



Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Centro de Ciências Exatas e da Terra

Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

INFLUÊNCIA DA ZONA DE FRATURA ROMANCHE NA EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR DO SETOR CENTRAL DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA

Autora:

Saywry Virginio de Carvalho

Orientador:

Prof. Dr. David Lopes de Castro (PPGG/UFRN)

Dissertação n.º 307/PPGG

Natal-RN, agosto de 2025

SAYWRY VIRGINIO DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DA ZONA DE FRATURA ROMANCHE NA EVOLUÇÃO
TECTONO-SEDIMENTAR DO SETOR CENTRAL DA MARGEM
EQUATORIAL BRASILEIRA**

Dissertação apresentada em XX de agosto de dois mil e cinco, ao Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN como registro à obtenção do Título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em Geofísica.

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. DAVID LOPES DE CASTRO

Presidente e orientador (PPGG-UFRN)

PROF. DR. PEDRO XAVIER NETO

Membro externo (PRH 42.1)

DR^a. ALANNY CHRISTINY COSTA DE MELO

Membro externo (GEMEB/UFRN)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Carvalho, Saywry Virginio de.

Influência da Zona de Fratura Romanche na evolução tectono-sedimentar do setor central da Margem Equatorial Brasileira / Saywry Virginio de Carvalho. - 2025.

56 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, RN, 2025.

Orientação: Prof. Dr. David Lopes de Castro.

1. Margem Equatorial Brasileira - Dissertação. 2. Zona de Fratura Romanche - Dissertação. 3. Bacia de Barreirinhas - Dissertação. 4. Tectônica Transtensional - Dissertação. 5. Bacia Pull-apart - Dissertação. 6. Estratigrafia Sísmica - Dissertação. I. Castro, David Lopes de. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.468(81) (043.3)

Dedico este trabalho ao meu orientador, David Lopes de Castro, que, por inúmeras vezes, acreditou mais em mim do que eu mesma. Por ter demonstrado empatia em todas as minhas crises de ansiedade generalizada, sempre trazendo soluções e uma palavra de conforto.

Agradecimentos

Gostaria de iniciar meus agradecimentos ao Grupo de Estudos da Margem Equatorial Brasileira, que me acolheu com generosidade e foi essencial para que essa pesquisa se concretizasse. Em especial, agradeço ao Mestre Odilon e à Dra. Lívian pelo apoio constante ao longo de todo o meu mestrado.

Agradeço também à ANP, pela disponibilização dos dados que viabilizaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Em especial, ao professor Dr. David Lopes de Castro, cuja orientação, paciência e comprometimento foram fundamentais ao longo desta jornada. Nos momentos em que pensei em desistir, ele acreditou em mim e me lembrou que eu era capaz. A importância de uma boa orientação torna todo o percurso mais leve e possível. A conclusão deste curso carrega muito do seu esforço, da sua escuta atenta e do incentivo que nunca faltou. Muito obrigada por acreditar, ensinar e caminhar ao meu lado nessa trajetória.

Sou grata à Tetra Tech, empresa onde trabalho desde o início do mestrado, por todo o suporte ao longo dessa jornada. Em especial, agradeço à Tainã Pinheiro, por ter reorganizado minha carga horária com tanta compreensão, permitindo que eu seguisse em busca desse sonho.

Meu mais profundo agradecimento vai ao meu esposo, por estar sempre ao meu lado, apoiando cada passo — mesmo diante das loucuras que insisto em abraçar. Sua presença e acolhimento foram meu alicerce nos momentos de incerteza.

Agradeço, com todo o carinho, à minha mãe, aos meus irmãos e à minha avó, Dona Helana, por me darem força apenas por existirem.

E finalizo com uma das filosofias que levo para a vida: para mim, nenhuma conquista é completa se não puder ser compartilhada com a minha família.

Se você quer entender o mundo, pense em energia,
frequência e vibração.

Nikola Tesla

Resumo

A Margem Equatorial Brasileira emergiu como uma área de significativo interesse científico e econômico devido ao seu alto potencial petrolífero, evidenciado por importantes descobertas ao longo das margens conjugadas do Atlântico Equatorial e Guina. Este estudo investiga a influência da Zona de Fratura Romanche na evolução tectono-sedimentar da Bacia de Barreirinhas, localizada no setor central da Margem Equatorial Brasileira. Com base na análise integrada de cinco seções sísmicas e três poços exploratórios, estruturas típicas de ambientes transtensionais foram identificadas, incluindo falhas normais, falhas lístricas e estruturas em flor negativas, afetando tanto o embasamento quanto as sequências sedimentares sobrejacentes. Essas feições demonstram forte controle tectônico da Zona de Fratura Romanche sobre a morfologia da plataforma continental, talude e a compartimentação interna das sequências de rifte e deriva. A evolução da Bacia de Barreirinhas reflete uma interação complexa entre rifteamento oblíquo, regimes de deslizamento e reativações tectônicas posteriores, classificando-a como uma bacia pull-apart. A configuração atual da margem, marcada por distintas segmentações estruturais, ressalta o papel fundamental das zonas de fratura na gênese e no desenvolvimento das bacias ao longo do Margem Equatorial Brasileira. Os resultados apresentados contribuem para uma melhor compreensão dos controles estruturais sobre os sistemas petrolíferos na margem equatorial e destacam a importância de estudos futuros envolvendo modelagem estrutural e caracterização geofísica tridimensional.

Palavras-chave: Margem Equatorial Brasileira, Zona de Fratura Romanche, Bacia de Barreirinhas, Tectônica Transtensional, Bacia Pull-apart, Estratigrafia Sísmica

Abstract

The Brazilian Equatorial Margin has emerged as an area of significant scientific and economic interest due to its high petroleum potential, evidenced by major discoveries along conjugate margins of the Equatorial Atlantic. This study investigates the influence of the Romanche Fracture Zone on the tectono-sedimentary evolution of the Barreirinhas Basin, located in the central sector of the Brazilian Equatorial Margin and Guina. Based on integrated analysis of five seismic sections and three exploratory well, structures typical of transtensional environments were identified, including normal faults, listric faults, and negative flower structures, affecting both the basement and overlying sedimentary sequences. These features demonstrate strong tectonic control by the Romanche Fracture Zone over the morphology of the continental shelf, slope, and the internal compartmentalization of the rift and drift sequences. The evolution of the Barreirinhas Basin reflects a complex interaction between oblique rifting, strike-slip regimes, and later tectonic reactivations, classifying it as a pull-apart basin. The current configuration of the margin, marked by distinct structural segmentations, underscores the fundamental role of fracture zones in the genesis and development of basins along the Brazilian Equatorial Margin. The results presented contribute to a better understanding of the structural controls on petroleum systems in the equatorial margin and highlight the importance of future studies involving structural modeling and three-dimensional geophysical characterization.

Keywords: Brazilian Equatorial Margin, Romanche Fracture Zone, Barreirinhas Basin, Transtensional Tectonics, Pull-apart Basin, Seismic Stratigraphy

Lista de Figuras

Figura 1. Representação das cinco etapas da evolução tectônica das bacias sedimentares da margem passiva brasileira.	6
Figura 2. Mapa do Atlântico Equatorial, mostrando as principais zonas de fraturas oceânicas entre a América do Sul e África.....	12
Figura 3. Morfologia do fundo oceânico na porção central da Margem Equatorial, com destaque para a Zona de Fratura Romanche.....	16
Figura 4. Padrões sísmicos utilizados para interpretação sismo-estratigráfica e estrutural.	19
Figura 5. Trechos de uma sessão sísmica mostrando o realce das feições com a aplicação do atributos sísmico de pseudo-relevo (TecVA) e sua combinação com o dado sísmico de amplitude.	20
Figura 6. Perfis compostos dos três poços utilizados. Na imagem é possível observar as formações geológicas, além das respectivas profundidades alcançadas por cada poço e formação.....	21
Figure 1. - cap. 4: Simplified geological map of the central sector of the Brazilian Equatorial Margin (BEM), showing the location of seismic lines and exploratory wells used in the present study.	24
Figure 2. - cap. 4: Schematic illustration of the West Gondwana fragmentation and the formation of the South American and African Atlantic margins (A to C), modified from Mascle and Blazer (1987), Tavares et al., (2020), and de Castro et al., (2022). White arrows indicate the direction of strike-slip movement along the fracture zones and red arrows indicate the direction of oceanic spreading center opening. Precambrian shear zones: AR - Araguaia, KD - Kandi, TBL - Transbrasiliiano Lineament, SP - Senador Pompeu and TG - Tentugal. Oceanic fracture zones: CFZ - Chain, RFZ - Romanche, and SFZ - St. Paul.	25
Figure 3. - cap. 4: Well logs 1-MAS-15-MA, 1-MAS-7-MA and 1-BRSA-729-MAS, displaying the lithological distribution with depth, emphasizing the main stratigraphic units identified: Pirabas, Travosas and Bonfim/Preguiças Formations. Depths are indicated in meters alongside each log. The lithology legend presents the color and texture patterns used to represent the different rock types encountered.....	29
Figure 4. - cap. 4: Seismic line 239_260, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.....	33
Figure 5. - cap. 4: Seismic line 258_7317, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.....	33
Figure 6. - cap. 4: Seismic line 258_7273, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.....	34
Figure 7. - cap. 4: Seismic line 258_7253, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.....	34
Figure 8. - cap. 4: Seismic line 258_7229, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.....	35
Figure 9. - cap. 4: Interpreted seismic sections illustrating the variation in transform structural style within the Barreirinhas Basin along the RFZ, from west to east (A to E). Seismic line locations are shown in (F). BSF – basin sidewall faults.....	38

Figure 10. - cap. 4: Model of a pull-apart basin and its structural elements, developed in response to an oblique transtensional regime (A and B) (adapted from Wu et al., 2009), analogous to the Barreirinhas Basin. The Romanche Fracture Zone (RFZ) represents the principal displacement zone (PDZ) on the south limit, while the basin sidewall faults (BSF) control the shelf break (C). Seismic sections demonstrate the crossing between the RFZ and the BSF faults at the southern limit of the pull-apart system (D). 39

Figure 11. - cap. 4: Schematic representation of the structural styles of the Barreirinhas Basin in the Romanche Fracture Zone – RFZ influence region (1), at the intersection with the basin sidewall faults (BSF) system's border fault zone (2), oceanic region affected by Rift phase II (3)..... 40

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	II
Abstract.....	III
Lista de Figuras.....	IV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação da área de estudo	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos	3
2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO	4
2.1 Formação da Margem Equatorial Brasileira	4
2.1.1 Desenvolvimento em tempo geológico.....	4
2.1.2 Evolução tectônica	6
2.2 Zonas de Fratura Oceânicas da Margem Equatorial Brasileira	9
2.3 A Zona de Fratura Romanche e a Bacia de Barreirinhas	12
2.4.3 Morfologia oceânica da margem equatorial central	15
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 Fundamentação Teórica.....	16
3.1.1 Sísmica de reflexão	17
3.1.2 Poços exploratórios	17
3.2 Banco de Dados	18
4 RESULTADOS/ARTIGO	21
ABSTRACT	23
INTRODUCTION.....	23
GEOLOGICAL SETTING	25
MATERIALS AND METHODS.....	28
RESULTS.....	29
DISCUSSION	35
CONCLUSION	40
ACKNOWLEDGMENTS.....	41
REFERENCES.....	41
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação da área de estudo

A área de estudo deste trabalho compreende o setor central da Margem Equatorial Brasileira (MEB), com foco principal na Bacia de Barreirinhas, localizada no litoral norte do Brasil, no estado do Maranhão. Esta região está inserida no contexto geológico de uma margem transformante e é influenciada diretamente pela presença da Zona de Fratura Romanche (ZFR), uma das maiores e mais significativas estruturas tectônicas do Oceano Atlântico (Tavares, 2017).

A Margem Equatorial Brasileira (MEB) resulta do processo de ruptura do supercontinente Gondwana e da subsequente abertura do Oceano Atlântico, processo este que se iniciou no Jurássico e evoluiu durante o Cretáceo (Zalán, 1983). Ao longo dessa margem, alternam-se segmentos divergentes e transformantes, cuja organização está intimamente relacionada a antigas zonas de cisalhamento pré-cambrianas, que condicionaram a segmentação e a ruptura da litosfera continental. Dentre as principais zonas de fratura presentes nessa margem destacam-se, além da Romanche, as zonas de fratura de São Paulo e Chain (de Castro et al., 2022).

A Bacia de Barreirinhas é uma bacia do tipo pull-apart, formada em contexto tectônico transtensivo ao longo de uma margem transformante oblíqua (de Castro et al., 2022). Sua evolução geológica está diretamente associada à dinâmica da ZFR, que atravessa o Oceano Atlântico em sentido aproximadamente leste-oeste e exerce controle sobre a compartimentação estrutural da margem e a morfologia da plataforma continental, do talude e da planície abissal.

A ZFR atua como limite tectônico significativo entre os segmentos conjugados das placas sul-americana e africana, influenciando o desenvolvimento de estruturas em flor (positivas e negativas), falhas normais, lítricas e inversas, além de reativações de zonas de cisalhamento do embasamento pré-cambriano (Tavares, 2017). Na região de estudo, essas estruturas são bem registradas nos dados sísmicos de reflexão e evidenciam a

complexa interação entre os movimentos transcorrentes e os processos sedimentares associados às fases de rifteamento e drifte.

A análise se concentrou em cinco seções sísmicas transversais à ZFR, nas quais foi possível observar a presença de estruturas tectônicas profundas e a deposição das sequências sedimentares vizinhas tectonicamente. A morfologia da região é formada por uma plataforma continental com declividade suave até a quebra da plataforma, seguida por um talude abrupto que atinge profundidades superiores a 3.000 m, e termina em uma planície abissal com profundidades de até 5.000 m.

Além da Bacia de Barreirinhas, a área estudada interage com estruturas marginais como o Terraço Ceará, que, juntamente com a Ivory-Coast Ghana Ridge (no lado africano), representa uma feição estrutural elevada associada ao regime transpressivo que afetou a ZFR durante o Albiano e Cenomaniano (Masclé and Blaser, 1987; Nemcok et al., 2016) .

