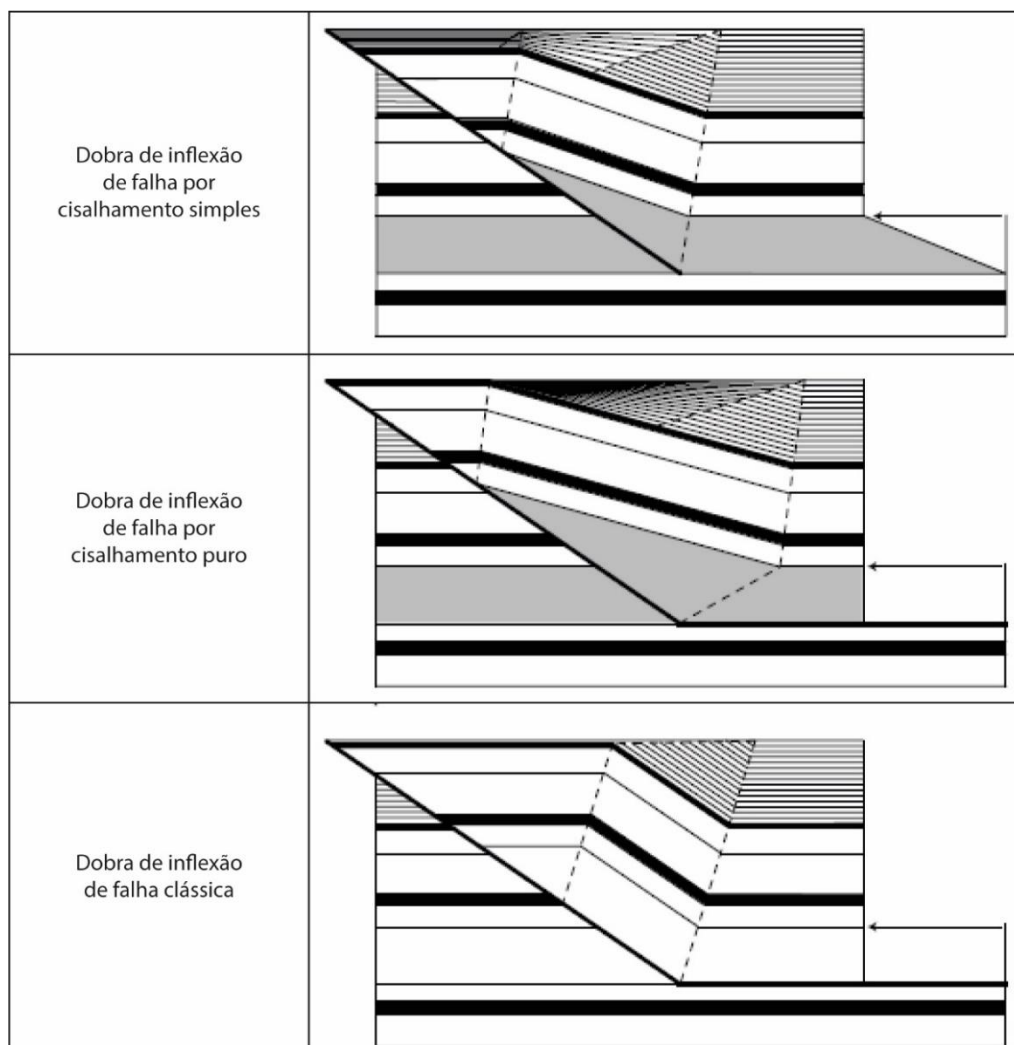


Figura 8: Modelos para classificação de dobras de inflexão de falha. Modificado de Suppe *et al.* (2004).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A base de dados utilizada neste trabalho consistiu em um volume sísmico migrado em tempo pré-empilhamento (0268_BM_PAMA_1_2) e um poço exploratório (1-MAS-11-MA). Os dados sísmicos e de poço foram adquiridos sob demanda da Petrobras e atualmente fazem parte do acervo de dados públicos sob domínio da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), disponibilizados para fins de pesquisa.

O poço 1-MAS-11-MA foi perfurado na plataforma externa da Bacia do Pará-Maranhão durante a década de 70, atingindo profundidade máxima de 4.502 m (Figuras 1 e 2). O dado foi disponibilizado com perfis geofísicos básicos (raios gama, resistividade, sônico e densidade), litologias, topos de formação e perfil sísmico de velocidade (*check shot data*). Apesar dos indícios de óleo e gás encontrados em arenitos turbidíticos e calcarenitos, o poço foi declarado sub-comercial. A perfuração percorreu (do topo até a base) uma sucessão de cerca de 2.200 m de calcarenitos e calcilitos, com pontuais arenitos intercalados (Formação Ilha de Santana); aproximadamente 1.500 m de uma sequência predominantemente clástica composta por pelitos e arenitos com raras rochas carbonáticas intercaladas (Formação Travosas); aproximadamente 300 m de arenitos e argilitos capeados por uma sucessão de calcarenitos (Grupo Caju); e aproximadamente 500 m de arenitos com pequenas intercalações de siltitos (Grupo Canárias).

O volume sísmico utilizado cobre uma área de 3437 km² ao longo da plataforma externa e talude no SE da bacia (Figura 1). As *in-lines* apresentam orientação NE, com 57 km de comprimento, totalizando 2.315 seções espaçadas em 25 m. As *cross-lines* apresentam 55 km de comprimento, totalizando 2.376 seções espaçadas em 12,5 m. As seções estão representadas em tempo duplo, com o tempo variando de 0 a 8.100 ms. As reflexões apresentam polaridade normal de acordo com os padrões da SEG, em que um aumento na impedância acústica com a profundidade é representado por uma polaridade negativa (picos brancos).

A metodologia desenvolvida consistiu no controle de qualidade e carregamento dos dados, mapeamento de horizontes sísmicos e estruturas, análise estrutural e construção do modelo 3D. Isso possibilitou a criação de um modelo cinemático esquemático e a proposição de um sistema petrolífero hipotético e sua carta de eventos.

A área mapeada se estende por 890 km² ao longo da porção SE do volume sísmico. Dois horizontes sísmicos foram mapeados, Topo do Rife e Topo do Campaniano,

utilizando os topos de formação no poço 1-MAS-11-MA como referência (Figura 2). Adicionalmente, uma discordância erosiva capeando os estratos da seção de crescimento das dobras foi mapeada e interpretada como a Discordância do Mioceno médio (Figura 2), um evento erosivo com expressão em toda margem equatorial. Devido à falta de dados bioestratigráficos no poço 1-MAS-11-MA, as idades dos horizontes foram tentativamente propostas por correlações estratigráficas, portanto não devem ser utilizadas como referência absoluta.

O horizonte do Topo do Rifte (Figura 2) foi interpretado com base no marcador do topo do Grupo Canárias no poço 1-MAS-11-MA. Nas seções sísmicas esse horizonte é facilmente reconhecível como um par de reflexões de alta amplitude mostrando truncamentos erosivos abaixo dele, tanto na área da plataforma externa quanto no sopé do talude. Além disso, algumas das reflexões acima tendem a terminar em *downlap* contra este horizonte, reforçando a tese de uma discordância relacionada ao processo de *break-up*, separando as rochas da fase rifte (Grupo Canárias) das rochas mais jovens da fase drifte (Grupo Caju e Humberto de Campos) (Figura 2).

O horizonte do Topo do Campaniano foi interpretado com base no topo da Formação Travosas no poço 1-MAS-11-MA, marcando o início da fábrica carbonática da Formação Ilha de Santana sobre a plataforma (Figura 2). Sua idade foi interpretada por correlações estratigráficas com a carta cronoestratigráfica da bacia proposta por Soares *et al.* (2007). A transição entre as formações Travosas e Ilha de Santana é facilmente reconhecida em perfis de resistividade, em que as rochas carbonáticas da Formação Ilha de Santana apresentam valores mais altos quando comparados às rochas siliciclásticas da Formação Travosas (Figura 2). Na plataforma externa esse horizonte está posicionado entre feixes de reflexões com terminações em *toplap/downlap* (sismofácies oblíquas a sigmoidais), separando duas sucessões progradacionais dentro do ciclo marinho regressivo principal que ocorreu entre o Campaniano médio e o Eoceno médio.

5. ARTIGO CIENTÍFICO

The Pará-Maranhão basin gravitational thrust and fold belt and its related deep-water petroleum system

Adler Pereira Soares^{a*}, Juliano Kuchle^a, Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo^b,
Leonardo Muniz Pichel^c, Francyne Bochi do Amarante^a

^aInstituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brazil

^bInstituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Av. Athos da Silveira Ramos, 745/G04-49, 21941-916, Ilha do Fundão - Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

^cDepartment of Earth Sciences, University of Bergen, Norway

*Corresponding author: adler.soares@gmail.com

Abstract

During the middle Eocene, the slope region of Pará-Maranhão, Foz do Amazonas and Barreirinhas basins developed gravity-driven thrust and fold belts due to gravitational failure along the upper slope zone accompanied by compression in the toe slope. In this study, we analyse a gravitational thrust and fold belt located at the southeastern slope of Pará-Maranhão basin through the interpretation of a 3D seismic reflection volume and borehole data. Two horizons (Albian Top and Campanian Top) and 31 faults were mapped over 890 km², totalizing 16 normal faults, 14 thrust faults and one main detachment zone. The faults trend predominantly NW - SE, parallel to the slope trend. We identified three tectonic domains: i) extensional, ii) translational and iii) compressional, which together compose a linked extensional-compressive system. The mapped area was further divided into three different zones according to variations in the

3D architecture of the detachment zone and related structures. These geometrical heterogeneities were controlled by factors like different rheologies, different paleoslope settings and/or variations in the pore pressure along the detachment layer, impacting the way that the deformation spread over the area. The growth strata analysis suggests that the deformation in the compressive domain reached the paleoseafloor forming structural highs that acted as sediment dams and blocked sediment transport towards the deep-basin. Growth strata also demonstrates a dominantly break-forward pattern for the thrusting, although out-of-phase thrusts were also observed locally. Based on these analyses, we propose a 2D kinematic model for each of the three interpreted zones and a petroleum system model where we recognize potential fold-related traps involving Cretaceous-Paleogene turbidites reservoirs sourced by Aptian marine-lacustrine shales.

Key-words: EQUATORIAL ATLANTIC; BRAZILIAN EQUATORIAL MARGIN; PARÁ-MARANHÃO BASIN; GRAVITATIONAL TECTONICS; GRAVITATIONAL THRUST AND FOLD BELTS; PETROLEUM SYSTEMS.

Introduction

During the middle Eocene, notably along the slope region of the Foz do Amazonas, Pará-Maranhão and Barreirinhas basins, gravitational fold and thrust belts were formed, affecting siliciclastic sequences of up to 10 km thickness (ZALÁN, 2011). Gravity induced thrust and fold belts are commonly formed in deep and ultra-deep-water settings of passive margin basins as part of linked extensional-compressional systems. These systems form due to gravitational failure in the outer shelf and upper slope as rocks glide downslope over a detachment surface formed above weak lithologies (salt or shale)

(ROWAN et al., 2004; BUTLER AND PATON, 2010; PEEL, 2014). As the movement speed decreases due to either a decrease in the gradient of the detachment surface or to a physical barrier, the rocks are deformed forming the fold and thrust belts. These systems have been studied extensively in the last few decades because of their potential for developing petroleum systems (e.g.: Gulf of Mexico, Nigeria and Equatorial Guinea oil provinces) (MEYER et al., 2005; ROWAN et al., 2004; BILOTTI AND SHAW, 2005; DAILLY et al., 2002).

Likewise, the Brazilian equatorial margin presents good perspectives for hydrocarbon exploration, as verified by two recent commercial discoveries at Ceará and Potiguar basins, Pecém and Pitú prospects respectively, both drilled on deep-water settings. Notwithstanding, despite the long aged exploratory efforts since the 70's, the Pará-Maranhão basin never emerged as an expressive oil producer, limited to sub-commercial discoveries along the shelfal area. The deep-water settings of the basin remain as an exploratory frontier area, with parsimonious well drilling and much data and knowledge yet to be gathered.

Recent discoveries on deep and ultra-deep water turbidites in the African equatorial margin, like the Jubilee giant field, producing around 100.000 bbl/d (DAILLY et al., 2013; ZALÁN, 2015) and Tweneboa-Enyenra-Ntomme (TEN) fields, producing around 80.000 bbl/d (MAIA de ALMEIDA et al., 2020; ZALÁN, 2015), point to the existence of other world-class fields in the conjugated South American equatorial margin. These expectations were proven right with the discovery of Zaedyus field in the French Guiana (PELLEGRINI AND RIBEIRO, 2018). All these discoveries share the same petroleum system, Albian-Cenomanian-Turonian marine source rocks and Cenomanian to Maastrichtian turbidite reservoirs (ZALÁN, 2015). The findings renewed the exploratory perspectives within the deep-water settings of the Brazilian Equatorial

Margin, which shares paleogeographical and evolutive aspects with the Gulf of Guinea Oil Province (Côte d'Ivoire, Ghana, Central, Pond, Keta, Togo and Benin offshore basins). This area, located between the Romanche and Saint Paul fracture zones along the African side, became an important oil province in the last two decades.

This study, thus, aims to map and characterize structures of the linked extensional-compressive domains of the Pará-Maranhão Basin, analysing the 3D geometry and kinematics of the structures and their deformed strata. Our ultimate aim is to propose a hypothetical petroleum system to the deep-water settings of the basin.

Geological Settings

The Pará-Maranhão basin encompasses an area of 48,000 km² along the coastal area of Pará and Maranhão states, being part of the Brazilian Equatorial Margin (BEM). The basin limits are defined by the Foz do Amazonas basin on NW and Barreirinhas basin on SE (Figure 1).

The Brazilian Equatorial Margin presents some particularities regarding its evolution when compared to the extensively studied eastern margin basins: (1) **the late start of the rift phase (Aptian – Albian)**; (2) the strike-slip tectonics controlling the rift phase, resulting in several pull-apart basins with diachronic evolution; and (3) the absence of the evaporitic phase, typical in most of the eastern margin basins.

The tectonic-stratigraphic evolution on the Pará-Maranhão basin, as well as for the whole BEM, is typically divided into three main phases: pre-rift, rift, and post-rift or drift (SOARES, et al. 2007; ZANOTTO AND SZATIMARI, 1987) (Figure 2). Along the Jurassic period, the proto-Equatorial Atlantic basins lied contiguous to West Africa, with the Palaeozoic synclisis of Parnaíba and Amazonas basins partially entering the African continent (ZANOTTO AND SZATIMARI, 1987). At Barreirinhas basin, practically a

southeastern continuation of the Pará-Maranhão basin deposits, Devonian rocks were sampled at the basin bottom and correlated to the Canindé Group, composed by Palaeozoic rocks of the intracratonic Parnaíba Basin (SOARES *et al.*, 2007). Despite the sample absence of this rock interval along the Pará-Maranhão Basin, a package of reflections on seismic sections, located at the bottom of the basin, has been correlated to these Palaeozoic intracratonic deposits (SOARES *et al.*, 2007). The rocks related to this interval compose the pre-rift phase, which together with Precambrian metamorphic rocks form the basement for the Meso-Cenozoic tectono-sedimentary phases (Figure 2).

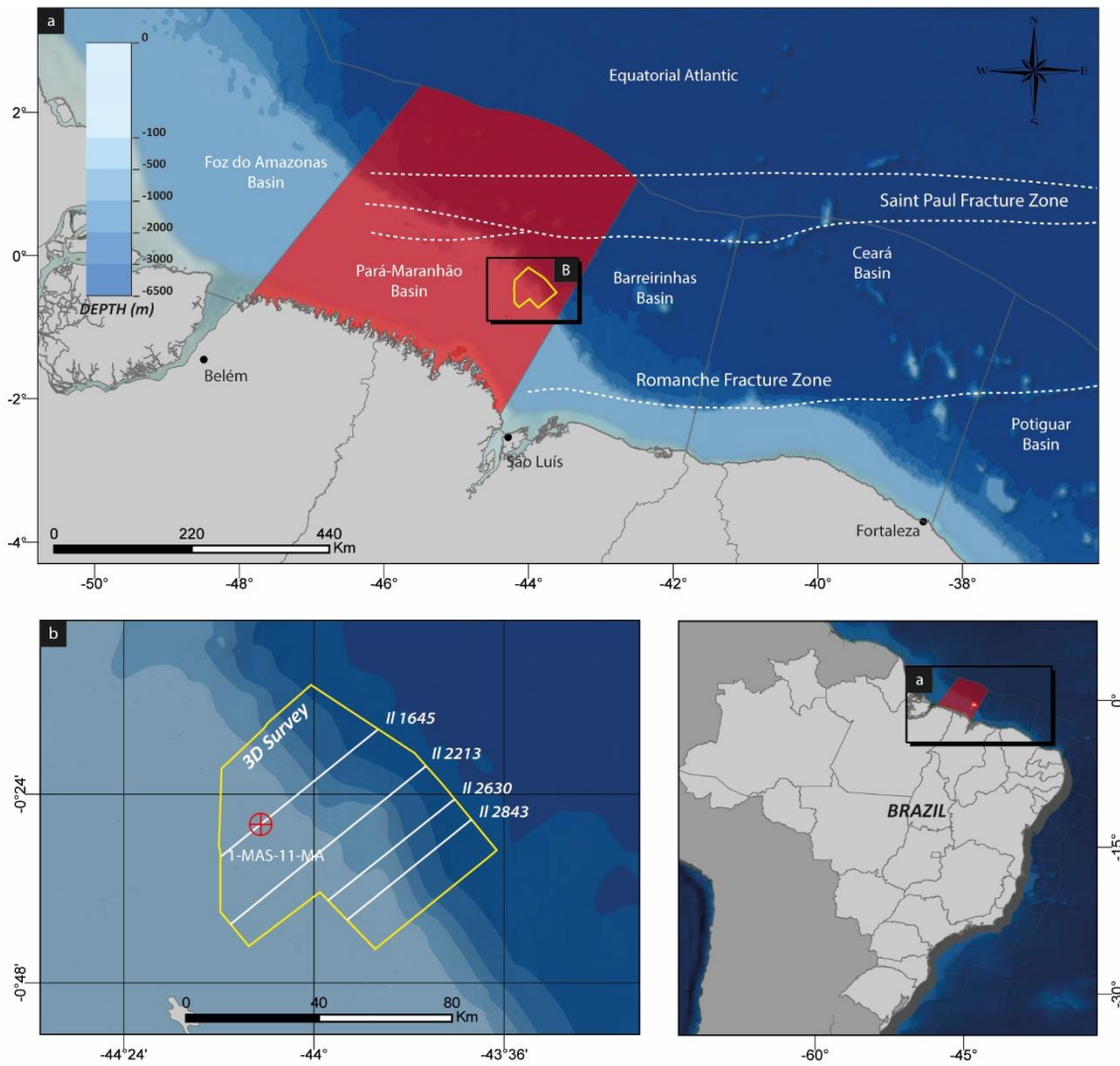


Figure 1: (A) Map of the Brazilian Equatorial Margin basins. Pará-Maranhão basin highlighted in red. The dashed white lines are the oceanic fracture zones. The yellow polygon marks the dataset location. (B) Detailed map of the dataset. White lines are the seismic sections shown on results. The red crossed circle marks the well location. Fracture zones drawn after Zalán (2011).

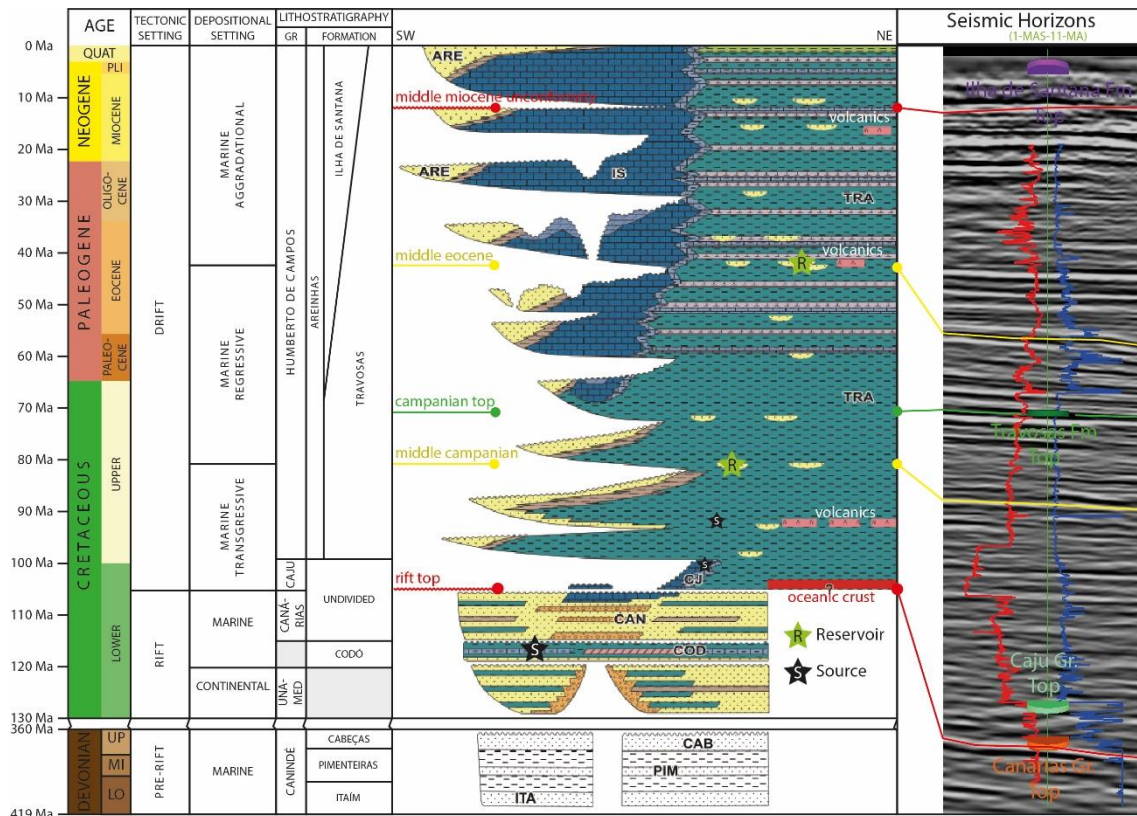


Figure 2: Pará-Maranhão basin chronostratigraphic chart (modified from Soares et al., 2007). Black and green stars are source and reservoir rocks respectively, and the size of the stars indicates the relevance of the elements in the hereafter proposed petroleum system. Seismic horizons referenced on the text are shown in red (unconformities), yellow and green. On the right side, an inset of Inline 1645 intersecting the well 1-MAS-11-MA, used as reference for the seismic horizons mapping. Formation tops are shown in orange (Canarias Group), cyan (Caju Group), green (Travosas Formation) and purple (Ilha de Santana Formation). Gamma ray and resistivity logs are shown in red and blue respectively.

During the Neocomian, with the progress of the South Atlantic opening, a change in the tectonic transport direction conditioned the onset of the rift phase along the proto-Equatorial Atlantic, causing a series of E-W and NW-SE pull-apart basins (ZANOTTO AND SZATIMARI, 1987). This event, analogous to the syn-transform phase proposed

by Matos (2000), marks the occurrence of the first spreading centres that led to the opening of the Equatorial Atlantic. The Chain, Romanche and Saint Paul fracture zones (Figure 1) played fundamental roles on the development of transpressive and transtensive pull-apart basins. These pull-apart troughs compose the rift phase of the Pará-Maranhão basin (Figure 2), showing some differences if compared to classic divergent rift basins, like the absence of listric faults and border fault gravitational aprons (MATOS, 2000).

From the Upper Albian onwards, crustal cooling became the main subsidence mechanism (ZANOTTO AND SZATIMARI, 1987), marking the onset of the drift phase. The break-up unconformity is aged by Soares *et al.* (2007) in 102 Ma. The drift phase is subdivided by Soares *et al.* (2007) into three main depositional cycles according to the dominant stacking patterns, with an initial marine transgression (Upper Albian – Mid Campanian), followed by a marine regression (Mid Campanian – Mid Eocene), overlain by a marine aggradational cycle that remains up to present days (Figure 2).

The transgressive cycle is composed at the base by carbonate rocks of the Caju Group, an incipient carbonate platform that started to form still on the rift phase, followed by siliciclastic rocks of the Humberto de Campos Group, composed by shelfal sandstones of the Areinhas Formation and deep-water claystones and turbidites of the Travosas Formation (Figure 2). This cycle is marked by the Turonian global anoxic event (SOARES *et al.*, 2007), easily recognized on well logs along the whole equatorial margin (Figure 3). It is also remarkable the presence of a basic volcanic event during this interval, aged in 90 Ma, whose effect magnified the erosions across the basin (SOARES *et al.*, 2007).

The regressive cycle is composed at the base by the Areinhas and Travosas formations, until the Early Maastrichtian, when an incipient carbonate platform started to nucleate (Figure 2). This carbonate platform would dominate the sedimentary record over

the shelf in the next million years, composing the Ilha de Santana Formation, composed mainly by calcarenites and grainstones at the inner shelf, wackestones and mudstones at the outer shelf; and marls, pebbly mudstones, shales and turbidites on deep waters (SOARES et al., 2007). Eventually, the siliciclastic contribution to the basin overprinted the carbonate fabric, resulting in intercalations with deltaic sandstones of the Areinhas Formation along the inner platform area (Figure 2). The upper limit of the regressive cycle represents an important erosive event during the Middle Eocene, which led to the incision of valleys on the carbonate platform (SOARES *et al.*, 2007).

The gravitational processes associated to the formation of the thrust and fold belts took place during the Middle Eocene (SOARES et al., 2007; ZALÁN, 2011). Based on seismic features, the above authors proposed a volcanic event as the cause for the gravitational tectonic event. According to them, this event had great influence over the gravitational processes, acting as a physical barrier for the development of the thrusts and folds on the compressive domain, and moreover, being the triggering mechanism for gravitational failure on the slope area. The thrust and fold belts extend through thousands of km² between the Pará-Maranhão and Barreirinhas basins, affecting a Coniacian to Holocene rock interval (ZALÁN, 2011). The deformation resulted in major alterations of the ocean floor physiography, developing structural rises and lows, defining paths and patterns for deep-water sedimentation.

The aggradational cycle began around Lutetian, with predominance of carbonate sediments of the Ilha de Santana Formation (Figure 2). An important transgressive event, known as the Pirabas Sea, occurred during this cycle, representing the maximum expansion of the carbonate platform (SOARES *et al.*, 2007).