A caracterização morfológica da margem, a identificação das estruturas tectônicas e a análise sismoestratigráfica da bacia permitiram entender os mecanismos de controle exercidos pela ZFR sobre a evolução tectono-sedimentar da MEB, que deverão contribuir para o aprimoramento dos modelos geológicos regionais e para a avaliação do potencial petrolífero da região.

1.2 Justificativa

A MEB tem despertado grande interesse devido ao seu potencial petrolífero, impulsionado pelas descobertas de grandes reservatórios em bacias vizinhas. Exemplos notáveis incluem os campos Zaedyus e Liza, encontrados na Guiana e no Suriname em 2011 e 2015, respectivamente, além dos campos Jubilee e Tweneboa, descobertos na costa africana de Gana em 2007 e 2009 (da Silva et al., 2021). Mais recentemente, a identificação do campo Ranger, na Guiana, em 2020, com reservatórios carbonáticos de alta porosidade em águas ultraprofundas (Ramos et al, 2021), reforçou o interesse nas bacias da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão, dada sua proximidade com essas regiões já produtivas.

Nesse contexto, a ZFR se destaca como uma das principais estruturas tectônicas do Atlântico, sendo a maior zona de fratura do planeta (Heezen et al., 1964; Bonatti, 1973; Emery et al., 1975; Gorini, 1977). Sua configuração estrutural é singular, composta por longos segmentos transformantes na direção leste-oeste (E-W) e segmentos divergentes na direção noroeste-sudeste (NW-SE), enquanto as margens vizinhas são predominantemente divergentes, com apenas pequenos trechos transformantes (Azevedo, 1991; de Castro et al., 2025).

Apesar de sua relevância, ainda há uma lacuna científica quanto à influência da ZFR na evolução da MEB. Essa estrutura pode ter desempenhado um papel crucial na segmentação da margem continental, influenciando diretamente a formação e evolução das bacias sedimentares da região. A falta de estudos detalhados sobre sua interação com a tectônica local limita a compreensão da deformação litosférica e da compartimentação estrutural da margem.

A investigação aprofundada da ZFR é essencial para aprimorar o entendimento da história geodinâmica da margem equatorial e dos processos envolvidos na separação entre América do Sul e África. Além disso, compreender sua influência na sedimentação e na evolução das bacias sedimentares pode fornecer informações valiosas para a exploração de hidrocarbonetos. O preenchimento dessa lacuna científica contribuirá significativamente para o avanço do conhecimento geológico da MEB e para uma avaliação mais precisa de seu potencial petrolífero.

1.3 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal investigar a influência da ZFR na evolução tectônica da porção central da MEB por meio da análise e mapeamento dessa estrutura. Para isso, foi realizada a avaliação de sua configuração e impacto na segmentação da margem, contribuindo para um melhor entendimento da geodinâmica regional.

Além disso, busca-se delimitar os compartimentos bacinais afetados pela ZFR, identificando sua relação com a estruturação da bacia de Barreirinhas. A interação entre a zona de fratura e a bacia é avaliada com foco na

compartimentação tectônica, considerando seu papel na deformação litosférica e no controle estrutural das bacias adjacentes.

Esses objetivos foram desenvolvidos por meio da integração de dados sísmicos e da correlação sísmica-poço, permitindo uma interpretação da influência da ZFR na evolução tectônica da MEB. A aplicação dessa abordagem contribuirá para uma melhor caracterização da margem equatorial e suas implicações para a geodinâmica e a exploração de recursos naturais.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Formação da Margem Equatorial Brasileira

2.1.1 Desenvolvimento em tempo geológico

A formação das bacias sedimentares marginais brasileiras está diretamente relacionada à abertura do oceano Atlântico, decorrente da fragmentação do supercontinente Pangea e da separação entre a América do Sul e a África (Zalán, 1983). Esse processo teve início no Jurássico, quando intensos eventos térmicos indicaram que o cráton brasileiro passaria por uma significativa atividade tectônica (Zalán, 1983).

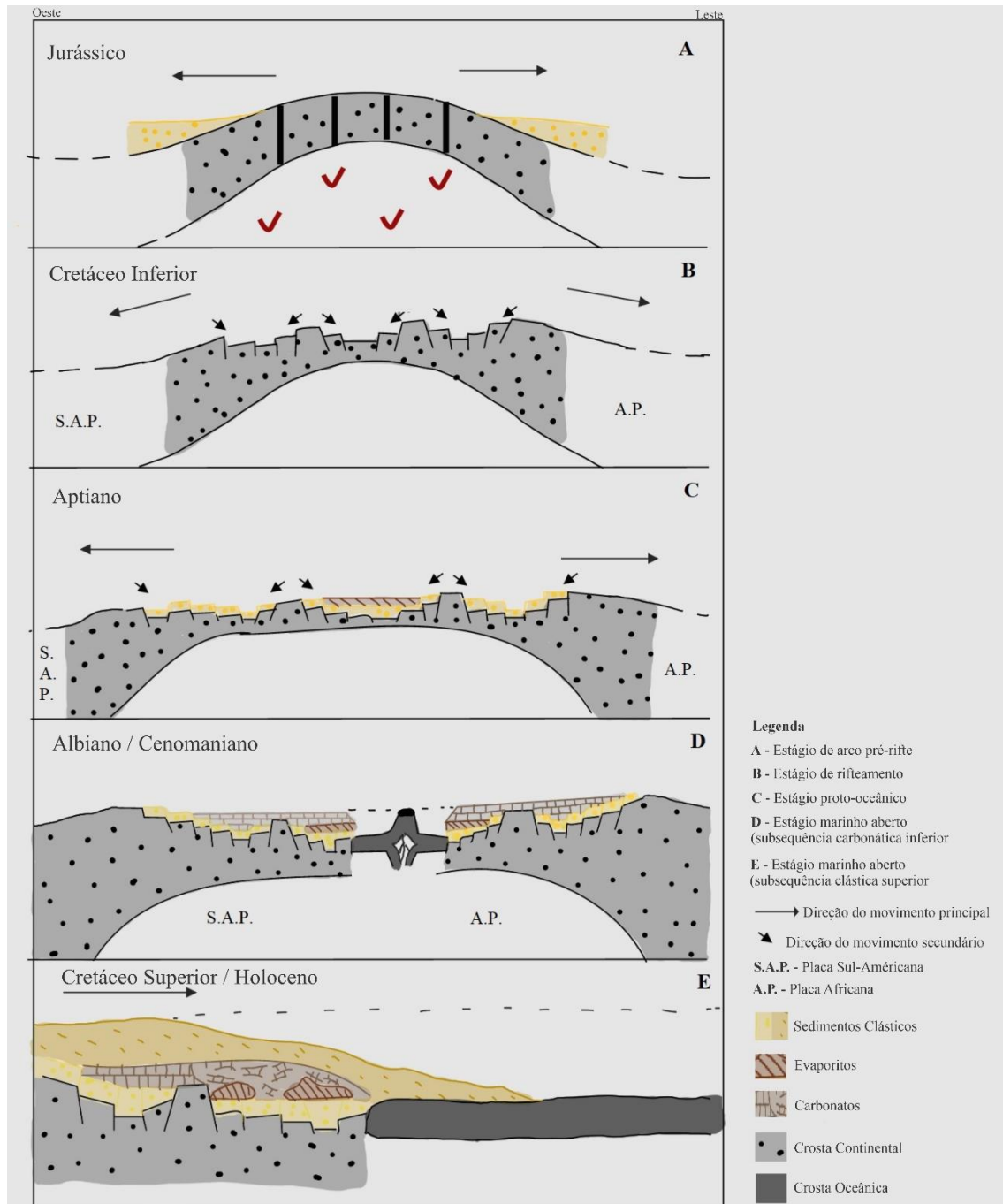
A separação dos continentes ocorreu em estágios distintos. O primeiro estágio, entre o final do Jurássico e o início do Cretáceo, foi caracterizado pela extensão litosférica, levando à ruptura do Gondwana e ao surgimento dos continentes sul-americano e africano. Esse processo resultou na formação de grabéns controladas por falhas na crosta superior, sendo os primeiros sinais da geração das bacias sedimentares (Chang et al., 1992; Mohriak et al., 2008). No estágio seguinte, a atividade tectônica se intensificou, promovendo maior distensão da litosfera e elevação da astenosfera. Como consequência, surgiram riftes intracontinentais que acumularam espessas camadas de sedimentos aluviais, fluviais e lacustres.

Entre o Barremiano e o Aptiano, ocorreu o fim do rifteamento, fase em que falhas de grande magnitude reconfiguraram os blocos crustais e influenciaram a sedimentação. Nesse período, a crosta terrestre começou a sofrer subsidência e as bacias marginais passaram por um processo de

compartimentação (Henry & Brumbaugh, 1995 in Mohriak et al., 2008; Zalán, 1983). Com a formação da Cordilheira Meso-Oceânica Atlântica, entre o Albiano e o Cenomaniano, ocorreu a separação definitiva entre a América do Sul e a África. A tectônica passou a ser dominada pela expansão do oceano Atlântico Sul e pela subsidência termal da crosta, favorecendo a deposição de sedimentos carbonáticos ao longo da margem (Chang et al., 1992).

No Cretáceo Superior, até os dias atuais, a subsidência do oceano transformou o ambiente deposicional, encerrando a sedimentação de carbonatos rasos e iniciando a deposição de sedimentos marinhos profundos. A movimentação do sal tornou-se o principal fator na formação das estruturas tectônicas da margem leste brasileira, enquanto eventos magmáticos, como intrusões alcalinas e vulcanismo submarino, caracterizaram o final do Cretáceo e o início do Terciário na região sudeste (Mohriak et al., 2008). A Figura 1 representa de forma esquemática os estágios da separação.

Figura 1. Representação das cinco etapas da evolução tectônica das bacias sedimentares da margem passiva brasileira.



Fonte: Adaptado de (Zalán, 1983) pela a autora.

2.1.2 Evolução tectônica

Como discorrido anteriormente, a evolução da MEB está diretamente ligada à fragmentação do supercontinente Gondwana e à abertura do Oceano

Atlântico, um processo que ocorreu em diferentes estágios tectônicos e foi marcado por fases de rifteamento, movimentação transcorrente e posterior estabilização como uma margem passiva. O desenvolvimento dessa margem transformante foi influenciado por fatores como a reativação de antigas zonas de cisalhamento, o afinamento crustal e a interação entre a litosfera continental e oceânica (de Castro et al., 2022). A seguir, são descritos os principais estágios dessa evolução, desde o rifteamento inicial até a consolidação da margem transformante passiva.

O primeiro estágio da transformação continental ocorreu entre aproximadamente 210 e 115 milhões de anos atrás (Soares Jr et al., 2011), sendo marcado por pelo menos duas fases de falhamento extensional intracontinental e afinamento da crosta ao longo do que viria a se tornar a margem transformante (de Castro et al., 2022). Durante esse período, houve uma fase rifte ativa desde o final do Triássico até o Cretáceo Inferior, resultando na fragmentação progressiva da litosfera continental. Evidências desse processo estão registradas na Bacia da Foz do Amazonas, onde basaltos datados do Triássico Superior ao Jurássico Inferior indicam o início do magmatismo na borda noroeste da margem (Soares Jr et al., 2011).

Diferentemente de modelos anteriores, que sugeriam que o afinamento crustal só ocorreria em segmentos divergentes após a iniciação da acreção oceânica (Taylor et al., 2009; Basile, 2015), a margem do Atlântico Equatorial passou por um estágio rifte precoce, no qual falhamentos e o adelgaçamento da litosfera continental ocorreram paralelamente às falhas transformantes (de Castro et al., 2022). As principais zonas de fratura oceânica, orientadas na direção leste-oeste, possivelmente começaram a se desenvolver em áreas de crosta continental relativamente fina e aquecida, facilitando a posterior propagação da crosta oceânica (Mescle e Blarez, 1987).

Entre 115 e 110 milhões de anos atrás, iniciou-se um novo estágio de transformação caracterizado pelo surgimento de falhas de deslocamento horizontal dentro do continente. Esse evento marca a transição para uma nova fase tectônica, representando uma discordância pós-rifte anterior ao estágio seguinte da evolução da margem transformante (de Castro et al., 2022).

A partir de aproximadamente 110 milhões de anos atrás, a margem transformante tornou-se ativa, com a litosfera continental deslizando contra a

litosfera oceânica ao longo de zonas de acomodação entre os centros de expansão (Basile, 2015). Essa movimentação resultou em intenso falhamento e na formação de uma ponte crustal alongada, conectando temporariamente os blocos continentais em separação. Falhas proto-transformantes difusas gradualmente se ajustaram à nova dinâmica de espalhamento oceânico, tornando-se mais bem definidas e consolidando-se como uma zona de transformação madura (Gerya, 2013). Esse processo ocorreu inicialmente na Fratura de São Paulo, enquanto outras zonas, como as Fraturas Romanche e Chain, ainda preservavam extensas pontes continentais entre a América do Sul e a África (de Castro et al., 2022).

Durante esse período, os movimentos transcorrentes ao longo das falhas transformantes imprimiram deformações nas sequências sedimentares acumuladas nos riftes (Matos, 2000; Nemcok et al., 2016). O regime tectônico transpressivo gerou estruturas compressivas profundas, incluindo dobras e falhas inversas ao longo da Fratura Romanche na região do Alto de Tutóia (Azevedo, 1991; Davison et al., 2016). No Albiano Médio, por volta de 105 milhões de anos atrás, o regime transformante entre as crostas continental e oceânica já havia avançado para o segmento correspondente à Costa do Marfim e Gana (Antobreh et al., 2009), embora as placas sul-americana e africana ainda estivessem conectadas por uma ponte crustal significativa (de Castro et al., 2022).