The Upper Miocene unconformity (Figure 2) is one of the main unconformities at the equatorial margin, with expression over seismic sections, cores and outcrops

(ROSSETTI, 2001). Above this unconformity occurs a new siliciclastic progradation over the platform, represented by the coastal sediments of Barreiras Formation, widely spread over the equatorial margin.

Dataset and Methods

The dataset used in this study consisted in a pre-stack time migrated multi-channel 3D seismic volume (0268_BM_PAMA1_2) and an exploratory well (1-MAS-11-MA) (Figure 1). The seismic and well data were acquired by Petrobras and make part of the public data assets over domain of the Brazilian National Agency for Oil, Gas and Biofuels (ANP), supplied for research purposes.

The well 1-MAS-11-MA was drilled on the outer shelf area during the late 70's, with maximum depth of 4502 m. The data was provided with standard log suites (gamma ray, resistivity, sonic and density), lithological data, formation tops and check shot survey. Despite the gas and oil shows on turbiditic sandstones and calcarenites, the well was declared sub-commercial.

The well cut through ~2,200 m of intercalated calcarenites and calcilutites (Ilha de Santana Formation), with minor sandstones occurrences; ~1,500 m of a predominantly clastic sequence composed by mudrocks and sandstones, with minor carbonate rocks (Travosas Formation); ~300 m of sandstones and claystones capped by calcarenites (Caju Group); and ~500 m of sandstones with small siltstone intercalations (Canárias Group).

The used seismic volume covers an area of 3,437 km² along the outer shelf and slope on the SE of the basin (Figure 1). The in-lines are 57 km long and NE-oriented, totalizing 2,315 sections spaced in 25 m. The cross-lines are 55 km long, totalizing 2376 sections spaced by 12,5 m. The sections are presented in time (TWT), with time ranging from 0 to 8100 ms. Reflections present normal polarity according to the Society of

Economic Geologists (SEG) convention, where an increase in the acoustic impedance with depth is represented by a negative polarity (white peak).

The methodology consisted in quality control of the data, followed by seismic mapping of key horizons and structures; structural analysis and 3D model building. This afforded the generation of a quasi-3D kinematic model for the distinct structural zones mapped (A, B and C), and the proposal of a hypothetical petroleum system model with its related event chart (cf. Magoon and Dow, 1994).

The analysed area extends for 890 Km² along the SE portion of the seismic volume (Figures 1 and 4). Two seismic horizons, Rift Top and Campanian Top, were mapped using formation tops on well 1-MAS-11-MA as reference (Figures 2 and 3). Additionally, we mapped a major erosional unconformity on top of the growth strata succession (Figures 2, 3, 6, 7, and 8), interpreted as the Miocene Unconformity, a regional erosional event with expression along the whole equatorial margin (SOARES et al, 2007). Due to the lack of biostratigraphic data on the well 1-MAS-11-MA, all the ages are tentatively proposed by stratigraphic correlations and should not be used as absolute references.

The Rift Top horizon (red) was interpreted based on the Canarias Group top marker provided with the well 1-MAS-11-MA (Figures 2 and 3). It is easily recognized on seismic sections as a pair of high amplitude reflections showing erosive truncated reflections beneath it, both on the outer platform as well as on the toe-of-slope area (Figures 3 and 4). Furthermore, some of the above reflections tend to terminate against this horizon, reinforcing the thesis of an unconformity related to the break-up process, separating the rift stage rocks (Canarias Group) from the younger drift stage rocks (Caju Group and Travosas Formation).

The Campanian Top horizon (green) was interpreted based on the Travosas Formation top marker. It marks the onset of the carbonate fabric (Ilha de Santana Formation) over the shelf (Figures 2 and 3). Its age was interpreted by stratigraphic correlation with the chronostratigraphic chart presented by Soares et al. (2007). The transition between the Travosas and Ilha de Santana formations is easily recognized on resistivity logs, where the Ilha de Santana Formation carbonate rocks present higher resistivity values when compared to the Travosas Formation siliciclastic rocks (Figures 2 and 3). On the outer platform area, this horizon lays between bundles of toplap/downlap coupled reflections (oblique to sigmoidal seismic facies after Mitchum Jr. et al., 1977), separating two progradational successions inside the main regressive cycle that took place between the Middle Campanian and Middle Eocene (yellow horizons on Figure 3).

Results and Discussions

In addition to the horizons, 16 normal faults, 14 thrust faults and a main detachment zone were mapped (Figure 4, Figure 5), composing a linked extensional-compressional system. The faults present NW – SE trend and most of them root over the detachment zone. The detachment zone usually follows a positive reflection above a seismically homogeneous layer (Figures 6, 7 and 8).

The linked system comprises three tectonic domains. An extensional domain is located on the upper slope and extends for ~8 km basinward. It presents predominantly synthetic, basinward-dipping normal faults, bounding landward-dipping growth strata (Figures 3, 6, 7, and 8). Rollover folds are commonly associated to these structures (Figure 7). Minor secondary antithetic faults also occur.

The translational domain is characterized by an area between the extensional and the compressive domains where there is no expressive deformation, with the strata gliding

over the detachment surface but not developing major structures (Figures 6 and 8). This domain is absent where the deformation occurred more intensely (Figures 3 and 7), with a more abrupt transition between the extensional and compressive domains, as discussed further.

The compressive domain extends for more than 8 km basinward along the toe slope, showing expressive basinward verging imbricated thrust faults (Figures 4, 5, 6, 7 and 8). Fault propagation folds and fault bend folds occur associated to the thrust faults, preserving up to 600 m thick growth strata deposits (~500 ms on seismic sections) (Figures 6, 7, and 8). These structures reach up to 4 Km in wavelength and 10 Km in width and are present all over the toe-of-slope of the basin, composing the thrust and fold belt.

The mapped area was also divided into three laterally bounded zones, named zones A, B and C (Figures 4 and 5), according to the geometry and 3D architecture of the detachment zone and its related structures. The following sections discuss the main features of these zones, focusing on their compressive domain where most significant variations were observed.

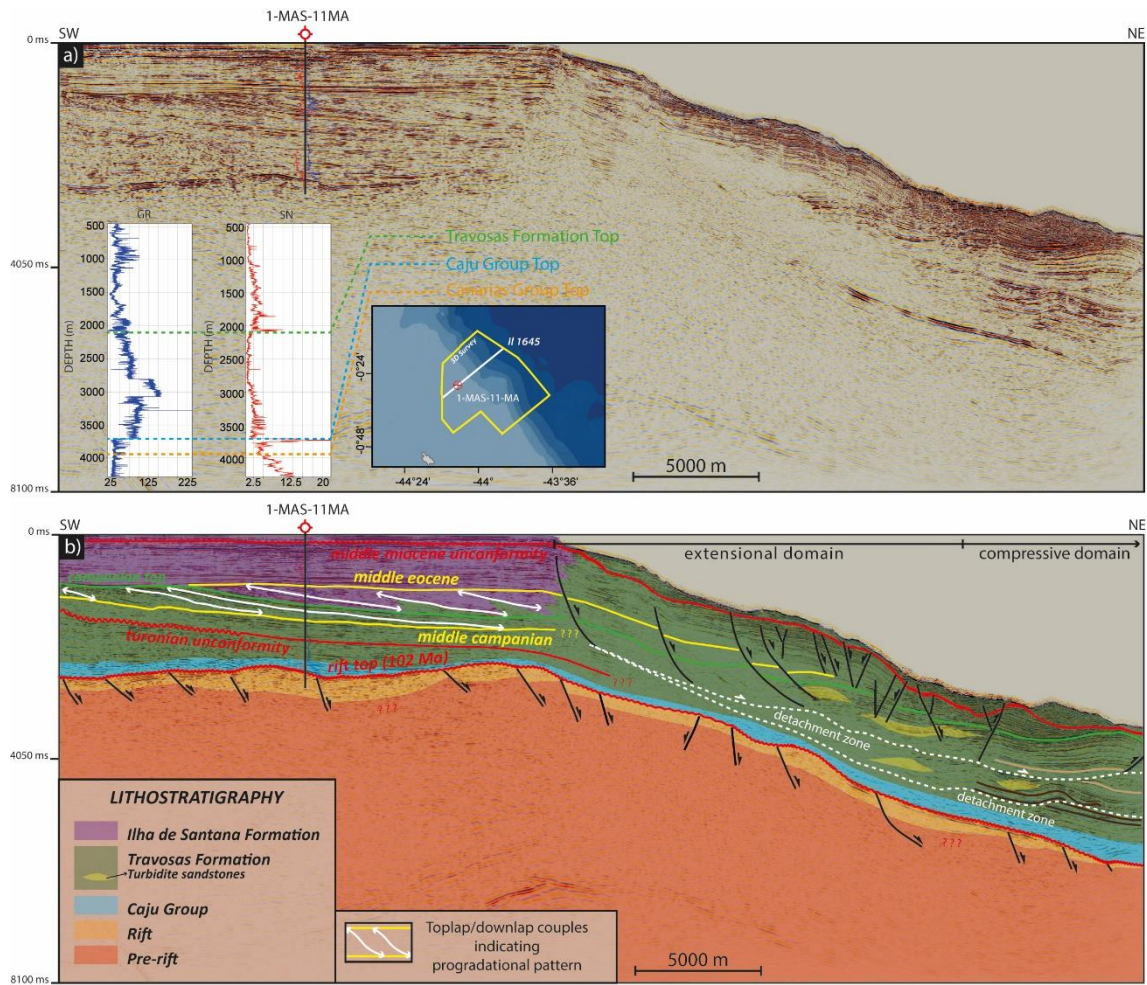


Figure 3: Inline 1645, intersecting the well 1-MAS-11-MA used as reference for horizons mapping. (A) Uninterpreted section. Section location and well logs (gamma ray and resistivity in blue and red respectively) are shown on the left bottom. (B) Interpreted section. Unconformities are shown in red; top and bottom of the regressive cycle are shown in yellow (Middle Eocene and Middle Campanian, respectively); Campanian top is shown in green. The dashed white lines mark the detachment zones; continuous black lines are normal and thrust faults. Lithostratigraphy and symbology legends on Figure 3b.

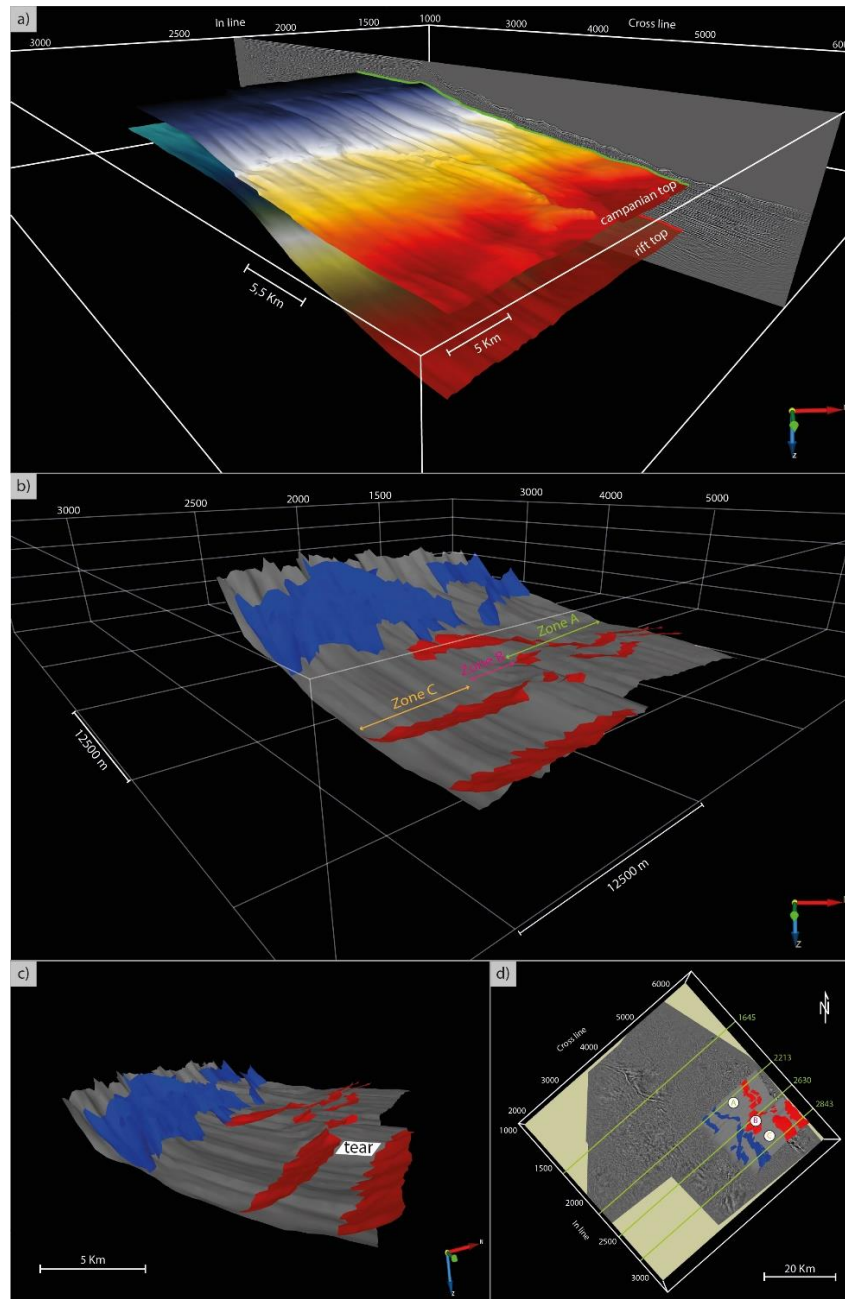


Figure 4: Horizons and structures shown on a 3D scene. (A) 3D view of Campanian top (green) and break-up unconformity (red) horizons, emphasizing the Campanian top morphology (seen from east). (B) 3D view of the mapped structures, seen from east. Normal faults are shown in blue, thrust faults in red and the detachment in grey. Zones A, B and C are marked by the green, white and orange two headed arrows, respectively. (C) Lateral view of the linked extensional-compressive system showing the position of a tear fault accommodating the deformation between zones B and C. (D) Map view of the dataset, showing the position of the referenced seismic sections, the mapped structures and the zones A, B and C.

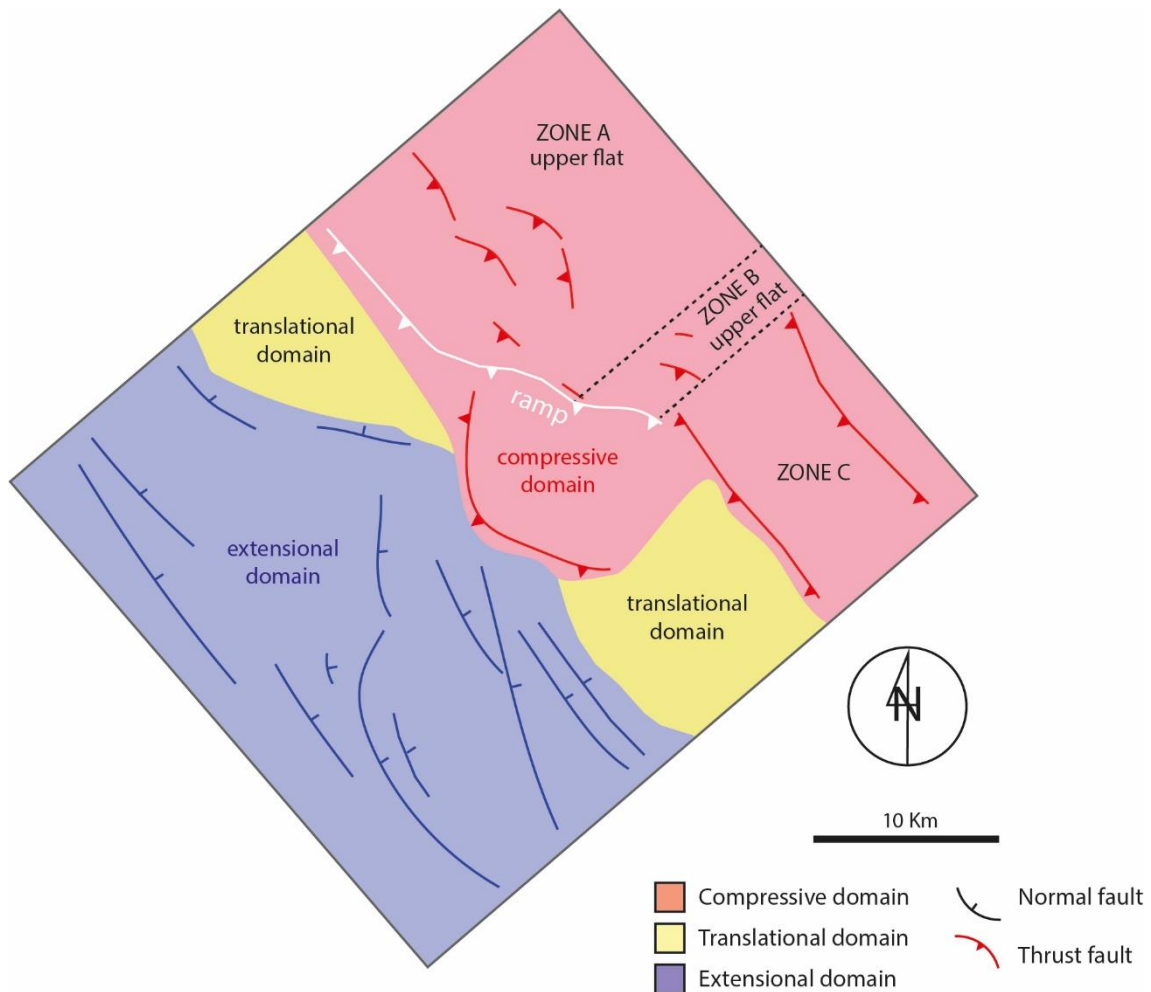


Figure 5: Schematic structural map showing the distribution of the interpreted tectonic domains. Notice the absence of the translational domain on the central area due to a retreat of the compressive domain structures. The dashed lines bounding Zone B from the other zones are tear faults accommodating the movement variations between the three zones

Zone A

The extensional domain on Zone A extends for approximately 5.5 Km across the upper slope (Figure 6), with its deformation distributed along three main listric faults. This domain is followed by a wide area (approximately 5 Km long) of nondeformed strata that glided over the detachment zone toward the compressive domain (Figure 5), characterizing the translational domain.

The Zone A is marked by thrust faults and related folds distributed along two detachment zones (Figure 6). Two sets of structures can be distinguished, one related to a lower detachment, affecting older strata, and another related to an upper detachment, which developed the major structures. The detachments coincide with continuous, high-amplitude positive reflections bounding a seismically homogeneous interval, likely corresponding to a thick (~200 ms) shale layer (Figure 6).

The upper detachment dips sub-parallel to the slope until it reaches the toe-of-slope, where it ramps up gently marking the beginning of the compressive domain (Figure 6). At this point the detachment displays a flat-ramp-flat geometry, overlain by thrusts showing decreasing dip angles basinward, typical of break-forward propagation systems (ROWAN et al., 2004) (Figure 6). The ramp likely developed as a shortcut thrust, whose mechanical and kinematic path was easier to develop than the previous main thrust (McCLAY, 1992). The ramp then transitions to an upper flat, likely associated with an upper shale layer. The horizontal displacement over the ramp reached up to 1 Km, measured by displacement along the blue kinematic marker (Figure 6).

Although the fault-bend-fold growth strata were partially eroded by the Miocene Unconformity, the remaining reflections onlapping the back limb of the fold (yellow arrows on Figure 6) indicate that the deformation affected the paleoseafloor at that time. The same reflections are deformed by the more proximal fault propagation fold suggesting possible out-of-phase reactivations.

Zone B

The Zone B extensional domain extends for more than 8 Km, partially overlapping the compressive domain structures (Figure 7). It is characterized by a set of listric faults that root above the detachment and bound landward rotated growth strata (Figure 7).

Antitethic faults and rollover folds are also visible (Figure 7). The translational domain is absent on this zone because of a retreat on the compressive domain structures related to the other zones (Figure 5). Thus, this zone displays a more abrupt transition between the extensional and compressive domains. The normal faults overlapping the thrust fault seen on Figure 7 is likely related to the basinward propagation of the deformation.

The detachment follows the same flat-ramp-flat geometry shown on Zone A, but presents a steeper ramp (20° against 16°). Another difference is the absence of a lower detachment zone (Figure 7). The horizontal displacement over the ramp reaches up to ~600 m (measured along the light brown marker, Figure 7). Besides presenting lower horizontal displacement, the folding on Zone B reached shallower depths, so that the area became a structural high related to the other zones. This is clearly depicted on the Campanian Top horizon morphology (Figure 4a).

The fault-bend-fold above the ramp on Figure 7 presents growth strata onlapping a broadly tabular pre-kinematic succession capped by the Campanian Top horizon. These onlaps are indicated by yellow arrow heads on Figure 7d. It is visible that the fault-propagation-fold located on the left side of Figure 7d deformed the fault-bend-fold growth strata, suggesting out-of-phase reactivations as observed on Zone A.

The pronounced onlaps (yellow arrows on Figure 7) of growth strata over the fore limb of the fault-bend-fold suggest lower sedimentation rates compared to deformation rates. Contrarily, the growth strata onlaps against the back limb are much less pronounced, suggesting higher sedimentation rates compared to deformation rates. This indicates that the fold affected the paleoseafloor and acted as a sediment dam, blocking sediment transport towards the basin.

Zone C

The extensional domain on Zone C extends for approximately 8 Km, composed by two main listric faults and their subordinated synthetic normal faults, which tend to terminate against the Campanian Top horizon rather than against the detachment surface (Figure 8). As in Zone A, the extensional domain here is followed by an area of nondeformed strata extending for approximately 6.5 Km until reaching the compressive domain structures, characterizing a translational domain (Figures 5 and 8).

The deformation on the compressive domain was accommodated by thrust faults and their related fault propagation folds, configuring a flat-ramp geometry to the detachment, without developing an upper flat and a fault-bend-fold as seen on the other zones (Figure 8).

The fault propagation folds present gentle and long back limbs contrasting with steep and short fore limbs (Figure 8), reaching up to 3 Km in wavelength. The growth strata (yellow arrows on Figure 8) onlaps the Top Campanian Horizon and is fairly distributed along the fore and the back limb of the folds (Figure 8).

The horizontal displacement of the thrusts reached 1 Km, measured along the lilac marker on Figure 7. The thrusts are connected to the ramp and upper flat on Zone B, as a laterally continuous thrust propagation front, but on a lower level. We propose the existence of a tear fault accommodating the deformation between zones B and C, as shown on Figure 4c.

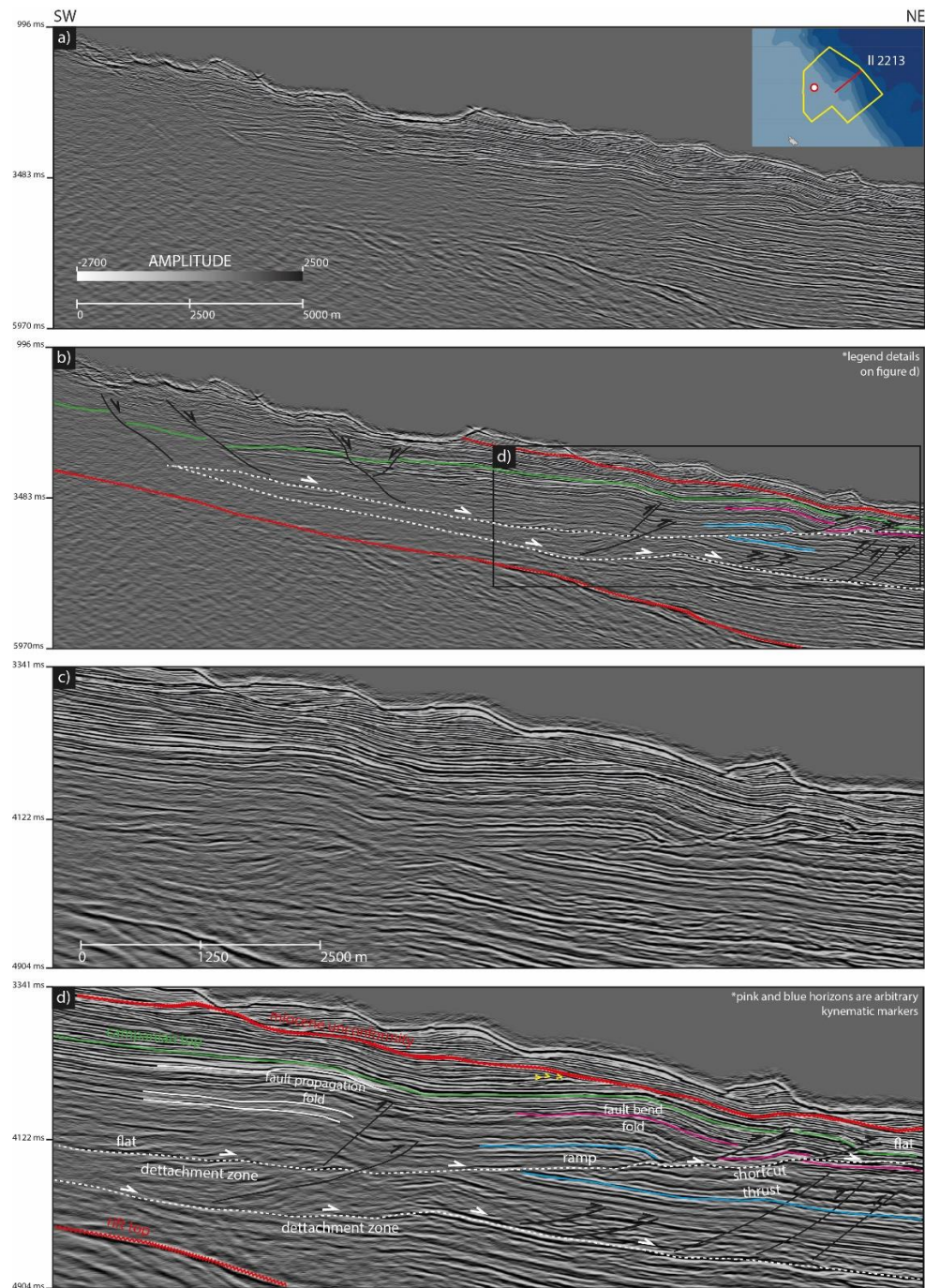


Figure 6: In-situ 2213 illustrating the main features on Zone A. (A) Uninterpreted section along the slope area. (B) Interpreted section. Unconformities are shown in red; Campanian top is shown in green. The dashed white lines mark the detachment zones; continuous black lines are normal and thrust faults, with the arrow indicating the kinematics. (C) Uninterpreted zoom over the compressive domain. (D) Interpreted zoom over the compressive zone. Yellow arrow heads mark the onlaps of the growth strata over the fold. Detailed legends on figure; discussions and further details on the text.