O estágio de margem transformante ativa chegou ao fim por volta de 102 a 95 milhões de anos atrás, quando o eixo de acreção oceânica ultrapassou o limite externo da margem transformante (Basile, 2015). Nesse momento, o deslocamento das placas ao longo das falhas transformantes cessou, e as estruturas anteriormente ativas foram abandonadas à medida que o centro de espalhamento oceânico se estabeleceu (de Castro et al., 2022). Antes da ruptura definitiva da ponte continental, ocorreu o soerguimento de cadeias marginais nas extremidades dos segmentos de margem transformante, como nos segmentos de São Paulo, Barreirinhas e Potiguar (de Castro et al., 2022). Essas elevações ficaram separadas do interior continental por bacias pull-apart, onde o regime tectônico originou localmente deformações estruturais características, como dobras e falhas transcorrentes (de Castro et al., 2022).

Mesmo após o estágio transformante ativo da margem continental, as antigas falhas transformantes continuaram a ser reativadas, influenciando as sequências sedimentares depositadas sobre a crosta oceânica recém-formada (de Castro et al., 2022). Na MEB, essas reativações foram impulsionadas por movimentos dextrais ao longo da Fratura Romanche, os quais revitalizaram antigas zonas de cisalhamento do embasamento pré-cambriano (de Castro et al., 2022). Dados magnéticos e sísmicos indicam que essas estruturas tectônicas foram interrompidas contra a Fratura Romanche, induzindo um regime compressivo na região da cadeia marginal do Terraço Ceará (Tavares et al., 2022).

Além disso, processos tectônicos mais distantes, como a subducção da Placa de Nazca e a ascensão da Cordilheira dos Andes, exerceram influência na reativação das falhas transformantes e na deformação das sequências sedimentares ao longo da Placa Sul-Americana. Essas forças induziram inversões tectônicas e reativações transcorrentes, contribuindo para a complexa evolução da margem equatorial e moldando sua configuração estrutural até os dias atuais (Bezerra et al., 2020; Bezerra et al., 2024).

2.2 Zonas de Fratura Oceânicas da Margem Equatorial Brasileira

As zonas de fraturas oceânicas (ZFOs) são feições tectônicas lineares e profundas presentes no assoalho oceânico (Fig. 2). Essas estruturas se desenvolvem geralmente perpendiculares às cadeias meso-oceânicas e permanecem como elementos permanentes na litosfera oceânica. Elas podem se apresentar como segmentos isolados ou em múltiplas subdivisões ao longo de sua extensão (Cande et al., 1988).

O termo "zona de fratura oceânica" é amplamente empregado para designar tanto as falhas transformantes ativas, responsáveis pelo deslocamento lateral das placas tectônicas, quanto suas porções inativas. Entretanto, em uma definição mais restrita, refere-se especificamente às extensões inativas dessas falhas. As ZFOs são caracterizadas por faixas alongadas e estreitas de topografia irregular, incluindo cadeias lineares e escarpas (Quental, 2002), que delimitam regiões oceânicas com diferentes profundidades (Le Pichon e Fox, 1971).

As ZFOs desempenham um papel essencial na dinâmica das placas tectônicas. As porções ativas dessas zonas correspondem a falhas transformantes, acomodando o deslocamento lateral entre blocos litosféricos adjacentes. Em contrapartida, suas seções inativas, situadas em regiões mais afastadas da cadeia meso-oceânica, apresentam baixa ou nenhuma atividade sísmica, sendo denominadas simplesmente como zonas de fratura oceânica (Wilson, 1965).

Na MEB, destacam-se algumas das principais zonas de fratura do Atlântico Sul, como São Paulo, Romanche e Chain. Essas feições atravessam a zona axial da cordilheira meso-oceânica do Atlântico e seus flancos, estendendo-se pelo fundo das bacias oceânicas adjacentes e alcançando as margens continentais da América do Sul e da África (Udintsev, 1996).

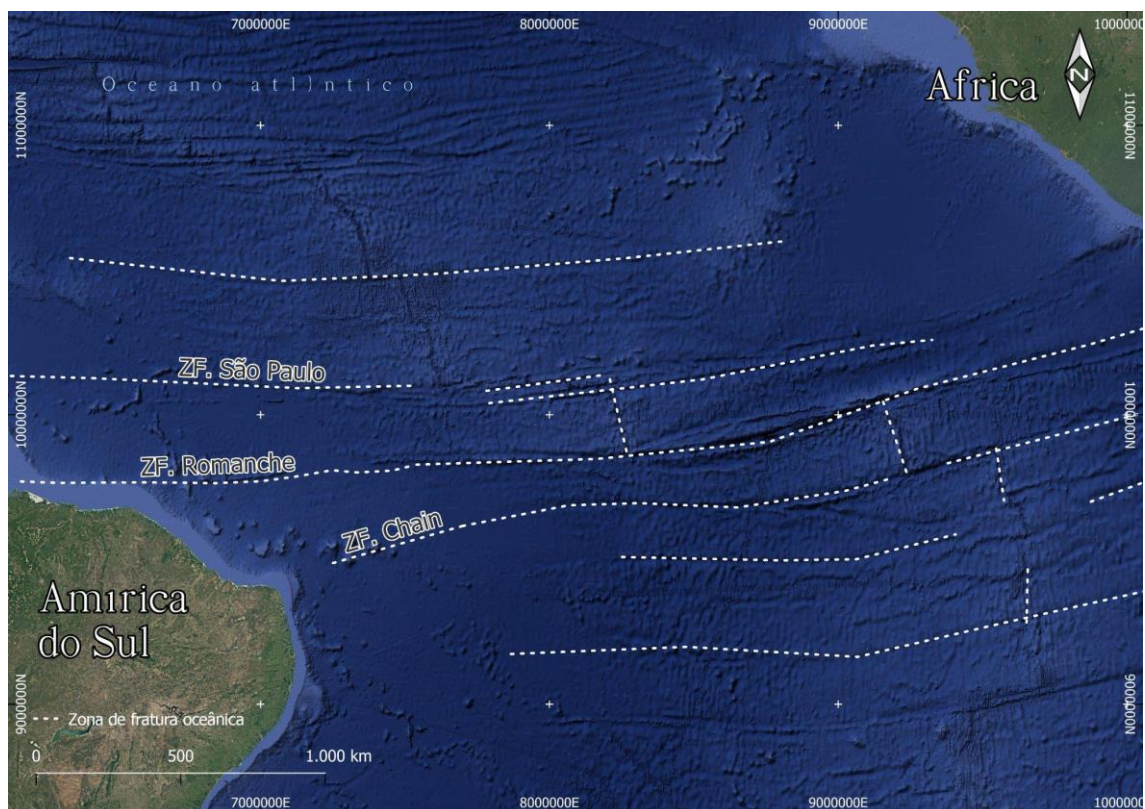
Próximo à costa do nordeste brasileiro, a identificação das ZFOs em mapas batimétricos é dificultada pela espessa camada sedimentares que as recobrem. De forma semelhante ao que ocorre na margem continental africana, essas fraturas dividem a costa brasileira em segmentos distintos, nos quais as bacias sedimentares parecem ter se desenvolvido independentemente entre si.

Além de seu papel na tectônica, as ZFOs podem funcionar como barreiras topográficas que dificultam a dispersão e deposição de sedimentos. Um exemplo notável é a ZFR, que serviu como um bloqueio natural, impedindo que sedimentos oriundos do continente e da plataforma continental se deslocassem para a porção norte da cordilheira meso-oceânica (Tavares, 2017). Adicionalmente, ao longo dessas estruturas podem ocorrer montes submarinos e elevações crustais, muitas vezes relacionadas a eventos de magmatismo fissural pós-rifte (Morais Neto et al., 2003).

Pesquisas, como a de Tavares, 2017, sobre a evolução da ZFR na MEB indicam que essa feição, orientada na direção leste-oeste, possui aproximadamente 70 km de largura e apresenta cadeias elevadas que sobressaem até 2,5 km acima da topografia oceânica circundante (Tavares, 2022). Análises de anomalias magnéticas sugerem que os primeiros centros de espalhamento se desenvolveram com uma orientação oblíqua em relação à fratura, ajustando-se posteriormente para uma configuração ortogonal (Tavares, 2017).

Evidências também sugerem que antigas zonas de cisalhamento pré-cambrianas presentes no continente podem se estender até o ambiente oceânico, onde são mantidas ativas por movimentações esporádicas das zonas de fratura oceânica. Essa continuidade estrutural entre feições geológicas continentais e oceânicas reforça a importância das ZFOs na evolução tectônica da MEB. Além disso, essas estruturas influenciaram a definição dos contornos internos e externos dos segmentos marginais, desempenhando um papel fundamental na compartimentação e evolução estrutural da margem atlântica (de Castro et al., 2022).

Figura 2. Mapa do Atlântico Equatorial, mostrando as principais zonas de fraturas oceânicas entre a América do Sul e África.



Fonte: modificado do Google Earth.

2.3 A Zona de Fratura Romanche e a Bacia de Barreirinhas

A ZFR é uma das maiores falhas transformantes do planeta, apresentando um rejeito de aproximadamente 950 km de extensão, sendo

considerada a segunda maior desse tipo no mundo (Francheteau e Le Pichon, 1972; Gorini, 1977). Essa estrutura se estende entre as latitudes de 5° N e 3° S, atravessando toda a extensão do Atlântico Equatorial e conectando os continentes sul-americano e africano através do assoalho oceânico (Tavares, 2017) (Fig. 2).

No lado da Placa Sul-Americana, a ZFR intercepta a margem equatorial do Brasil, enquanto no lado africano cruza as plataformas continentais da Costa do Marfim e de Gana (Brownfield e Charpentier, 2006) (Fig. 2). Além disso, a presença de falhas normais na borda da plataforma continental e nas cadeias submarinas indica reativações neotectônicas, uma vez que essas falhas atingem camadas sedimentares mais recentes.

A formação da ZFR teve início como uma falha transformante que conectava segmentos continentais, desempenhando um papel significativo durante o processo de rifteamento que levou à separação das margens sul-americana e africana. Nos estágios iniciais, a estrutura se comportava como uma ampla faixa transtensional dextral (Davison et al., 2016).

Durante o Albiano, por volta de 110 milhões de anos atrás, ocorreu uma mudança na orientação do deslocamento das placas, levando a uma fase de transpressão dextral. Esse evento resultou na formação de uma extensa região caracterizada por dobras e cinturões de falhas reversas, abrangendo uma área de aproximadamente 500 km de comprimento por 70 km de largura na região do Alto de Tutóia, região leste da Bacia de Barreirinhas (Zalán e Warner, 1985; Azevedo, 1987; Davison et al., 2016).

A Bacia de Barreirinhas começou a se desenvolver ainda nas fases pretéritas e iniciais da ZFR, no início do Aptiano, como uma bacia transtensional de formato rômboico (Azevedo, 1991), originada da interação entre a transcorrência dextral e a projeção da falha transformante sobre a crosta continental (Trodstorf et al., 2007). Com a progressão da atividade tectônica, a evolução da ZFR passou para um estágio oceânico, que seguiu os primeiros episódios de tectonismo intracontinental associados ao rifteamento.

Estudos de anomalias magnéticas revelam que os centros iniciais de espalhamento estavam dispostos obliquamente em relação à zona de fratura, formando ângulos de 26° e 30° no sentido horário ao sul e ao norte, respectivamente (Tavares, 2017). Essas anomalias passaram por um processo

de rotação no sentido horário ao longo do tempo, tornando-se gradualmente ortogonais à falha transformante na época da isócrona 34, aproximadamente 83,5 milhões de anos atrás.

No setor norte da ZFR, a Bacia de Barreirinhas exibe características típicas de uma bacia de margem passiva, conectando-se gradualmente à Bacia do Pará-Maranhão. Durante sua evolução, a ZFR se desenvolveu paralelamente a um sistema de riftes, orientado na direção leste-oeste, que caracteriza a Margem Transformante de Barreirinhas (Masle e Blazer, 1987 e 1988).

Além disso, os movimentos dextrais ao longo da falha contribuíram para a reativação de antigas zonas de cisalhamento de idade pré-cambriana, originando falhas transcorrentes de grande porte. Essas falhas apresentam estruturas do tipo flor positiva e negativa, especialmente na região da borda externa entre o segmento de margem transformante de Barreirinhas e o segmento de margem divergente do Ceará (de Castro et al., 2022). A ZFR também mantém uma forte relação com outras estruturas tectônicas, interagindo, por exemplo, com o Lineamento Transbrasiliiano (LTB). Essa interação influenciou diretamente a formação do Terraço Ceará, um alto marginal localizado na extremidade ocidental da ZFR (Andrade, 2018; Tavares, 2017).

No lado africano, a ZFR apresenta uma feição equivalente denominada Cadeia Costa do Marfim-Gana (Ivory-Coast Ghana Ridge - ICGR), situada na margem conjugada da África. O Terraço Ceará e o ICGR compartilham semelhanças estruturais, sugerindo que ambos resultaram da mesma fase de evolução da ZFR, quando o centro de espalhamento oceânico atingiu os limites entre as crostas continental e oceânica, ocorrida entre o Albiano Superior e o Cenomaniano. Esse processo envolveu o soerguimento flexural dessas feições em resposta a erosão diferencial e ao intercâmbio térmico com o centro de espalhamento oceânico (Andrade, 2018).