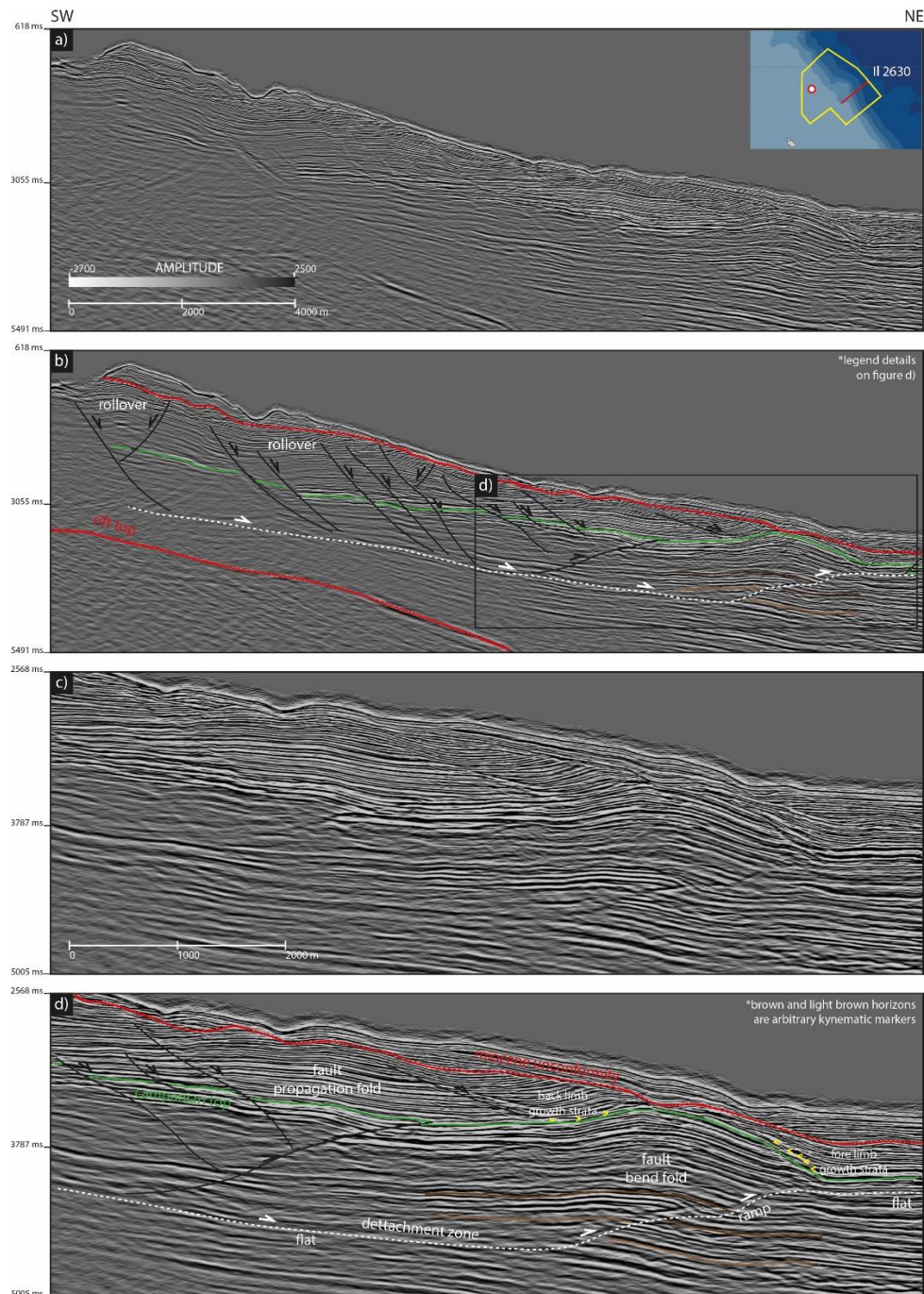


Figure 7: In-situ 2630 illustrating the main features on Zone B. (A) Uninterpreted section along the slope area. (B) Interpreted section. Unconformities are shown in red; Campanian top is shown in green. The dashed white lines mark the detachment zones; continuous black lines are normal and thrust faults, with the arrow indicating the kinematics. (C) Uninterpreted zoom over the compressive domain. (D) Interpreted zoom over the compressive zone. Yellow arrow heads mark the onlaps of the growth strata over the fold. Detailed legends on figure; discussions and further details on the text.

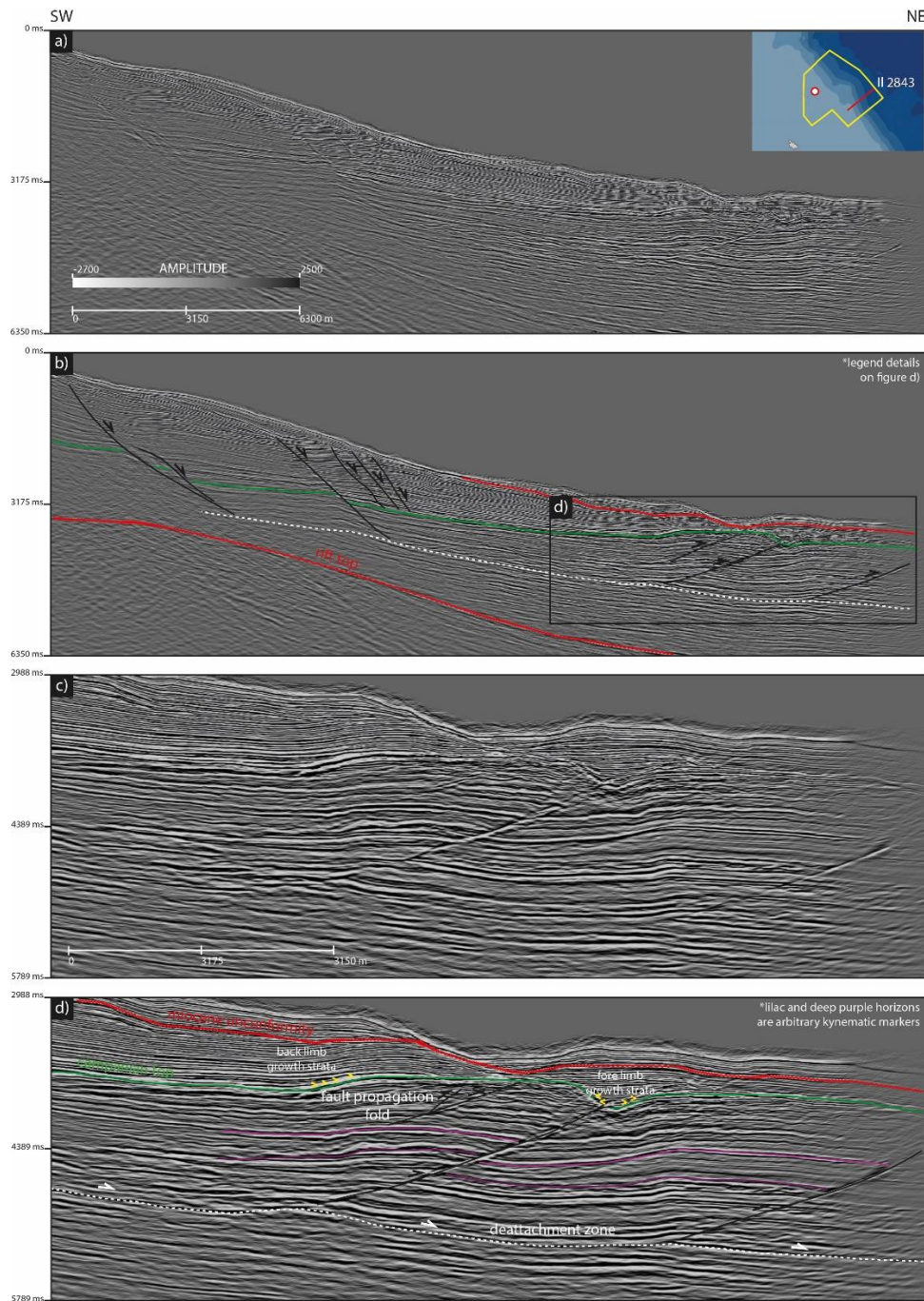


Figure 8: Inline 2843 illustrating the main features on Zone C. (A) Uninterpreted section along the slope area. (B) Interpreted section. Unconformities are shown in red; Campanian top is shown in green. The dashed white lines mark the detachment zone; continuous black lines are normal and thrust faults, with the arrow indicating the kinematics. (C) Uninterpreted zoom over the compressive domain. (D) Interpreted zoom over the compressive zone. Yellow arrow heads mark the onlaps of the growth strata over the fold. Detailed legends on figure; discussions and further details on the text.

Evolutionary model

Here, we propose a schematic evolutionary model for each of the zones mapped, where we contrast their distinct structural styles, distribution of structural domains, magnitude of deformation and detachment geometry.

Zone A likely experienced an instability situation before time T1, developing the lower detachment zone, whereas zones B and C were under stable conditions by the same time (Figure 9). By time T2, however, another gravitational failure occurred, developing the different structural patterns shown for each zone (Figure 9).

Zones A and B developed the main flat-ramp-flat geometries seen in Figures 6 and 7 in response to the latter gravitational failure. Zone B, however, developed a steeper ramp, with its upper flat occurring ~200 ms shallower than the equivalent Zone A upper flat (Figure 4). This produced a structural high in Zone B that has no along-strike equivalent in Zones A and C (Figure 4). Thus, tear faults had to be developed to laterally accommodate the deformation between the adjacent zones, as proposed on our maps (Figures 4 and 5). This lateral variability in vertical throw and shortening is also reflected on the structural style of folding, with Zone B being characterized by tight folds and Zone A by open folds (Figures 6 and 7, respectively).

Zone C, on the other hand, did not form an upper flat and is characterized by thrust-cored box-shaped folds. Zone C developed only minor seafloor bathymetry at the time of deformation despite presenting greater horizontal displacement than the adjacent Zone B. In fact, Zone B presents the lowest horizontal displacement (~600 m) but the highest seafloor bathymetry (~3,450 ms) between the three mapped zones. This demonstrates an inverse relationship between horizontal and vertical displacement and the associated paleo seafloor bathymetry in the study-area.

We interpret that this lateral variability in the magnitude and style of deformation is likely a consequence of lateral changes in rheology, with more shale-prone areas developing greater horizontal displacements, whereas sand-prone areas favored vertical displacement in the form of thrusting and folding. Other possibilities that could explain these variabilities would be variations in the paleoslope settings and/or different pore pressure values between the three zones.

We also interpret that the rather unique, aurally-limited occurrence of two detachment levels on Zone A could be explained by a single tectonic event along two distinct shale-prone horizons. This is opposed to previous studies that suggest distinct gravitational tectonic events for the Pará-Maranhão and Barreirinhas Basin, separated by considerable amounts of time (cf., ZALÁN, 2011; KRUEGER *et al.*, 2012). Our interpretation is based on: i) the absence of growth strata for the lower detachment structures and, ii) the lack of extensional structures detaching on its updip portion and iii) the lack of an equivalent structure in Zones B and C. These observations also suggest that shortening migrated updip and upward, with structures along the upper detachment being slightly younger than the ones along the lower detachment (Figure 9).