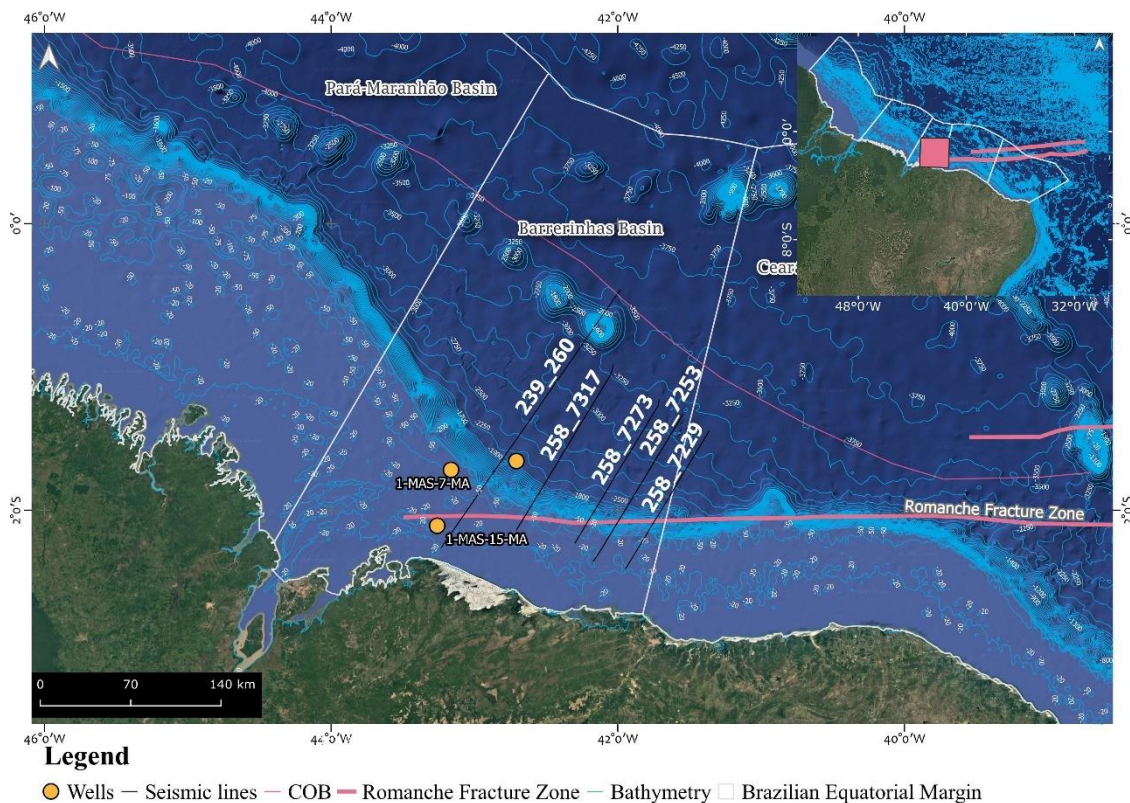
2.4.3 Morfologia oceânica da margem equatorial central

A Margem Equatorial do Brasil possui uma configuração influenciada por processos tectônicos distensivos e transformantes. Essa margem passiva, originada com a separação entre América do Sul e África, é marcada por bacias sedimentares profundas, montes submarinos e feições estruturais associadas às

zonas de fratura. A plataforma continental apresenta uma direção E-W alinhada com a ZF Romanche na região das bacias de Barreirinhas e Ceará Oeste, desviando para NW-SE nas porções noroeste e sudeste da margem equatorial (Fig. 3). A inclinação da plataforma é gradual, variando de aproximadamente -0,4 m na linha de costa até cerca de -34 m na sua borda externa. O talude continental torna-se mais inclinado, superando os 3 km de profundidade, enquanto a elevação continental desce de 3,5 km para 4,1 km até alcançar a planície abissal, onde as profundidades atingem quase 5 km (Tavarres, 2017).

Uma característica marcante da região é o alinhamento de montes submarinos na direção E-W. Essa sequência se estende desde o oceano profundo até próximo à plataforma continental, mantendo um trajeto paralelo à Zona de Fratura Chain e apresentando uma curvatura para noroeste ao se aproximar da margem continental. A cadeia de montes submarinos atravessa diagonalmente a ZFR e segue até a Zona de Fratura São Paulo, com alguns de seus elementos estruturais alinhados diretamente à ZFR, como visualizado entre as latitudes 1-2°S a leste da Fig. 5. Essas elevações variam em profundidade, indo de algumas dezenas de metros até mais de 2 km em relação ao fundo oceânico circundante (Tavares, 2017). O alinhamento dos montes submarinos indica que o fluxo magmático canalizado por essa estrutura ocorreu de maneira irregular, gerando uma morfologia descontínua (Fig. 5).

Figura 3. Morfologia do fundo oceânico na porção central da Margem Equatorial, com destaque para a Zona de Fratura Romanche.



Fonte: modificado do Google Earth.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Fundamentação Teórica

A pesquisa visa investigar como a ZFR influencia a evolução estrutural e sedimentar do setor central da MEB, focando na Bacia de Barreirinhas. Para alcançar este objetivo, foi empregada a técnica de sísmica de reflexão em conjunto com dados de poços, ambos cruciais para a caracterização detalhada das estruturas subsuperficiais e dos processos geológicos em curso.

3.1.1 Sísmica de reflexão

A sísmica de reflexão é fundamentada na propagação de ondas sísmicas. Estas ondas propagam-se até interceptar uma interface entre dois meios geológicos com impedâncias sísmicas contrastantes. Uma vez que, a onda incide nesta interface, uma parte dela será refletida e a outra seguirá refratada para a próxima interface, e assim sucessivamente até que a onda sísmica se disperse completamente. Neste sentido, a sísmica reflexão fornece a trajetória e o tempo de percurso que a onda sísmica leva para incidir e refletir nas estruturas em subsuperfície (Kearey et al., 2009).

Desta forma, os dados sísmicos, não apenas, possibilitam uma análise estrutural, como também, sequencial da geologia em subsuperfície. A interpretação sísmica estrutural, voltada para a prospecção de hidrocarbonetos, pode localizar, não só, armadilhas estruturais, mas também, possíveis rotas de migração - falhas e fraturas por exemplo - (Kearey et al., 2009), dois elementos essenciais de um sistema petrolífero. Bem como, a sismoestratigrafia correlaciona refletores sísmicos e os associa a sequências sismoestratigráficas, formando um pacote sísmico geneticamente conectado (Montenegro, 2020). Além disso, este método é responsável por mais de 90% do investimento direcionado à prospecção de hidrocarbonetos (Thomas, 2001), visto que possui um custo-benefício baixo e proporciona uma avaliação detalhada do local selecionado, assim minimizando o risco exploratório.

3.1.2 Poços exploratórios

A Geofísica possui vários métodos indiretos para a investigação em subsuperfície, no entanto, apenas um dado de poço pode confirmar, de fato, tais interpretações (Nery, 2013). Deste modo, dados geológicos (amostra de calha, testemunhos, testes de formação etc.) e geofísicos de poços, como perfis elétricos, acústicos e/ou radioativos permitem a realização de análises aprofundadas sobre as formações litoestratigráficas e estruturas em subsuperfície. Tais dados podem ser subdivididos em qualitativo e quantitativo, onde o primeiro fornece informações como: tipos de fluidos, salinidade das águas intersticiais, litologia, fraturamentos, permeabilidade, zonas de perdas de circulação, cimentação, produção de hidrocarboneto, testes de avaliação e

previsão de pressões anômalas. Enquanto as avaliações quantitativas permitem determinar a espessura de camadas, resistividade, velocidade das ondas elásticas, densidade, dimensão da quantidade de hidrocarboneto residuais, pressão de poros e porosidade (Montenegro, 2020).

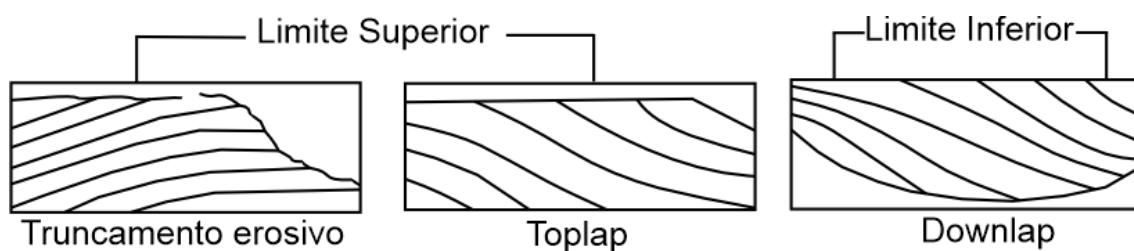
3.2 Banco de Dados

O estudo utilizou dados sísmicos de reflexão e de poços fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), obtidos por meio de levantamentos geofísicos e perfuração de poços na Bacia de Barreirinhas. A sísmica de reflexão é amplamente reconhecida por sua capacidade de gerar imagens detalhadas das camadas subsuperficiais, permitindo a análise de estruturas geológicas e a interpretação de processos sedimentares.

Além disso, os dados de poços contribuem significativamente para aumentar a confiabilidade das interpretações geofísicas realizadas na região. O foco do estudo foram as estruturas tectônicas transtensivas na Bacia de Barreirinhas influenciadas pela ZFR. A amostragem abrangeu áreas estrategicamente selecionadas dentro da bacia, com o objetivo de capturar variações estruturais e sedimentares de oeste para leste, relacionadas à influência da zona de fratura, incluindo seu comportamento no contexto da quebra da plataforma continental.

Os dados sísmicos foram interpretados e analisados para identificar feições estruturais, de modo que possibilitou caracterizar diferentes geometrias de falhas e discordâncias. Foram interpretados elementos, incluindo identificação de descontinuidades e terminações de refletores do tipo toplap, onlap, downlap e truncamento erosivo e padrões sísmicos (Fig. 4), para traçar as sequências tectono-estratigráficas e feições estruturais com o intuito de compreender a interação entre a ZFR e a evolução da Bacia de Barreirinhas.

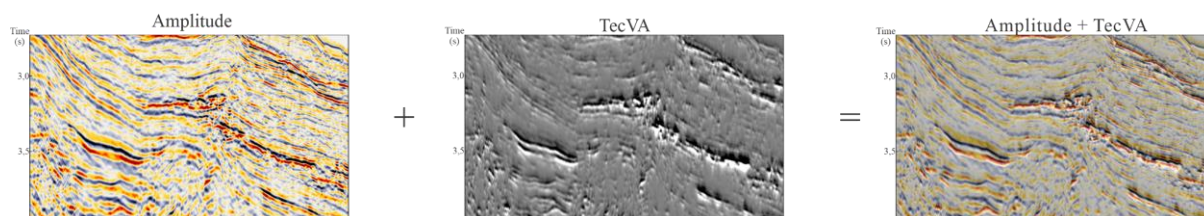
Figura 4. Padrões sísmicos utilizados para interpretação sísmo-estratigráfica e estrutural.



Fonte: adaptado de Mitchum et. al., 1977 pela autora.

Para contornar as limitações de visibilidade, é comum o uso de técnicas avançadas de processamento, como a aplicação de atributos sísmicos na intenção de aprimorar a resolução e a confiabilidade das interpretações. Na pesquisa foi empregado o atributo de pseudo-relevo (ou TecVA), em combinação com a seção sísmica de amplitude, como mostra a Figura 5.

Figura 5. Trechos de uma sessão sísmica mostrando o realce das feições com a aplicação do atributo sísmico de pseudo-relevo (TecVA) e sua combinação com o dado sísmico de amplitude.

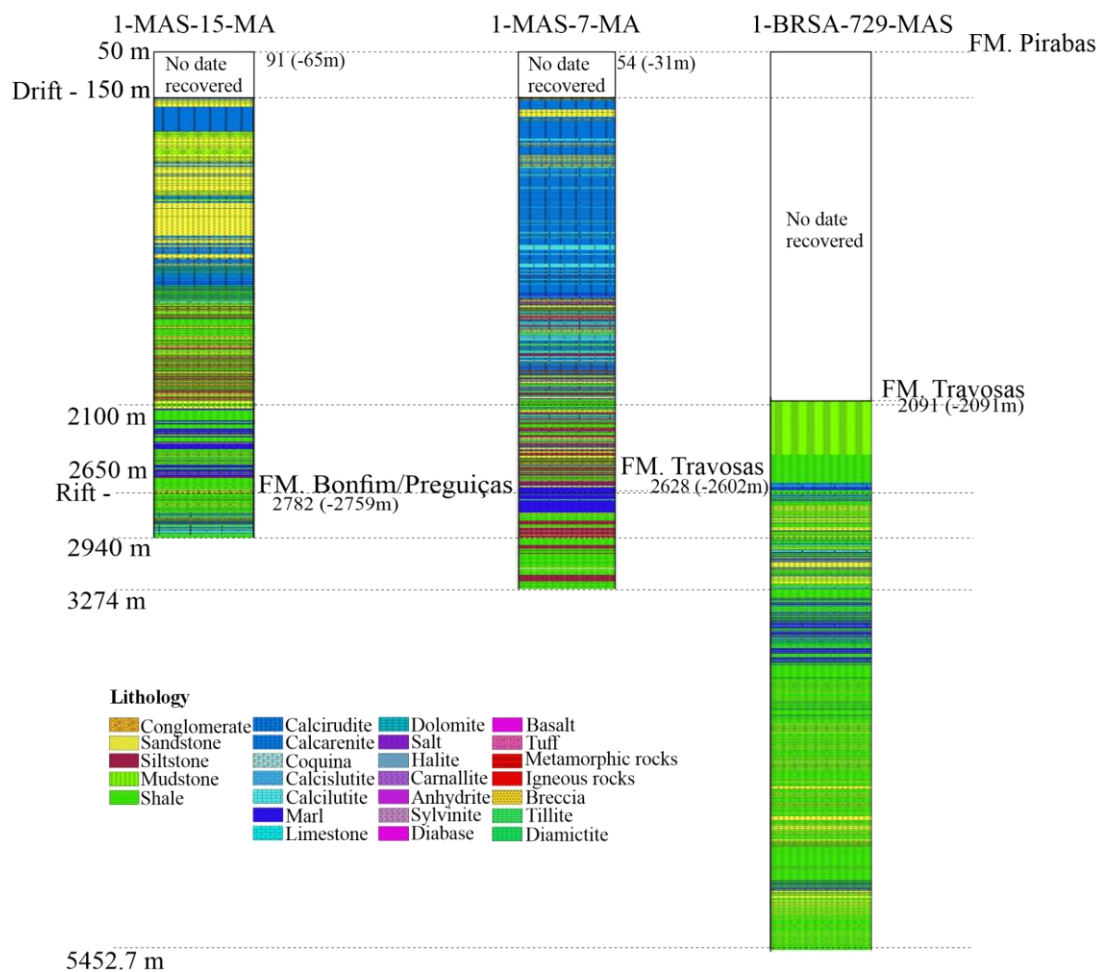


Fonte: Autora.