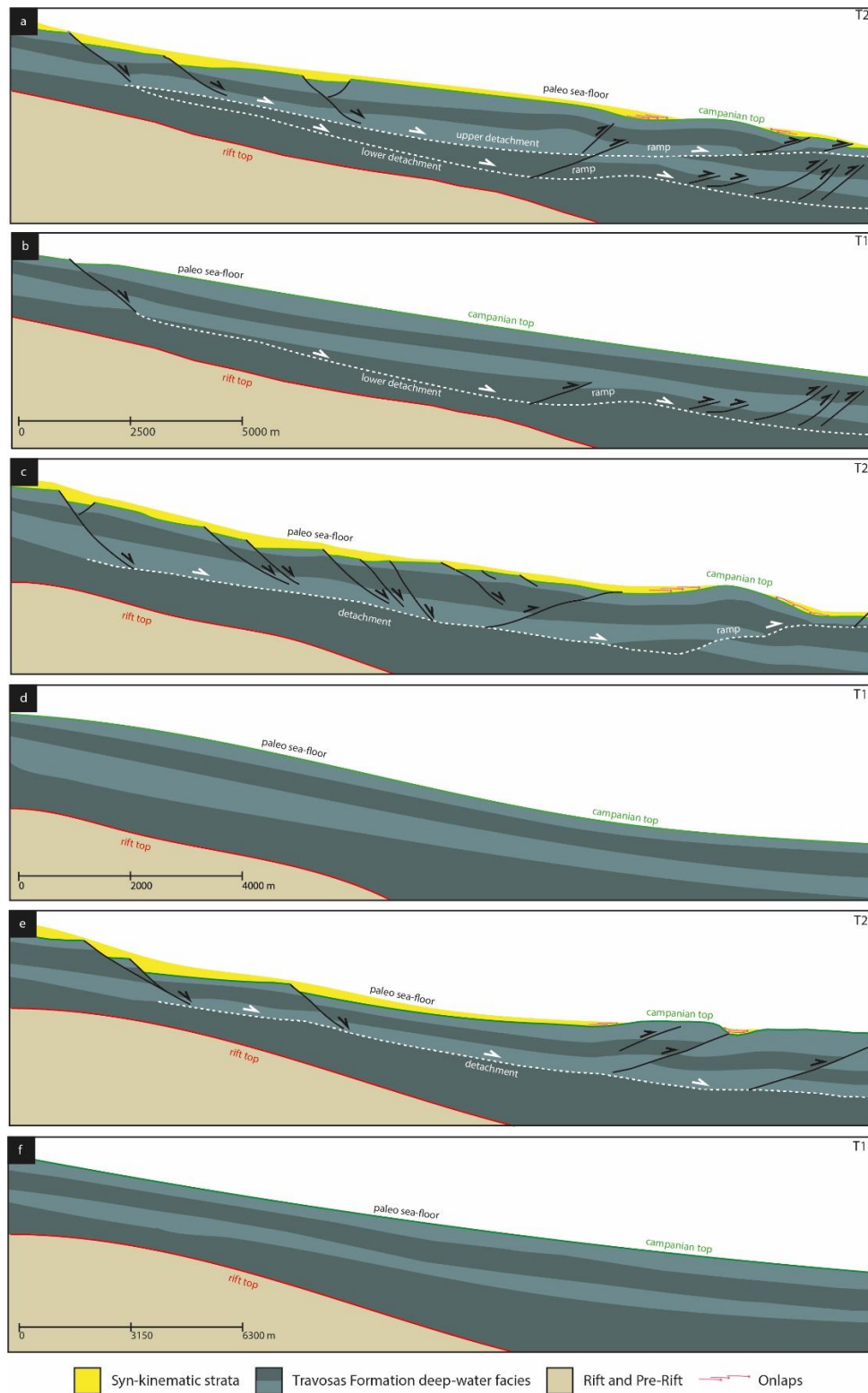


Figure 9: Schematic evolutionary model illustrating the timing and final geometries of the structures on each zone. (A) and (B) – Zone A; (C) and (D) – Zone B; (E) and (F) – Zone C. T1 – Slightly before the main gravitational failure. T2 – Slightly after the main gravitational failure.

Petroleum Systems

The structures described on the above sections may represent important features for petroleum systems on the Pará-Maranhão Basin. Considering the existing data regarding this matter, Zalán (2015) presented three petroleum systems for the basin: the hypothetical Codó – Canárias (.) system, light oil-prone, with Aptian lagoonal and marine anoxic shales from Codó Formation (TOC 3-24%) as source rocks and sandstones of Canárias Group as reservoir rocks (unknown porosities); the hypothetical Caju – Travosas (Cretaceous) (.) system, sourced by Albian-Cenomanian calcilutites and marine shales from Caju Group (TOC 1-2%, up to 5%) and stored in Upper Cretaceous turbidites (porosities ~20%) from of Travosas Formation (Jubilee-type play); and the Travosas (Cenozoic) – Ilha de Santana (!) system, the only proven petroleum system of the basin, with oil generated by Paleogene shales of Travosas Formation (TOC 0.5-1.7%) and stored in shallow water carbonates of Ilha de Santana Formation.

Focused on petroleum systems associated to the turbidites from Travosas Formation, Pellegrini and Ribeiro (2018) presented the Codó-Travosas (.), Caju-Travosas (.) and Travosas-Travosas (.) systems for the Pará-Maranhão basin. As indicated by their denomination, these petroleum systems are composed by three different source rocks: the Aptian lagoonal and marine anoxic shales from Codó Formation, the Albian-Cenomanian calcilutites and marine shales from Caju Formation, and the Cenomanian-Turonian marine shales from Travosas Formation (Figure 2), the latter related to the Turonian global anoxic event. The authors proposed three possible plays for these petroleum systems: shallow water turbidite plays; faulted shelf border turbidite plays; and deep and ultra-deep water turbidite plays. The possible reservoir rocks on these contexts are the Upper Cretaceous to Paleogene turbiditic sandstones from Travosas formation (Figure 2).

Bright spot anomalies were interpreted by Zalán (2015) as the above cited deep and ultra-deep-water turbidite complexes.

We propose for our context the speculative petroleum system presented by Pellegrini and Ribeiro (2018), composed by deep water turbidite sandstones from the Travosas Formation, spread along the Upper Cretaceous and Paleogene interval, being sourced by Codó Formation source rocks, present along the Aptian interval (Figures 2, 10 and 11). The Codó Formation shales reach up to 80 m in thickness, contains good quality organic material, and is supposed to be in the oil and gas window along large parts of the Brazilian equatorial margin (DAVISON et al., 2015). The system is denominated Codó-Travosas (?), and the proposed seal rocks are intraformational deep-water mudrocks encompassing the turbiditic sandstone lenses (Figures 10 and 11).

The other source intervals proposed by Pellegrini and Ribeiro (2018) in the Caju-Travosas and Travosas-Travosas systems are here considered secondary because they may not be mature, once the overburden rock over the deep-water setting possibly was not enough to achieve the oil window on such depths. Interpretations of Zalán (2015), however, indicate high generation potential for the Travosas Formation source rocks on deep-water settings, with the Drift Sequence reaching up to 7 km thickness. This would also place the Cajú Group source rocks into mature conditions.

It is important to have in mind possible reservoir issues, since some areas of the slope present the drift section mostly dominated by mixed calciclastic-siliciclastic deposits, even in the Travosas Formation, as stated by Espejel et al. (2021). This counterpoints previous interpretations of Travosas Formation as a siliciclastic dominated unit. Thus, the possible turbidite reservoirs can present considerable differences in petrophysical properties if compared to essentially siliciclastic deposits, even before the implantation of the Ilha de Santana carbonate platform (Maastrichtian).

The traps proposed by us are combined, fold dominated, directly related to the thrust faults, yet requiring the stratigraphic component for sealing purposes (MAGOON and DOW, 1994) (Figure 10). The folds shaped the reservoirs, providing suitable closure. The traps formation took place during the Paleogene gravitational tectonic event (Figure 11). By this time, all the elements of the petroleum system were set (critical moment).

The proposed migration paths are reactivated faults of the rift phase connecting to the detachment zones and their secondary faults, thus creating a porous network capable of migrating the hydrocarbon from the Aptian source rocks to the Upper Cretaceous and Paleogene reservoirs (Figure 10). The presence or absence of a detachment system is crucial for determining the dominant migration mechanism. Areas above the detachment surface present predominantly vertical migration, whereas areas beneath it present preferentially lateral migration (NEMCOK et al., 2015). Thus, if there is a good connection between the source rocks and the detachment, the latter would be a porous network capable of connecting multiple sand bodies.

However, as mentioned before, this is a speculative petroleum system (neither source or reservoir were verified). The information about Codó Formation source potential is well documented on the literature (SOARES et al., 2007; ANP, 2013; DAVISON, 2015; ZALÁN, 2015), and the timing and intensity of the overburden indicate possible petroleum generation process. The Travosas Formation turbidite complexes are poorly known, being cited by Pellegrini and Ribeiro (2018), Zalán (2015) and ANP (2013), indicating good lithological facies as reservoirs by correlation with other deep water turbiditic facies (e.g.: Campos Basin deep water turbidites). Furthermore, the structured floor fan mound geometry of the turbidite complexes (composing stratigraphic traps) is enhanced by the folding event of the gravitational tectonic process, and gained a good connection to the source rock through the faults

related to the thrusts. Therefore, the here proposed petroleum system has all elements with a reasonable confidence, despite the limited amount of data, leading it to speculative definition, commonly used in initial phase exploratory basins, as Pará-Maranhão basin present days.

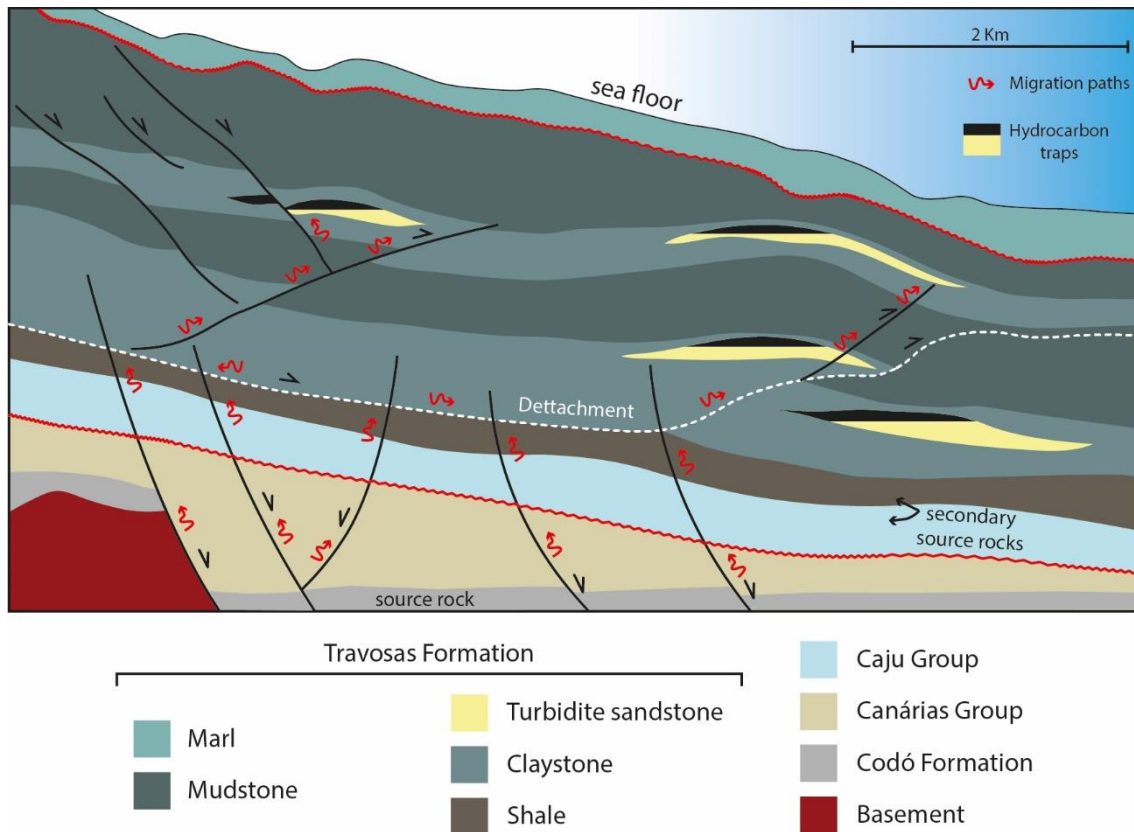


Figure 10: Speculative petroleum system proposed for the deep-water settings of Pará-Maranhão basin. The main source interval consists in the lagoon and marine shales of the Aptian Codó Formation. The reservoir rocks are the structured Upper Cretaceous to Paleogene deep-water turbidite sandstones of Travosas Formation, deformed during the Paleogene gravitational tectonic event. Seal rocks are the intraformational mudrocks from Travosas Formation.

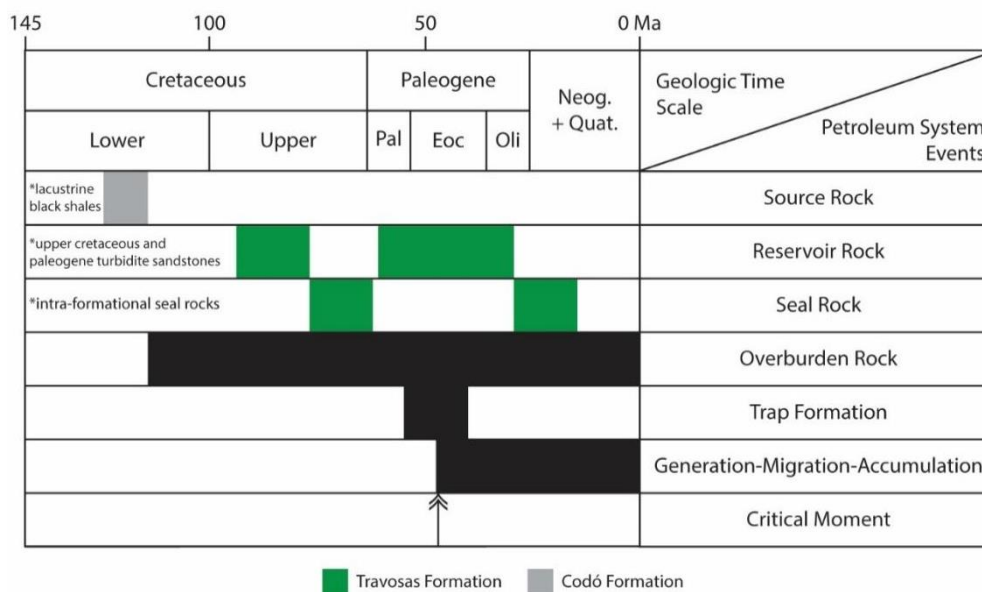


Figure 11: Events chart for the proposed petroleum system, showing the petroleum system elements and their relative timing. Based on conceptual standardization of Magoon and Dow, 1994.