Entretanto, mesmo com essas abordagens, a incerteza associada à interpretação sísmica em grandes profundidades permanece elevada, exigindo uma análise integrada com outros tipos de dados geológicos e geofísicos para aumentar a precisão na caracterização da subsuperfície. Para assegurar a validade dos resultados, foram utilizados dados de poços para fornecer um caráter litoestratigráfico às sequências sísmicas interpretadas. A confiabilidade dos resultados foi suportada pela revisão crítica dos resultados obtidos.

Para a interpretação sismostratigráfica da linha 0239-260, foram utilizados três poços (1-MAS-1MA, 1-MAS-7MA e 1-BRSA-729-MAS), fig.6, para a realização da amarração entre as sequências sedimentares e seus respectivos refletores. Neles foi possível identificar as discordâncias do Albiano Superior e do Maastrichtriano Inferior.

Figura 6. Perfis compostos dos três poços utilizados. Na imagem é possível observar as formações geológicas, além das respectivas profundidades alcançadas por cada poço e formação.



Fonte: a autora.

4 RESULTADOS/ARTIGO

Influence of the Romanche Fracture Zone on the tectono-sedimentary evolution of the Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin

Influência da Zona de Fratura Romanche na Evolução Tectono-Deposicional da Bacia de Barreirinhas, Margem Equatorial Brasileira

Short Title: Romanche Fracture Zone influence on basin evolution

¹Saywry Virginio de Carvalho*, saywry.virginio.128@ufrn.edu.br, ORCID 0009-0000-5049-4609

Federal University of Rio Grande do Norte, Av. das Engenharias, Central Campus, 59078-970, Natal-RN, Brazil, P.O. Box 1524

^{1,2} David Lopes de Castro, david.castro@ufrn.br, ORCID 0000-0003-1110-9389

² Odilon Keller Filho, okfilho@hotmail.com, ORCID a

² Lívian Rafaely de Santana Gomes Pinheiro, livianrafaely@gmail.com, ORCID 0000-0001-6606-8807

¹ Aline Cristine Tavares, tavares_ac@outlook.com, ORCID 0000-0002-8132-268X

*Corresponding author

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Geologia.

Number of words: 7394

Number of figures: 11

Number of tables: 0

ABSTRACT

The Brazilian Equatorial Margin has emerged as an area of significant scientific and economic interest due to its high petroleum potential, evidenced by major discoveries along conjugate margins of the Equatorial Atlantic. This study investigates the influence of the Romanche Fracture Zone on the tectono-sedimentary evolution of the Barreirinhas Basin, located in the central sector of the Brazilian Equatorial Margin. Based on integrated analysis of five seismic sections and exploratory well data, structures typical of transtensional environments were identified, including normal faults, listric faults, and negative flower structures, affecting both the basement and overlying sedimentary sequences. These features demonstrate strong tectonic control by the Romanche Fracture Zone over the morphology of the continental shelf, slope, and the internal compartmentalization of the rift and drift sequences. The evolution of the Barreirinhas Basin reflects a complex interaction between oblique rifting, strike-slip regimes, and later tectonic reactivations, classifying it as a pull-apart basin. The current configuration of the margin, marked by distinct structural segmentations, underscores the fundamental role of fracture zones in the genesis and development of basins along the Brazilian Equatorial Margin. The results presented contribute to a better understanding of the structural controls on petroleum systems in the equatorial margin and highlight the importance of future studies involving structural modeling and three-dimensional geophysical characterization.

Keywords: Transtensional Tectonics; Seismic Stratigraphy; Pull-apart Basin; Flower Structure.

INTRODUCTION

The Brazilian Equatorial Margin (BEM) has attracted increasing attention from both the scientific community and the oil industry due to its high exploratory potential, evidenced by the discovery of significant reservoirs along the conjugate continental margins of the Equatorial Atlantic and Guianana and Suriname. In the northern South American region, notable petroleum fields include Zaedyus and Liza, discovered in Guyana and Suriname in 2011 and 2015, respectively (Travassos; Freitas, 2021). Similarly, on the conjugate African margin, the Jubilee and Tweneboa fields, identified in Côte d'Ivoire and Ghana in 2007 and 2009, also demonstrated high oil reserves (da Silva et al., 2021). More recently, the Ranger field was discovered in Guyana in 2020, containing high-porosity carbonate reservoirs in ultra-deep waters, which further amplified interest in the Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, and Barreirinhas basins due to their strategic proximity to these proven productive provinces (Ramos, 2021).

In this context, the Romanche Fracture Zone (RFZ) emerges as one of the main tectonic structures of the equatorial Atlantic Ocean (Heezen et al., 1964; Bonatti, 1973; Emery et al., 1975; Gorini, 1977). Classified as the world's most extensive fracture zone, its structural configuration is associated with long E-W oriented transform continental margin segments flanked by NW-SE trending divergent segments. In contrast, neighboring continental margins are predominantly divergent, featuring only short transform sections (Azevedo, 1991; Tavares et al., 2020).

In the BEM, the RFZ is relatively aligned with the continental shelf break along the Barreirinhas Basin and the western portion of the Ceará Basin (Fig. 1). These two basins form the transform margin segment in the central BEM sector (de Castro et al., 2022; Tavares et al., 2022). Despite the RFZ's relevance in controlling the tectono-structural framework of the central Equatorial Atlantic Margin, a knowledge gap persists regarding its precise influence on the tectono-sedimentary evolution of the Brazilian equatorial margin. This large-scale structure is believed to have played a crucial role in continental margin segmentation, directly affecting the genesis and development of the sedimentary basins of this region as well as their potential petroleum systems. The scarcity of detailed studies exploring the interaction between the RFZ and local tectonics limits the understanding of lithospheric deformation and the structural compartmentalization of the margin (de Castro et al., 2022).

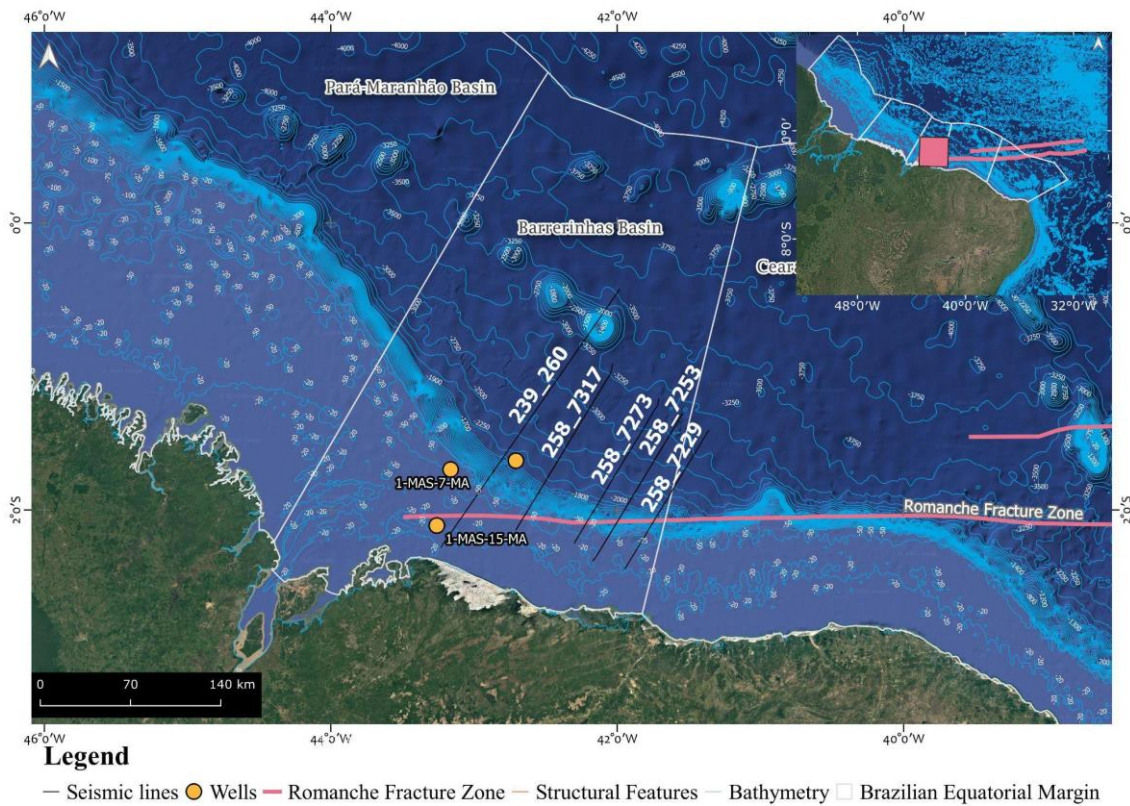


Figure 1. Simplified location map of the central sector of the Brazilian Equatorial Margin (BEM), showing the location of seismic lines and exploratory wells used in the present study.

This research primarily aims to investigate the influence of the RFZ on the tectonic evolution in the central sector of the BEM. This region represents the transform margin segment formed by the Barreirinhas and Ceará Oeste basins (Fig. 1), which is directly conditioned by the dextral strike-slip movement along the RFZ. To achieve this objective, five seismic sections were analyzed through seismic-stratigraphic and structural interpretation. The transtensional tectonic regime that controlled the deposition and deformation of the rift and drift sequences within the Barreirinhas Basin was characterized, particularly in the continental shelf break and slope region. Changes in the structural style of the

RFZ from west to east reveal how strike-slip movements obliquely formed the transform margin during the process of continental stretching and breakup.

GEOLOGICAL SETTING

The origin of the BEM is directly related to the fragmentation of the Pangea supercontinent and the subsequent separation between South America and Africa, a process initiated during the Jurassic period (Zalán, 1983). This continental-scale tectonic event triggered several evolutionary phases, beginning with an initial stage of lithospheric extension that promoted the breakup of Western Gondwana and the formation of the South American and African continental blocks. Consequently, grabens bounded by normal faults developed. Subsequently, an intracontinental rifting phase was established, characterized by intense lithospheric distension, asthenospheric upwelling, and the deposition of thick sedimentary sequences. The breakup between the continents occurred between the Albian and Cenomanian (Cretaceous), with the formation of the Mid-Atlantic Ridge and the progressive thermal subsidence of adjacent continental margins (de Castro et al., 2022).

The evolution of the BEM also reflects the fragmentation process of the West Gondwana supercontinent and the opening of the Equatorial Atlantic Ocean (Fig. 2). This process developed through distinct tectonic stages, involving rifting phases, dextral strike-slip movements, and subsequently, the transition to a passive transform continental margin. The development of the BEM, marked by the succession of divergent and transform margin segments, was strongly influenced by Precambrian structural inheritance. Ancient shear zones acted as weakness zones, conditioning the segmentation of the lithosphere and guiding its rupture along the oceanic fracture zones (de Castro et al., 2022; Tavares et al., 2022).

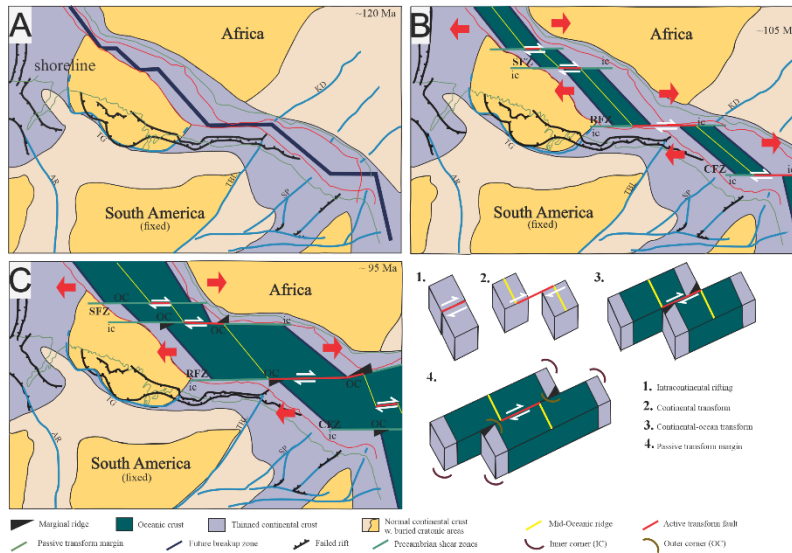


Figure 2. Schematic illustration of the West Gondwana fragmentation and the formation of the South American and African Atlantic margins (A to C), modified from Mascle and Blazer (1987), Tavares et al., (2020), and de Castro et al., (2022). White arrows indicate the direction of strike-slip movement along the fracture zones and red arrows indicate the direction of oceanic spreading center opening. Precambrian shear zones: AR - Araguaia, KD - Kandi, TBL -

Transbrasiliano Lineament, SP - Senador Pompeu and TG - Tentugal. Oceanic fracture zones: CFZ - Chain, RFZ - Romanche, and SFZ - St. Paul.

The main stages of the West Gondwana supercontinent breakup involved the progressive separation between South America and Africa, as well as the formation of the oceanic fracture zones (St. Paul, Romanche, and Chain). The continental margin was compartmentalized into NW-SE trending divergent segments and E-W trending transform segments. The transform segment encompassing the Barreirinhas and western Ceará basins is directly controlled by the RFZ and bounded by the Tentugal shear zone to the west and the Transbrasiliano shear zone to the east (Fig. 2). The main stages of this evolution, from initial rifting to the consolidation of the passive transform continental margin, are described as follows.

The first stage of continental rupture occurred approximately between 210 and 115 Ma (Soares Jr. et al., 2011), characterized by at least two phases of intracontinental extensional faulting (Fig. 2A) and crustal thinning along what would become the current transform margin (de Castro et al., 2022). During this period, an active rift phase extended from the Late Triassic to the Early Cretaceous, resulting in the progressive fragmentation of the continental lithosphere. Evidence of this process is recorded in the Foz do Amazonas Basin, where basalts dated from the Late Triassic to Early Jurassic indicate the onset of magmatism at the northwestern edge of the margin (Soares Jr. et al., 2011).

In contrast to previous models, which suggested that crustal thinning would only occur in divergent segments after the initiation of oceanic accretion (e.g., Taylor et al., 2009; Basile, 2015), the Equatorial Atlantic margin underwent an early rift stage. In this stage, faulting and the thinning of the continental lithosphere occurred parallel to the transform faults (de Castro et al., 2022). The main oceanic fracture zones, oriented in an east-west direction, possibly began to develop in areas of relatively thin and heated continental crust, facilitating the subsequent propagation of the oceanic crust (Masle and Blarez, 1987).

Between 115 and 110 Ma, a new rifting stage began, characterized by the development of strike-slip faults within the continent. This event marks the transition to a new tectonic phase, representing a post-rift unconformity prior to the subsequent stage of transform margin evolution (de Castro et al., 2022). From approximately 110 Ma, the transform margin became active (Fig. 2B), with the continental lithosphere sliding against the oceanic lithosphere along accommodation zones between spreading centers (Basile, 2015). This movement resulted in intense faulting and the formation of an elongated continental bridge, temporarily connecting the continental blocks. Diffuse proto-transform faults gradually adjusted to the new oceanic spreading dynamics, becoming clearly delineated and consolidating into a mature transform fault zone (Gerya, 2013). This process initially occurred in the St. Paul Fracture Zone (SFZ), while other oceanic fracture zones, such as Romanche and Chain, still preserved extensive continental bridges between South America and Africa (de Castro et al., 2022).

During this period, strike-slip movements along the transform faults caused deformation in the sedimentary sequences deposited in the rifts (Matos, 2000; Nemcok et al., 2016). A transpressional tectonic regime generated deep compressive structures, including folds and reverse faults, at the western end of

the RFZ (Azevedo, 1991; Davison et al., 2016). By the Middle Albian, around 105 Ma, the continent-ocean transform phase had already advanced to the continental margin segment corresponding to Côte d'Ivoire and Ghana (Antobreh et al., 2009), although the South American and African plates were still connected by a significant continental bridge (de Castro et al., 2022).

The active transform margin stage ceased approximately between 102 and 95 Ma (Fig. 2C), when the oceanic accretion axis crossed the outer limit of the transform margin (Basile, 2015). At this point, plate displacement along the transform faults was completed, and the previously active structures were abandoned as the oceanic spreading center became established (de Castro et al., 2022). Before the definitive rupture of the continental bridge, uplift of marginal ridges and crustal plateaus occurred at the extremities of the equatorial margin, such as in the Saint Paul, Barreirinhas, and Potiguar transform margin segments (de Castro et al., 2022). These elevations became separated from the continental interior by marginal basins, where the tectonic regime originated characteristic structural deformations, such as folds and positive flower structures (Tavares et al., 2020; de Castro et al., 2022).

Subsequent to the passive margin stage, the ancient transform faults continued to be reactivated, influencing the sedimentary sequences deposited on the recently formed oceanic crust (de Castro et al., 2022). In the central sector of the BEM, dextral movements along the RFZ reactivated ancient Precambrian basement shear zones (de Castro et al., 2022). Magnetic and gravimetric data indicate that these tectonic structures were influenced by the RFZ, inducing a compressive regime in the Ceará Terrace marginal ridge (Tavares et al., 2020). Furthermore, distant tectonic processes, such as the subduction of the Nazca Plate and the uplift of the Andes, influenced the reactivation of the transform faults and the deformation of sedimentary sequences along the South American Plate. These forces induced tectonic inversions and strike-slip reactivations, contributing to the complex evolution of the equatorial margin and shaping its structural configuration to the present day (Bezerra et al., 2020; Bezerra et al., 2023).

The Drift phase corresponds to a stage in the evolution of sedimentary basins and continental margins formed in transtensional or transform contexts, occurring after the initial rifting and pull-apart phases (Azevedo et al., 1985). In the Barreirinhas Basin, this phase began in the Albian-Cenomanian and extended into the Tertiary (Azevedo et al., 1985). From a broader outlook, it indicates the beginning of a stabilized oceanic crust (Heine et al., 2013) and is related to widespread post-rift subsidence (de Castro et al., 2022). From a sedimentary perspective, the drift phase is characterized by a significant transgression, resulting in the deposition of marine sediments (Azevedo et al., 1985). Thick sedimentary sequences were deposited on the relatively thin rift sequence in the distal oceanic domains of the basin, including deep-water deposits (de Castro et al., 2022). In the Barreirinhas Basin, these characteristics are represented by the Caju and Humberto de Campos groups (Azevedo et al., 1985).

This low-intensity tectonic phase is marked by the occurrence of tilting related to thermal and flexural processes. Subsequently, tectonic control became dominated by gravitational action, which favored the onset of listric faults and slumps in the deeper oceanic regions (Azevedo et al., 1985). Gravitational glide

systems are composed of growth faults, rollover anticlines and toe thrust structures.

The Drift phase is widely recognized as a relevant stage for the petroleum potential of the Brazilian Equatorial Margin basins, primarily due to the great thickness of the deposited marine sediments. These sediments include thick packages of basal shales, which represent the source rocks, while turbidite deposits constitute the preferential reservoirs for the petroleum system of the oceanic portion of the Barreirinhas Basin (Azevedo et al., 1985).

MATERIALS AND METHODS

The present study aimed to investigate the influence of the RFZ on the structural and sedimentary evolution of the central sector of the BEM, with a specific focus on the Barreirinhas Basin, characterized as a pull-apart basin formed on an oblique transform margin. To achieve this objective, a combined analysis of seismic reflection data and exploratory well data was performed. This approach enabled a characterization of the subsurface geological structures and the depositional processes active in the study area. Exploratory well data complemented the seismic analysis by providing a chronology for the depositional sequences and tectonic events in the region.

The seismic reflection data and geological and geophysical information from the exploratory wells were provided by the Brazilian National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). The seismic data were obtained already processed, stacked, and time-migrated (PSTM). Meanwhile, the well data include geophysical logs, cuttings descriptions, and composite logs, which describe the lithostratigraphic column of the wells, indicating the main stratigraphic units' tops. Seismic attributes of amplitude and pseudo-relief (TecVA), as well as the combination of these attributes, were employed to enhance geological features and improve the reliability of the interpretations.

Five seismic lines transverse to the RFZ were selected for mapping the transtensional tectonic structures of the Barreirinhas Basin, which are influenced by this oceanic fracture zone (Fig. 1). The structural features include flower structures, normal, reverse, and listric faults generated by dextral strike-slip movements. This distribution of seismic lines aimed to capture structural and depositional variations from west to east, related to the RFZ's influence, including its behavior in the context of the continental shelf break. Additionally, chronostratigraphic data from four exploratory wells (Fig. 3) were used for tying the main sedimentary sequences to their respective seismic reflectors. Specifically, the upper Albian and lower Maastrichtian unconformities were correlated with two seismic horizons for mapping the tops of the rift and Drift I sequences, respectively. The Pirabas Formation is present in all wells, representing the uppermost unit. The Travosas Formation occurs in wells 1-MAS-7-MA and 1-BRSA-729-MAS, while the Bonfim/Preguiças Formation occurs only in well 1-MAS-15-MA.

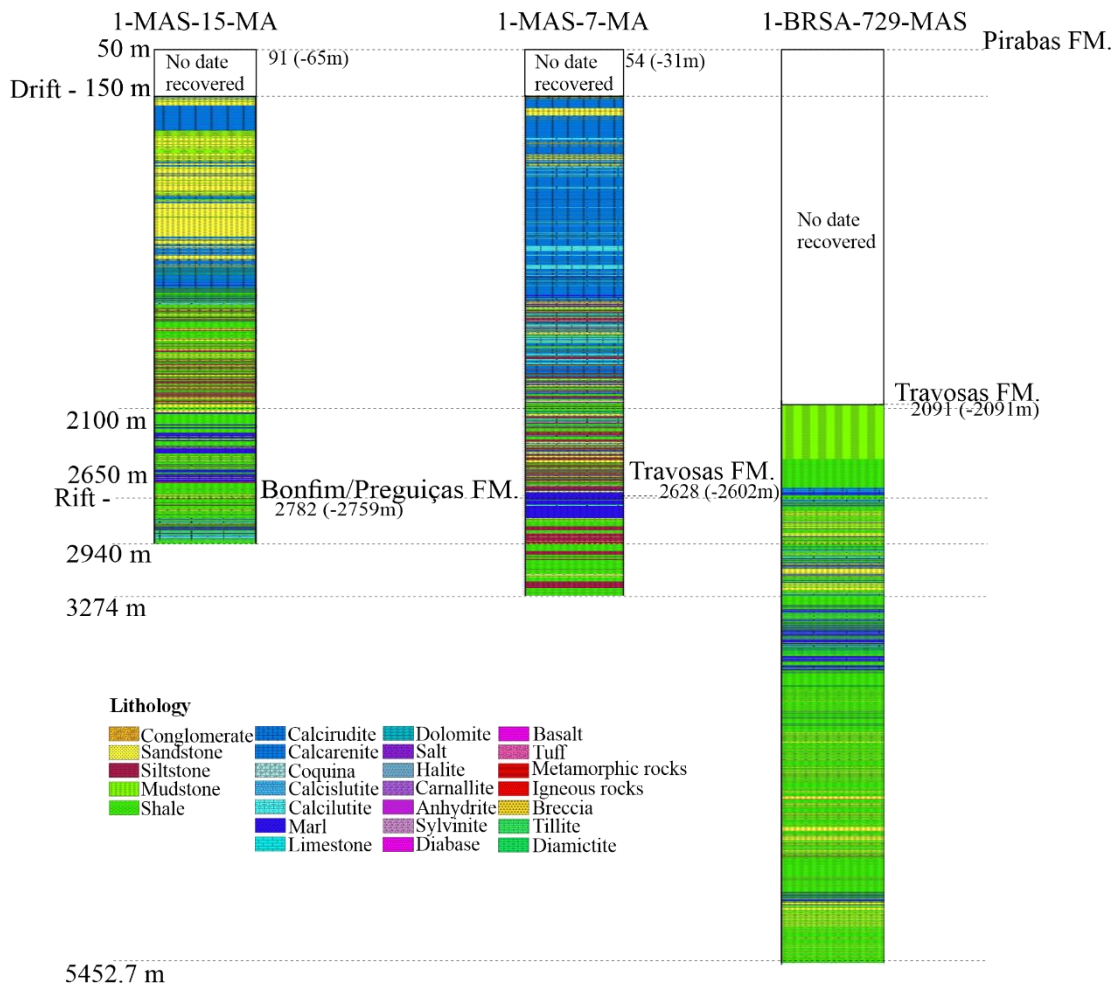


Figure 3. Well logs 1-MAS-15-MA, 1-MAS-7-MA and 1-BRSA-729-MAS, displaying the lithological distribution with depth, emphasizing the main stratigraphic units identified: Pirabas, Travosas and Bonfim/Preguiças Formations. Depths are indicated in meters alongside each log. The lithology legend presents the color and texture patterns used to represent the different rock types encountered.

RESULTS

The seismic line 239-260 is located in the westernmost portion of the Barreirinhas Basin, intersecting the western limit of the RFZ at a high angle (Fig. 1). Trending NE-SW, it extends from the coastline, across the entire continental shelf and slope, to ultra-deep oceanic regions.

In the seismic section of the line 239-260 (Fig. 4), the RFZ is expressed as a negative flower structure, composed of six normal faults that converge towards the mains central fault within the flower structure. It exhibits an extent of ~40 km, reaching depths of up to 7.8 s (~13 km). The center of the flower structure occurs 30 km from the shelf break. The slope region, in turn, is dominated by a set of deep subvertical faults that reach the base of the continental crust at depths of up to 8.0 s.

The Moho is partially imaged in the slope region, where it appears relatively elevated, around 8.0 s (Fig. 4). However, its interpretation is not clear due to the low quality of seismic data at these depths. The basement top is highly faulted

and uplifted by the flower structure faults, dipping steeply in the continental slope region. In the abyssal plain, the basement top is found at depths close to 8.0 s, forming rotated blocks segmented by normal faults related to the last rift phase.

Regarding the sedimentary successions, a significant difference is observed in the rift sequence, which is thick and deformed on the continental shelf, in contrast to the thin and sparsely faulted sedimentary package that fills the series of shallow rifts in the abyssal plain (Fig. 4). The Drift I sequence is also faulted in its platform portion and is less thick than the related sedimentary package in the abyssal plain. Its thickness in deep oceanic regions reaches up to 4.0 s (~6 km). Finally, the Drift II sequence forms a sedimentary package up to 2600 m thick in the platform region (well 1-MAS-7-MA – Fig. 3), thinning on the continental slope and continental rise, and then becoming thicker again in the abyssal plain (well 1-BRSA-729-MAS – Figs. 3 and 4).

Located in the central portion of the Barreirinhas Basin, seismic line 258_7317 has a predominant NE-SW trend and crosses a narrow stretch of the continental shelf, crossing the continental slope to reach the abyssal plain (Fig. 1).

In the 258_7317 seismic section (Fig. 5), the RFZ is again expressed as a negative flower structure, composed of five normal faults that converge towards the central fault within the flower structure. It exhibits an extent of ~30 km, reaching depths of up to 7.2 s (~11 km). The center of the flower structure occurs 12.5 km from the shelf break. The slope region, in turn, is dominated by a deep subvertical fault of the pull-apart basin BSF system, which reaches the base of the continental crust at depths of up to 8.0 s.

The Moho is partially imaged in the slope region, where it appears relatively elevated, around 9.0 s (Fig. 5). However, its interpretation remains unclear due to the low quality of seismic data at these depths, as also observed in line 239_260. On the continental shelf, the basement top is affected by tilted faults with minor displacements and is uplifted by the faults of the flower structure, dipping more steeply in the slope region. In the abyssal plain, the basement top is found at depths close to 8.0 s, also forming rotated blocks segmented by normal faults from the last rift phase.

A significant difference is observed in the 258_7317 seismic line sedimentary rift sequence on the continental shelf, which is quite thick and deformed, compared to the thin and sparsely faulted sedimentary package that fills the series of shallow rifts in the abyssal plain (Fig. 5). The Drift I sequence is also faulted in its platform portion and is less thick than the related sedimentary package in the abyssal plain. Its thickness in deep oceanic regions reaches up to 5.0 s (~7.5 km). Finally, the Drift II sequence forms a sedimentary unit up to 3.0 km thick in the platform region, thinning on the continental slope and rise to up to 2.1 km (Fig. 5).

Positioned in the central-eastern part of the Barreirinhas Basin, Seismic Line 258-7273 is oriented NE-SW, cutting transversally across the RFZ (Fig. 1). It crosses a narrow area of the continental shelf and the whole extent of the slope to reach ultra-deep water regions of the abyssal plain.

In its seismic section (Fig. 6), the RFZ is expressed as a series of five stepped subvertical normal faults, all dipping to the NE. It exhibits an extent of

~30 km, reaching depths of up to 7.0 s (~10.5 km). The center of the fault array occurs 12.5 km from the shelf break. The continental slope region is dominated by a deep subvertical fault of the pull-apart BSF system, which reaches the base of the continental crust at depths of up to 7.2 s. Apparently, the coalescence between the two fault systems (RFZ and BSF) altered the flower structure present in the more western seismic sections (figs. 4 and 5).

In that seismic line, the Moho is partially imaged in the slope region, where it appears relatively elevated, around 8.0 s (Fig. 6); however, its interpretation presents the same difficulties as in the other lines. The top of the basement is faulted and tilted by the RFZ faults on the continental shelf, dipping steeply in the continental slope region. In the abyssal plain, the basement top is found at depths close to 8.0 s, forming rotated blocks segmented by normal faults from the last rift phase beneath a hyper-extended continental crust, with possible exhumation of the lower crust or mantle.

As observed in the other seismic lines, the rift sequence on the continental shelf is thicker and more faulted than the sedimentary packages that fill the shallow rifts of the abyssal plain (Fig. 6). The Drift I sequence is also faulted in the shelf region and is less thick than the correlative sedimentary package in the abyssal plain. Its thickness in deep oceanic regions reaches up to 4.0 s (~6 km). In turn, the Drift II Sequence forms a sedimentary unit up to 1.5 km thick in the shelf region, gently thinning on the continental slope and continental rise to up to 7.5 km.

Seismic line 258-7253 is located on the eastern limit of the Barreirinhas Basin. It also follows a NE-SW orientation and crosses the RFZ at a high angle, ranging from the inner shelf to the deep oceanic portions of the basin (Fig. 1). In its seismic section, the RFZ is again expressed as an asymmetrical negative flower structure, composed of six normal faults that converge towards a central fault located at the eastern edge of the structure. (Fig. 7). It extends about 50 km, reaching depths of up to 7.5 s (~11 km). In this profile, the flower structure continues to control the shelf break, reaching ~7.2 s, with the pull-apart BSF system fault incorporated into the RFZ.

In this section, the Moho is partially imaged in the slope region, where it appears relatively elevated, around 8.0 s (Fig. 7), subject to the same interpretive limitations noted previously. The basement top is highly faulted and uplifted by the faults of the flower structure on the continental shelf, dipping more steeply in the slope region. In the abyssal plain, the basement top is found at depths close to ~8.0 s, forming rotated blocks segmented by normal faults from the last rift phase beneath a significantly thinned hyper-extended crust.

Regarding the overlying sedimentary package, the same pattern as in the other seismic lines is observed, with a thick and deformed rift sequence on the continental shelf, while the sedimentary package is thin and sparsely faulted in the abyssal plain (Fig. 7). The Drift I sequence is also faulted in its shelf portion and is less thick than the correlative sedimentary package on the slope and abyssal plain. Its thickness in deep oceanic regions reaches up to 5.0 s (~7.5 km). The Drift II sequence forms a sedimentary unit up to 600 m thick in the shelf region, increasing to 3.5 km thick on the continental slope and continental rise.

Finally, seismic line 258-7229 is positioned in the easternmost portion of the represented area and marks the transition from the Barreirinhas Basin to the

Ceará Basin. It intersects the eastern limit of the RFZ at a high angle (Fig. 1). Trending NE-SW, it extends from the coastline, across the whole continental shelf and slope, to ultra-deep oceanic regions. At its NE extremity, this seismic line approaches the COB, as delimited by Tavares et al., (2020).

In the 258_7229 seismic section, the RFZ is expressed as an large asymmetrical negative flower structure, composed of five normal faults that converge towards the central one, located at the continental rise (Fig.8). It extends about 55 km, reaching depths of up to 7.4 s (~11 km). In this profile, the flower structure continues to control the shelf break and marks the edge of the pull-apart BSF system. Another negative flower structure occurs in the SW portion of the section, represented by listric faults dipping to the SW.

The Moho is poorly imaged in the slope and abyssal plain regions, where it appears relatively elevated, around 9.0 s (Fig. 8). The basement top is faulted and uplifted by the flower structures on the continental shelf, dipping more steeply in the slope region. In the abyssal plain, the basement top is found at depths close to ~8.0 s, forming rotated blocks segmented by normal faults from the last rift phase.

Few differences are observed in the Rift sequence across the continental shelf, slope, and abyssal plain. This sedimentary package exhibits constant thickness along all three morphological compartments with few evidence of deformation. It is less stratified in the zone affected by the flower structure. The Drift I sequence is also faulted in its platformal portion and is less thick than the correlative sedimentary package in the abyssal plain. Its thickness in deep oceanic regions reaches up to 5.0 s (~7.5 km). Finally, the Drift II Sequence forms a sedimentary unit up to 1 km thick in the platformal region, slightly thickening on the continental slope and continental rise to up to 7.5 km (Fig. 8).

Despite the other analyzed seismic sections, 258_7229 allows visualization not only of the RFZ's influence but also the activity of the Sobradinho Fault Zone (SoFZ), located between the Barreirinhas and Parnaíba basins. This fault zone is associated with a set of extensive synthetic normal faults, with a preferential NNE-SSW orientation. These faults delineate the main structure observed along the seismic line: a rotated rhombic graben, with a central depocenter, reaching a maximum depth of approximately 8.0 s (Almeida Jr, 2018).

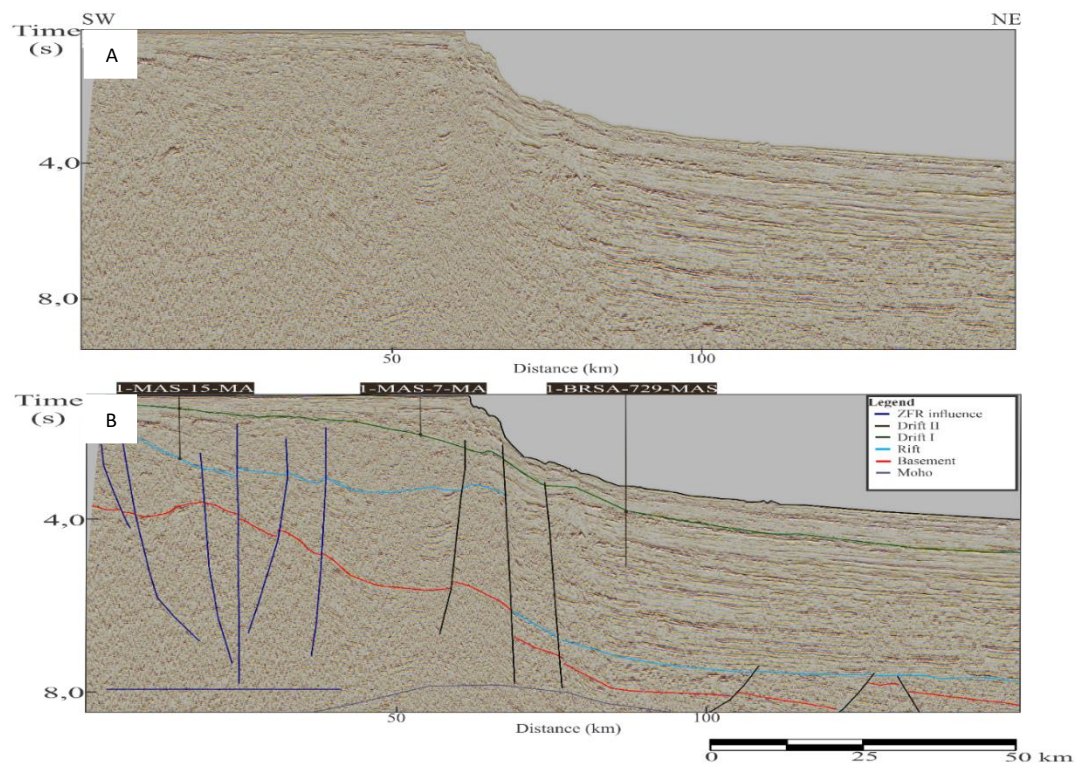


Figure 4. Seismic line 239_260, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.

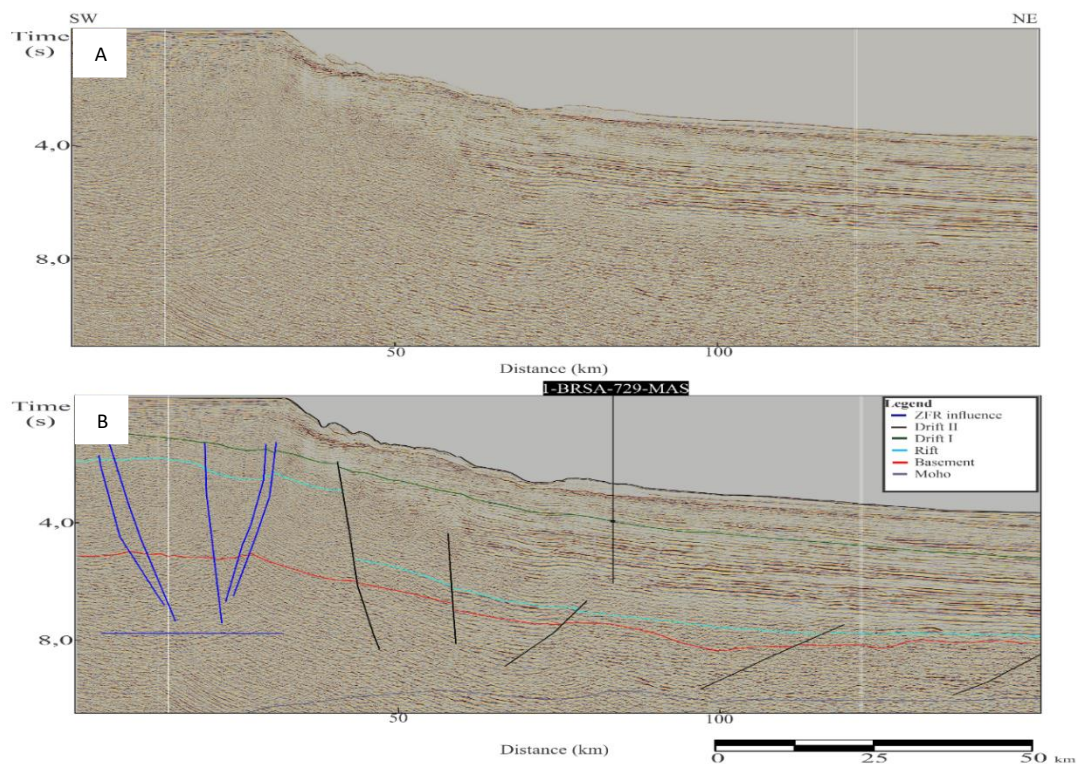


Figure 5. Seismic line 258_7317, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.

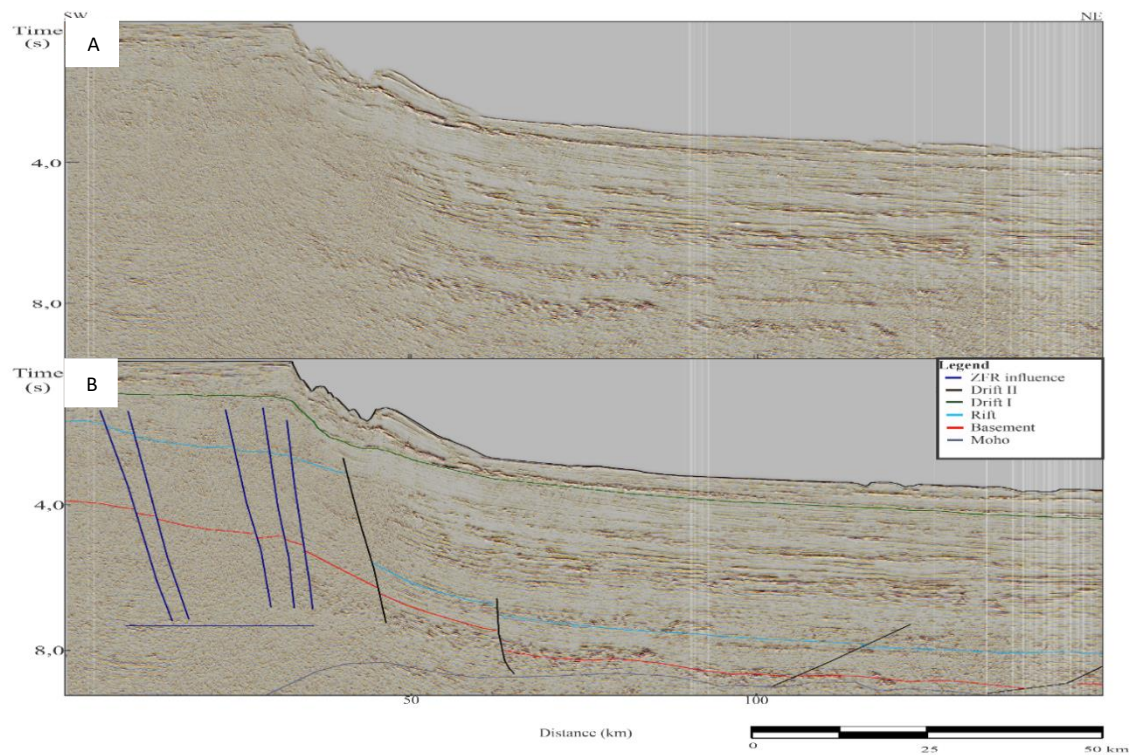


Figure 6. Seismic line 258_7273, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.