Conclusions

The studied gravitational thrust and fold belt extends for more than 1000 km² along the Pará-Maranhão basin's toe slope. The feature is part of a linked extensional-compressive system affecting the slope area, presenting three tectonic domains, as verified in other examples of gravitational tectonics in passive margins around the world (e. g.: DeVERA et al., 2010; KRUEGER et al., 2012; ZALÁN, 2011). The strain transfer relationship between the tectonic domains is clearly recognized, indicating that the space created by listric faults on the extensional domain was compensated by shortening in the compressive domain, with the strain being transferred through the translation domain.

The mapped area was divided into three zones according to the geometry and 3D architecture of the detachment zone. Zones A and B present flat-ramp-flat detachment geometry, developing thrust faults and associated fault propagation and fault bend folds, with Zone B presenting a considerably steeper ramp. The Zone C presents a flat-ramp

detachment geometry, developing thrusts and fault propagation folds, and not developing a superior flat level.

The absence of the translational domain on Zone B is remarkable. In this situation, we believe that all the translation component was absorbed into the extensional and compressive structures.

The stratigraphic correlations suggest maximum Campanian age for the beginning of the gravity tectonic event, since the growth strata usually rests over a broadly tabular pre-kinematic succession capped by the Campanian Top horizon. The occurrence of a lower detachment zone on Zone A may indicate that the area experienced a previous event of gravitational tectonic, or simply that a single gravity tectonic event developed two detachment zones on different stratigraphic levels. Whatever the answer, it is clear that the superior detachment developed with influence of the lower detachment thrusts.

The growth strata analysis suggests that the deformation affected the paleo sea-floor, developing structural highs and lows. The paleo structural highs sometimes acted as a barrier, inhibiting the sediment bypass to the distal parts of the basin, reshaping the paths for deep-water depositional processes. The growth strata and thrust geometries suggest a break-forward spreading of the structures, although out of phase reactivations are proposed along zones A and B.

The particularities between the three zones suggest a highly dynamic geometry for the studied thrust and fold belt. We believe that the heterogeneities on the deformation were controlled mainly by rheological differences between the zones. The more shale-prone areas developed bigger horizontal displacements, while sand-prone areas favoured vertical displacement in the form of thrusting and folding.

It is reasonable to admit that this gravitational tectonic event is associated to the extensive sediment progradation over the shelf between the Upper Cretaceous and Middle Eocene (regressive cycle). The progradation not only developed a steeper slope morphology, but also increased the sediment load over the Travosas Formation shales, increasing the pore pressure, and consequently decreasing the shear resistance, occasioning the proximal gravitational failure and distal compression.

The geometry and dimension of the structures developed by the gravity tectonic processes on the toe slope of the Pará-Maranhão basin may be interesting for hydrocarbon accumulation purposes. The possibility of source rocks on the rift section along the slope, associated to the occurrence of deep-water turbiditic sandstones, as positively tested on the Gulf of Guinea deep-water Cretaceous petroleum system, encourages the here proposed petroleum system, Codó-Travosas (?). Its exploration effort must be mainly towards the recognition of turbidite bodies structured by faulting and folding related to the gravity tectonic processes. Despite the lack of an exploratory well, those structural patterns are clearly mapped on seismic, either 3D or 2D close spaced surveys.

Several dry or sub-commercial wells were drilled into the crest of anticline structures along the Brazilian and African margins, likely due to erosion of the best reservoir facies (DAVISON et al., 2015). The above authors propose other possible targets, presenting the possibility of good reservoir facies on the synclines formed on the flank of these structures.

It is primordial, however, the acquisition of new exploratory data for further investigations about the hypothetic petroleum system. The well here used was drilled under a water depth of 65m, and only a few wells were drilled on the deep-water setting of the basin. In the meanwhile, the Jubilee field (one of the main deep-water turbidite

plays along the Atlantic Equatorial margin) discoverer well, Mahogany 1, was drilled under water depths deeper than 1000 m (DAILLY et al., 2013).

Therefore, the drilling of more wells over the deep-water settings of the Pará-Maranhão Basin, supplying geochemical data for source rocks, detecting and evaluating the reservoir rocks and providing biostratigraphic and sedimentological proxies would be of greater value to prove the real exploratory perspectives for the basin.

Acknowledgements

Our sincere acknowledgements to ANP (Brazilian National Agency for Oil, Gas and Biofuels) for providing the data used on this paper. We also thank Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) and its Post-Graduation Program in Geosciences (PPGGEO) for providing the necessary intellectual and infrastructure background.

Funding

AP Soares thanks the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for providing the scholarship along the research development.

Sample CRediT author statement

Adler Pereira Soares: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data Curation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Visualization. **Juliano Kuchle:** Conceptualization, Validation, Writing – Review & Editing, Supervision. **Leonardo Muniz Pichel:** Conceptualization, Validation, Writing – Review & Editing. **Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo:** Conceptualization, Validation, Supervision. **Francyne Bochi do Amarante:** Writing – Review & Editing.

References

ANP, 2011. Bacia do Pará-Maranhão. In: Licitações de Petróleo e Gás, 11^a rodada - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Available in:

http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round11/Seminarios_r11/tec_ambiental/Bacia_do_Para-Maranhao.pdf

BILOTTI, F.; SHAW, J. H. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge: The influence of elevated basal fluid pressure on structural styles. *AAPG Bulletin*, v. 89, n. 11, p. 1475–1491, 2005. DOI:10.1306/06130505002.

BUTLER, R.W.H., & PATON, D.A., 2010, Evaluating lateral compaction in deepwater fold and thrust belts: How much are we missing from “nature’s sandbox”? *GSA Today*, v. 20, no. 3, p. 4–10, doi: 10.1130/GSATG77A.1

DAILLY, P.; HENDERSON, T.; HUDGENS, E.; KANSCHAT, K.; LOWRY, P. Exploration for Cretaceous stratigraphic traps in the Gulf of Guinea, West Africa and the discovery of the Jubilee Field: a play opening discovery in the Tano Basin, Offshore Ghana. *Geological Society of London Special Publications*. 369. p. 235-248, 2013. DOI:10.1144/SP369.12.

DAILLY, P.; LOWRY, P.; GOH, K.; MONSON, G. Exploration and development of Ceiba field, Rio Muni basin, southern Equatorial Guinea. *The Leading Edge*, v. 21, n. 11, p. 1140–1146, 2002. DOI:10.1190/1.1523753.

DAVISON, I.; FAULL, T.; GREENHALGH, J.; BEIRNE, E. O.; STEEL, I. Transpressional structures and hydrocarbon potential along the Romanche Fracture Zone: a review. In: NEMCOK, M., RYBÁR, S., SINHA, S. T., HERMESTON, S. A. & LEDVENYIOVA, L. (eds). *Transform Margins: Development, Controls and Petroleum Systems*. Geological Society, London, Special Publications, 431.

De VERA, J.; GRANADO, P.; McCLAY, K. Structural evolution of the Orange Basin gravity driven system, offshore Namibia. *Mar. Petrol. Geol.* v.27, p. 223–237, 2010.

ESPEJEL, R. L.; ALVES, T. M.; MARTINS-FERREIRA, M. A. C. 2021. Depositional and geomorphic patterns of mixed calciclastic-siliciclastic systems on a deep-water Equatorial margin. *Basin Research*, Early View.

KRUEGER, A.; MURPHY, M.; GILBET, E.; BURKE, K. Deposition and deformation in the deepwater sediment of the offshore Barreirinhas Basin, Brazil. *Geosphere*, v.8, n. 6, p. 1606-1631, 2012.

MAGOON, L. B., & DOW, W. G., 1994. The Petroleum System. In: Magoon and Dow (eds): *The petroleum system from source to trap*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 60, p. 3-24.

MAIA de ALMEIDA, N., ALVES, T.M., NEPOMUCENO FILHO, F., FREIRE, G.S.S., SOUZA, A.C.B., LEOPOLDINO OLIVEIRA, K.M., NORMANDO, M.N., BARBOSA, T.H.S., 2020. A three- dimensional (3D) structural model for an oil-producing basin of the Brazilian equatorial margin. *Mar. Petrol. Geol.* 122.

MATOS, R. M. D. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W.; TALWANI, M. (eds.). *Atlantic rifts and continental margins*. [S.l.]: American Geophysical Union, 2000. p. 331–354. (Geophysical Monograph, 115).

McCLAY, K. R. Glossary of thrust tectonics terms. In McClay, K. R. (ed.). *Thrust tectonics*. London: United Kingdom: Chapman & Hall, 1992. p. 419–433.

MEYER, D.; ZARRA, L.; RAINS, D.; MELTZ, B.; HALL, T. Emergence of the lower Wilcox Tertiary trend in the deepwater Gulf of Mexico. *World Oil*, v. 226, n. 5, p. 72–77, 2005.

MITCHUM, R.M., VAIL, P.R., THOMPSON, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of Sea level, Part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic

analysis. In: *Seismic Stratigraphy Applied to Hydrocarbon Exploration*, vol. 26. AAPG Memoir, pp. 53–62.

NEMCOK, M.; RYBÁR, S.; EKKERTO VÁ, P.; KOTULOVÁ, J.; HERMESTON, S. A.; JONES, D. Transform-margin model of hydrocarbon migration: the Guyana-Suriname case study. In: NEMCOK, M., RYBÁR, S., SINHA, S. T., HERMESTON, S. A. & LEDVENYIOVA, L. (eds). *Transform Margins: Development, Controls and Petroleum Systems*. Geological Society, London, Special Publications, 431.

PELLEGRINI, B. da S.; RIBEIRO, H. J. P. S. Exploratory plays of Pará-Maranhão and Barreirinhas basins in deep and ultra-deep waters, Brazilian Equatorial Margin. *Brazilian Journal of Geology*. v.48, n.3, p.485-502, 2018.

ROWAN, M. G.; PEEL, F. J.; VENDEVILLE, B. J. Gravity driven fold belts on passive margins. In: McCLAY, K. R. (ed.). *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*. [S.l.: s.n], 2004. p. 157–182. (AAPG Memoir 82).

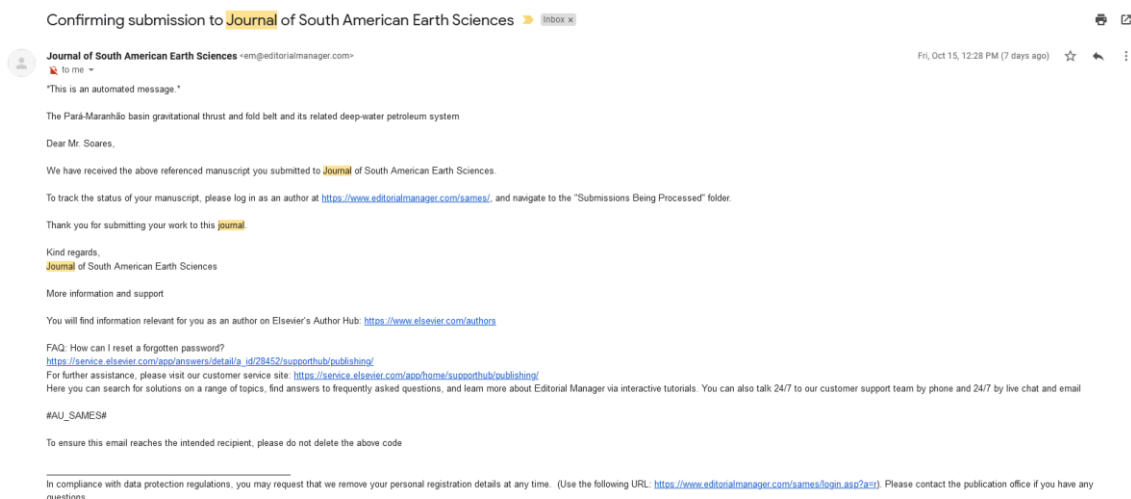
SOARES, E.F.; ZALÁN, P.V.; FIGUEIREDO, J.J.P.; TROSDTORF JUNIOR, I. Bacia do Pará-Maranhão. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v.15, p.321-329, 2007.

ZALÁN, P.V., 2015. Re-Interpretation of an Ultra-Deep Seismic Section in the Para-Maranhao Basin - Implications for the Petroleum Potential of the Ultra-Deep Waters. *OTC Brasil 2015: The Atlantic: From East to West - An Ocean of Innovation*. 662–672.

ZALÁN, P. V. Fault-related folding in the deep waters of the equatorial margin of Brazil. In: McCLAY, K.; SHAW, J.; SUPPE, J. (eds.). *Thrust fault-related folding*. [S.l.: s.n], 2011. p. 335 – 355. (AAPG Memoir 94).

ZANOTTO, O.; SZATIMARI, P. Mecanismo de rifteamento da porção ocidental da margem Norte brasileira, Bacia do Pará-Maranhão. Revista Brasileira de Geociências, v.17, n.2, p.189-195, 1987.

6. COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO



7. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

O sistema de empurrões e dobramentos gravitacionais analisado se estende por mais de 1000 km² ao longo da porção SE do talude da bacia do Pará-Maranhão. A área mapeada foi dividida em três zonas, levando em consideração a geometria tridimensional da superfície de descolamento e as estruturas desenvolvidas. As zonas A e B foram caracterizadas por uma geometria de descolamento em patamar-rampa-patamar, desenvolvendo falhas de empurrão, dobras de propagação de falha e dobras de inflexão de falha. A Zona C, por sua vez, foi caracterizada por uma geometria de descolamento em patamar-rampa, não desenvolvendo um patamar superior, apresentando empurrões e dobras de propagação de falha associadas.