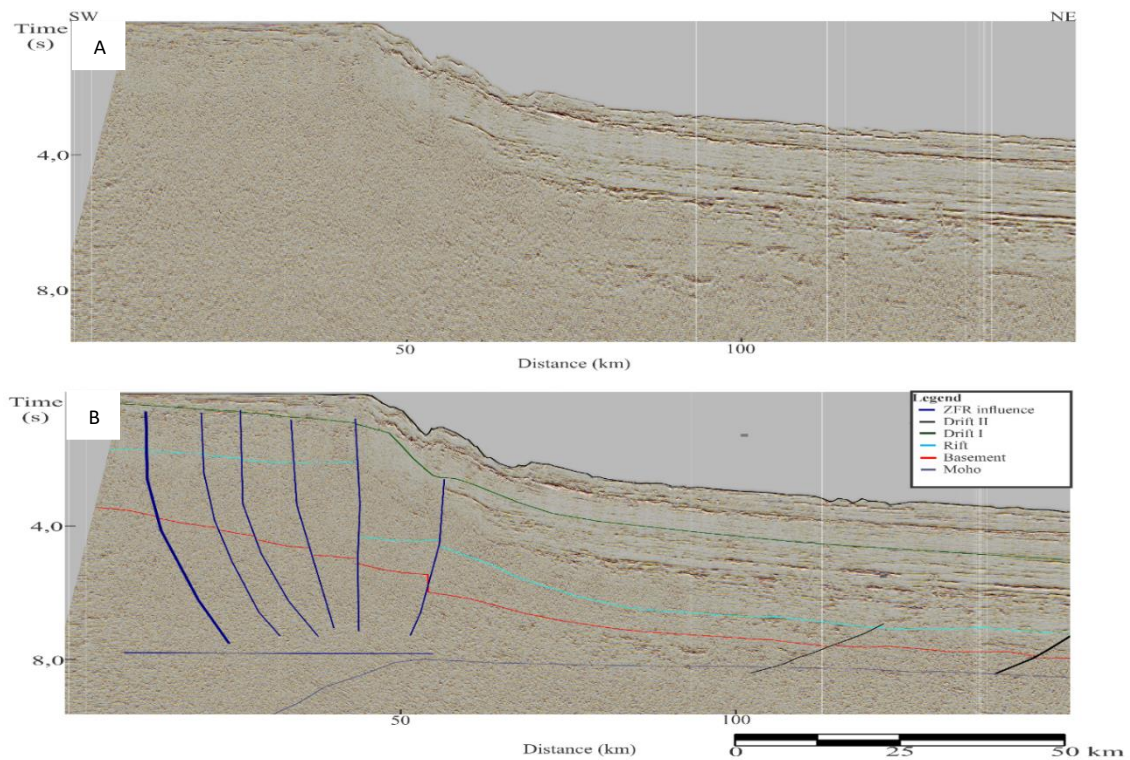


Figure 7. Seismic line 258_7253, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.

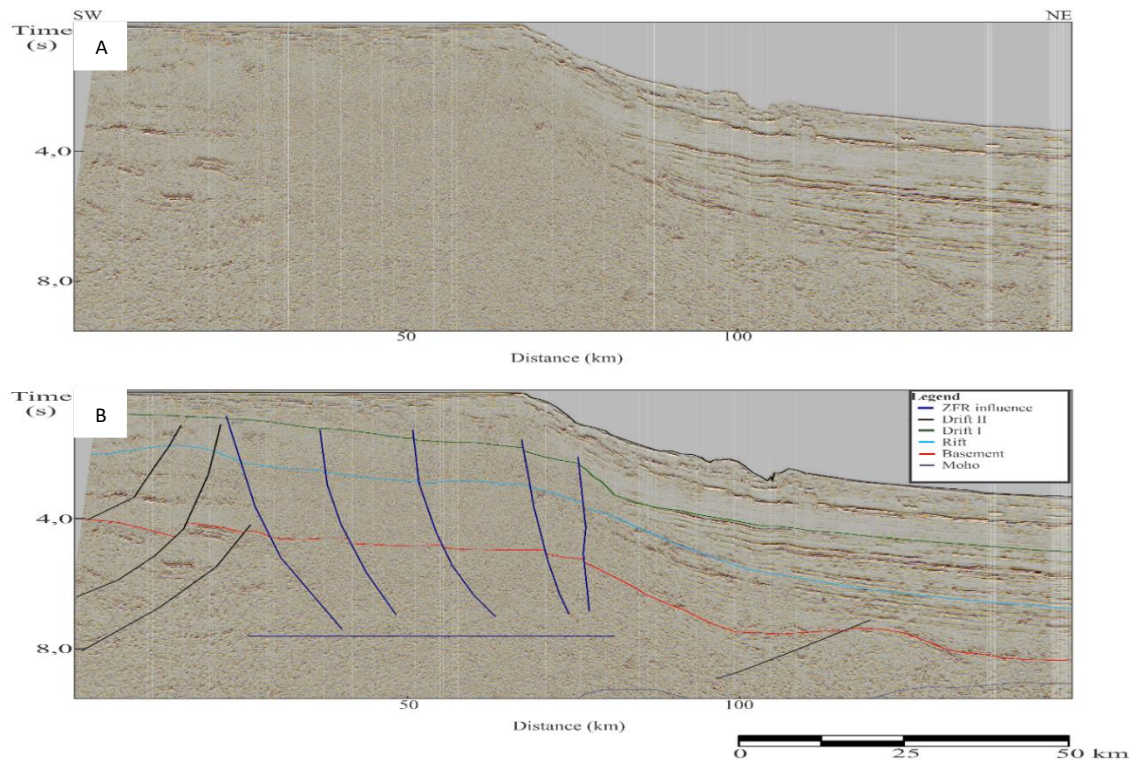


Figure 8. Seismic line 258_7229, displaying (A) clean and (B) interpreted views of the main seismic horizons and structural features.

DISCUSSION

Transtensional Tectonics in the Barreirinhas Basin Formation

Seismic lines revealed the occurrence of negative flower structures in the western portion of the Barreirinhas Basin (Fig. 9). These structures, formed by subvertical normal and listric faults, are directly associated with dextral strike-slip movement along the RFZ, affecting units from the basement up to the Drift II sequence. Similarly, Tavares et al., (2022) identified flower structures in seismic data from the Ceará Basin, also linked to the RFZ, suggesting multiple reactivations of faults with a shear component in the central transform margin segment of the BEM (Fig. 2). The presence of these structures in the Barreirinhas Basin reinforces evidence that transform movements related to the RFZ propagate into the basin tens of kilometers westward, into the Santana Island Platform, south of the NW-trending shelf break inflection (figs. 1 and 9).

Flower structures are described in analog models of pull-apart basins developed under an oblique transtensional regime (e.g., Wu et al., 2009), which are similar to those mapped in the seismic sections (figs. 3 to 8). These pull-apart basin systems develop from parallel principal displacement zones (PDZ) through oblique strike-slip movements (Fig. 10A). A sigmoidal basin is formed with two central depocenters (DC), delimited by different fault sets: outer basin faults (OBF), basin sidewall faults (BSF), and cross-basin strike-slip faults (CBSF) (Fig. 10B). In this regard, the Saint Paul and Romanche fracture zones represent the PDZ of the pull-apart system. The oblique strike-slip movement along the pair of principal displacement zones forms a series of narrow grabens, separated by

divergent wrench faults at the top. According to Wu et al., (2009), these negative flower-type structures in profile, bordered by an upward-diverging splay faults, can represent en-echelon fault systems, which are diagnostic of transtensional deformation. Thus, the flower structures at the western edge of the Barreirinhas Basin's pull-apart system would be controlled by the BSF system, which marks the region of the continental shelf break and slope in the Barreirinhas Basin (figs. 9, 10C and D).

The Barreirinhas Basin is interpreted as a pull-apart basin, formed during the Aptian within the context of the BEM's transform phase. This period was marked by intense dextral strike-slip movement, where the separation of lithospheric plates occurred in association with significant strike-slip movements and transtensional regimes (Azevedo et al., 1985). Basins with these characteristics generally form in brittle lithospheric domains, delimited by strike-slip fault systems that control both their formation and evolution (Venâncio, 2020).

In this scenario, the RFZ plays a fundamental structural role, acting as the main strike-slip fault or comprising the fault system that defines the geometry of the Barreirinhas Basin (Nobrega et al., 2011). Its influence is particularly significant in the basin's transform segment, where strike-slip movements along the RFZ directly shape the shelf break morphology and the deep crustal configuration (de Castro et al., 2022).

Seismic evidence reinforces this tectonic control. In the oceanic portion of the Barreirinhas Basin, seismic profiles reveal negative flower structures deeply rooted in the acoustic basement, and normal listric faults with significant seaward displacement, particularly in the shelf break zone (Figs. 4 to 9). These structures are typical of transtensional environments, where strike-slip faults are associated with oblique faults having an extensional component—a configuration compatible with pull-apart basin formation models (McClay & Dooley, 1995; de Castro et al., 2022).

The influence of the RFZ is also directly manifested in the deformation of the southern margin of the Barreirinhas Basin. In this region, deep flower structures, compressional faults, and folds affecting thick Lower Albian deposits are recognized, indicating intense tectonic deformation (Azevedo, 1991; Davison et al., 2016). Furthermore, at the boundary between the Barreirinhas transform segment and the Ceará Basin divergent segment, continuous dextral movements along the RFZ result in the reactivation of Precambrian shear zones, generating strike-slip faults and new flower structures (de Castro et al., 2022). This reactivation pattern illustrates the continued influence of tectonic control by the RFZ in later stages of margin evolution.

According to Almeida Júnior (2018), the main evidence for the reactivation of Precambrian basement structures is the SoFZ, which represents the border fault of the onshore Barreirinhas Rift. This rift system was aborted when tectonic movements migrated northward under a dextral strike-slip regime along the oceanic fracture zones with the RFZ, during a second rift phase in the submerged portion of the basin (Fig. 2). Extensional tectonics along the SoFZ produced a pinch-out geometry in the onshore basin, characterized by a greater thickening of the sedimentary package in the central portion and a progressive thinning towards the margins (Montenegro et al., 2021). This pattern indicates a process of intense subsidence during the formation of the onshore basin. In later rift

phases, strike-slip movements caused transtensional and transpressional events that stretched the SoFZ into continental shelf portions (figs. 8 and 9).

The third rift phase was responsible for the formation of the Barreirinhas pull-apart system in the central sector of the BEM (de Castro et al., 2024). Seismic sections show the change in structural style along the RFZ, from well-developed and isolated flower structures at its western extremity to their integration with the continental breakup tectonics of the BSF faults in the central portion of the Barreirinhas Basin (figs. 4 to 10).

A schematic representation of the main structural styles observed in the Barreirinhas Basin is synthesized, highlighting how these styles are spatially parallelized in response to the RFZ's influence during the different rift phases (Fig. 11). The tectono-structural model is representative of three main domains, sequentially arranged with the variation of the structural style on the continental shelf south of the RFZ (1), in the shelf break region (2), and in the deep oceanic region (3).

In the first domain, located from the inner to intermediate continental shelf, a structural arrangement comprising grabens and horsts is observed, which continues from the basement up to the Drift II phase. The basement is relatively shallower, while the upper stratigraphic units show a progressive westward thickening, culminating in a thick layer corresponding to the Drift II phase (Fig. 11). This configuration suggests continuous deposition, controlled by inherited Precambrian basement structures that were reactivated during the rift phases.

In the second domain, the intersection between the RFZ and the border fault system of the BSF pull-apart system occurs (Fig. 11). These faults represent the structural limits of the deep oceanic portion of the Barreirinhas Basin and control the shelf break morphology. The interaction between the RFZ and the BSFs results in a complex structural pattern, with the basement and the Rift sequence presenting similar orientations (figs. 9 to 11). However, the Drift I and II phases display a contrasting configuration, namely: horsts occur in the same areas where the lower units form grabens, indicating an inversion in the local tectono-sedimentary dynamics. Furthermore, within this domain, evidence of shallower faulting can be observed at the transition between the continental shelf and slope, suggesting reactivations or more recent tectonic events.

Finally, the third domain corresponds to the deep oceanic sector, where structural styles are predominantly influenced by the final rifting phase of the pull-apart system (Fig. 11). Similar to the previous domain, the Drift I and II depositional phases present structural inversions, with horsts positioned over areas previously occupied by grabens, which reinforces the idea of a change in the tectonic regime during the deposition of these units. In this domain, the most recent rifting becomes more expressive, with greater stretching and lateral extension, characterizing an area where continental crustal stretching processes and subsequent oceanic subsidence were more intense.

Tavares et al., (2022) emphasize that negative flower structures can form during the propagation or reactivation of ancient faults, reflecting a transtensional environment generated by strike-slip fault movements. These authors point out that, at the eastern limit of the transform margin segment, the conjugation of dextral strike-slip movements along the RFZ (E-W) with brittle reactivations along the Transbrasiliano Lineament (NE-SW) causes a transpressional regime,

causing uplift and formation of both positive and negative flower structures, which are not observed at the western extremity of the RFZ, the target area of the present study.

In this same context, Nóbrega II (2011) points out that the combination of rotational and shear movements can generate transtensional regimes in transform margins such as the BEM, favoring the development of normal faults and negative flower structures along oceanic fracture zones like the St. Paul and Romanche FZs.