A análise estrutural das três zonas possibilitou a proposição de um modelo evolutivo esquemático para a área. Além disso, baseado no arcabouço estrutural mapeado e na sucessão estratigráfica analisada, foi proposto um sistema petrolífero hipotético para a região de águas profundas da bacia.

Os principais resultados obtidos neste trabalho indicam que:

1. O início da tectônica gravitacional apresenta idade máxima campaniana, visto que as seções de crescimento das dobras estão dispostas sobre a sucessão de estratos pré-tectônicos capeada pelo horizonte do Topo do Campaniano;
2. A tectônica gravitacional afetou o assoalho oceânico da época, desenvolvendo altos e baixos estruturais. Os altos estruturais eventualmente agiram como barreiras, bloqueando a passagem de sedimentos para as porções mais distais da bacia, interferindo diretamente na dinâmica deposicional de águas profundas;
3. Os diferentes estilos estruturais desenvolvidos entre as três zonas são possivelmente explicados por diferenças reológicas, onde áreas mais ricas em lama favoreceram um deslocamento horizontal maior, ao passo que áreas mais ricas em areia favoreceram maior deslocamento vertical na expressão dos dobramentos e empurrões;
4. A geometria e dimensão das estruturas desenvolvidas pela tectônica gravitacional podem ser interessantes para fins de acumulação de hidrocarbonetos. A possibilidade de rochas geradoras na seção rifte sob o talude da bacia, associada à ocorrência de arenitos turbidíticos de águas profundas, como ocorre no Golfo da Guiné, corrobora a ideia do sistema petrolífero Codó-Travosas (?) aqui proposto.

Algumas perspectivas para o desenvolvimento de trabalhos futuros na área, considerando os dados disponíveis até o presente momento, envolvem:

1. Um refinamento do arcabouço sismoestrigráfico da bacia usando linhas sísmicas regionais e dados sísmicos de detalhe, correlacionando eventos na plataforma (com maior disponibilidade de dados de poço) a eventos nas regiões de águas profunda, estabelecendo um melhor controle para a ocorrência de corpos arenosos;
2. A aplicação de atributos sísmicos geométricos para o reconhecimento de elementos paleogeográficos em águas profundas, possibilitando a delimitação de possíveis prospectos, assim como para reconhecimento de falhas, mapeando com maior grau de certeza possíveis rotas de migração e/ou de escape de hidrocarbonetos;
3. O desenvolvimento de estudos bioestratigráficos, possibilitando um melhor zoneamento cronoestratigráfico e datações mais exatas para os eventos mapeados na sísmica;

É importante ressaltar que a perfuração de novos poços e aquisição de novos dados em águas profundas e ultra-profundas da bacia é de primordial importância para

esclarecer o real potencial da área, que permanece como uma incógnita. A perfuração de novos poços deve lançar luz sobre aspectos essenciais para o desenvolvimento exploratório, como geoquímica de rochas geradoras e caracterização de possíveis reservatórios, questões até então desconhecidas devido ao baixo número de poços perfurados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP, 2011. Bacia do Pará-Maranhão. In: Licitações de Petróleo e Gás, 11ª rodada - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Available in: http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round11/Seminarios_r11/tec_ambiental/Bacia_do_Para-Maranhao.pdf

BARKER, C. Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil and gas in reservoirs. *AAPG Bulletin*, v. 74, p. 1254–1261, 1990.

BILOTTI, F.; SHAW, J. H. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge: The influence of elevated basal fluid pressure on structural styles. *AAPG Bulletin*, v. 89, n. 11, p. 1475–1491, 2005. DOI:10.1306/06130505002.

DAILLY, P.; LOWRY, P.; GOH, K.; MONSON, G. Exploration and development of Ceiba field, Rio Muni basin, southern Equatorial Guinea. *The Leading Edge*, v. 21, n. 11, p. 1140–1146, 2002. DOI:10.1190/1.1523753.

Dailly, P; Henderson, T.; Hudgens, E; Kanschat, K.; Lowry, P. Exploration for Cretaceous stratigraphic traps in the Gulf of Guinea, West Africa and the discovery of the Jubilee Field: a play opening discovery in the Tano Basin, Offshore Ghana. *Geological Society of London Special Publications*. 369. p. 235-248, 2013. DOI:10.1144/SP369.12.

De VERA, J.; GRANADO, P.; McCLAY, K. Structural evolution of the Orange Basin gravity driven system, offshore Namibia. *Mar. Pet. Geol.* v.27, p. 223–237, 2010.

KRUEGER, A.; MURPHY, M.; GILBERT, E.; BURKE, K. Deposition and deformation in the deepwater sediment of the offshore Barreirinhas Basin, Brazil. *Geosphere*, v.8, n. 6, p. 1606-1631, 2012.

McCLAY, K. R. Glossary of thrust tectonics terms. In McClAY, K. R. (ed.). *Thrust tectonics*. London: United Kingdom: Chapman & Hall, 1992. p. 419–433.

McCLAY, Ken. Introduction to thrust fault-related folding. In: McClAY, K.; SHAW, J.; SUPPE, J. (eds.). *Thrust fault-related folding*. [S.l.: s.n], 2011. p. 1 – 19. (AAPG Memoir 94).

MATOS, R. M. D. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W.; TALWANI, M. (eds.). *Atlantic rifts and continental margins*. [S.l.]: American Geophysical Union, 2000. p. 331–354. (Geophysical Monograph, 115).

MEYER, D.; ZARRA, L.; RAINS, D.; MELTZ, B.; HALL, T. Emergence of the lower Wilcox Tertiary trend in the deepwater Gulf of Mexico. *World Oil*, v. 226, n. 5, p. 72–77, 2005.

MITRA, S. Structural Models of Faulted Detachment Folds. *AAPG Bulletin* 2002; 86 (9): 1673–1694.

MORLEY, C. K.; GUERIN, G. Comparison of gravity-driven deformation styles and behavior associated with mobile shales and salt. *Tectonics*, v. 15, p. 1154–1170, 1996.

MORLEY, C. K.; KING, R.; HILLIS, R.; TINGAY, M.; BACKE, G. Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity: a review. *Earth-Science Reviews*, v. 104, n. 1–3, p. 41-91, 2011.

PELLEGRINI, B.da S.; RIBEIRO, H. J. P. S. Exploratory plays of Pará-Maranhão and Barreirinhas basins in deep and ultra-deep waters, Brazilian Equatorial. Margin. *Brazilian Journal of Geology*. v.48, n.3, p.485-502, 2018.

ROWAN, M. G.; PEEL, F. J.; VENDEVILLE, B. J. Gravity driven fold belts on passive margins. In: McCLAY, K. R. (ed.). *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*. [S.l.: s.n], 2004. p. 157–182. (AAPG Memoir 82).

ROSSETTI, D. F. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Science*, Oxford, v. 14, n. 1, p. 77-89, 2001.

SOARES, E.F.; ZALÁN, P.V.; FIGUEIREDO, J.J.P.; TROSDTORF JUNIOR, I. Bacia do Pará-Maranhão. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v.15, p.321-329, 2007.

SUPPE, J.; CONNORS, C. D.; ZHANG, Y. Shear fault-bend folding. In: McCLAY, K. R. (ed.). *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 303 – 323. (AAPG Memoir 82).

SUPPE, J. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, v. 283, p. 684–721, 1983.

SUPPE, J.; MEDWEDEFF, D.A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding: *Ecolgae Geologicae Helveticae* 83, p.409–454, 1990.

WALLACE, W. K.; HOMZA, T. X. Detachment folds versus fault-propagation folds, and their truncation by thrust faults. In: McCLAY, K. R. (ed.). Thrust tectonics and hydrocarbon systems. [S.l.: s.n.], 2004. p. 324–355. (AAPG Memoir 82).

ZALÁN, P. V. Fault-related folding in the deep waters of the equatorial margin of Brazil. In: McCLAY, K.; SHAW, J.; SUPPE, J. (eds.). Thrust fault-related folding. [S.l.: s.n.], 2011. p. 335 – 355. (AAPG Memoir 94).

ZANOTTO, O.; SZATIMARI, P. Mecanismo de rifteamento da porção ocidental da margem Norte brasileira, Bacia do Pará-Maranhão. *Revista Brasileira de Geociências*, v.17, n.2, p.189-195, 1987.

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“O SISTEMA DE EMPURRÕES E DOBRAMENTOS GRAVITACIONAIS NO SE DA BACIA DO PARÁMARANHÃO E POSSÍVEIS SISTEMAS PETROLÍFEROS ASSOCIADOS”

Área de Concentração: Estratigrafia

Autor: **ADLER PEREIRA SOARES**

Orientador: Prof. Dr. Juliano Kuchle

Examinador: Prof. Dr. Alex Francisco Antunes

Data: 14/12/2021

Conceito: A

PARECER:

O tema abordado tem relevância para o avanço do conhecimento geológico/exploratório da área, incluindo a proposição de modelos compatíveis com as interpretações. O texto necessita de alguns ajustes. Pelo exposto meu parecer é pela **APROVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Assinatura:



Data: 14/12/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

SISTEMA DE EMPURRÕES E DOBRAMENTOS GRAVITACIONAIS NO SE DA BACIA DO PARÁ-MARANHÃO E POSSÍVEIS SISTEMAS PETROLÍFEROS ASSOCIADOS

Área de Concentração: Estratigrafia

Autor: ADLER PEREIRA SOARES

Orientadora: Prof. Dr. Juliano Kuchle (UFRGS)

Examinador: Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer

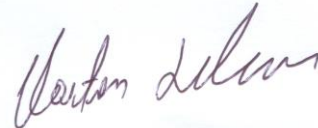
Data: 20/12/2021

Conceito: A

A dissertação analisada trata-se de um trabalho de ótima qualidade, onde o autor fez uma caracterização estrutural a partir da interpretação sísmica 3D, visando a definição da geometria 3D e a cinemática das estruturas e dos estratos deformados de um sistema de empurrões e dobramentos gravitacionais de uma seção estratigráfica da Bacia de Pará-Maranhão. O tema é inédito e tem alto interesse acadêmico e aplicado, contribuindo para o entendimento da bacia do Pará-maranhão, principalmente no que tange as estruturas deformacionais associadas a movimentos gravitacionais de rocha e suas distribuições regionais. Através dos resultados alcançados, é proposto um modelo cinemático 3D de cada uma das três zonas interpretadas (zonas a, b, c), assim como um modelo potencial de sistema petrolífero associados a *traps* formados por cinturões de dobramento e cavalgamentos envolvendo reservatórios turbidíticos do cretáceo- paleógeno.

Os objetivos da dissertação estão bem definidos, sendo esses plenamente atingidos pelo autor. A descrição metodológica, apesar de sucinta, aborda de forma competente as diferenças etapas da interpretação sísmica. Creio, contudo, que ocorre um repetição integral da metodologia presente no artigo no capítulo introdutório da tese. A metodologia no capítulo introdutório deveria ser mais detalhada, apresentando os problemas enfrentados e os resultados alcançados em cada etapa metodológica. O capítulo referente ao estado da arte aborda de forma competente os aspectos relacionados aos elementos tectônicos vinculados ao colapso de sistemas gravitacionais de rochas. As figuras são de boa qualidade e são complementares ao texto, embora as legendas por vezes não sejam autoexplicativas, dificultando entendimento das figuras. A bibliografia dos artigos é suficiente, destacando os principais trabalhos vinculados ao tema da dissertação.

Algumas observações pontuais e sugestões foram apontadas diretamente no pdf e enviadas ao autor, não desmerecendo em nenhum aspecto a excelente qualidade do trabalho. Parabéns ao autor e ao orientador.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Claiton M. S. Scherer', is centered on a light blue rectangular background.

Prof. Dr. Claiton M. S. Scherer
Depart. Paleontologia e Estratigrafia/UFRGS

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“O SISTEMA DE EMPURRÕES E DOBRAMENTOS GRAVITACIONAIS NO SE DA BACIA DO PARÁMARANHÃO E POSSÍVEIS SISTEMAS PETROLÍFEROS ASSOCIADOS”

Área de Concentração: Estratigrafia

Autor: **ADLER PEREIRA SOARES**

Orientador: Prof. Dr. Juliano Kuchle

Examinadora: Profa. Dra. Valéria Centurion Córdoba

Data: 28/12/2021

Conceito: A

PARECER:

O tema da Dissertação de Mestrado analisada é atual e bastante relevante. O texto está bem escrito, apresentado, contudo, alguns pequenos ajustes de melhoria antes de sua edição final. As ilustrações são de boa qualidade, oferecendo de forma clara e objetiva os dados, os métodos utilizados e as interpretações e conclusões decorrentes. O mestrando faz uma excelente e objetiva síntese do contexto geológico da bacia estudada, e dos principais assuntos teóricos pertinentes aos seus estudos, discorrendo sobre as células de deslizamentos gravitacionais e das dobras associadas a falhas de empurrões. O artigo científico apresenta um título instigante e com viés econômico, está bem escrito, de forma clara e objetiva, e encontra-se bem ilustrado. O mesmo apresenta um estudo sísmico da área estudada, o qual permitiu dividi-la em três zonas, com base na geometria e arquitetura 3D da zona de descolamento e estruturas associadas. Ao final, o artigo apresenta um modelo evolutivo esquemático para a área e a proposta de um sistema petrolífero hipotético para a região de águas profundas da bacia. Considero um excelente trabalho de pesquisa e de aplicação dos métodos escolhidos, os quais permitiram atingir aos objetivos propostos no âmbito desta pesquisa.

Assinatura:



Data: 28/12/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: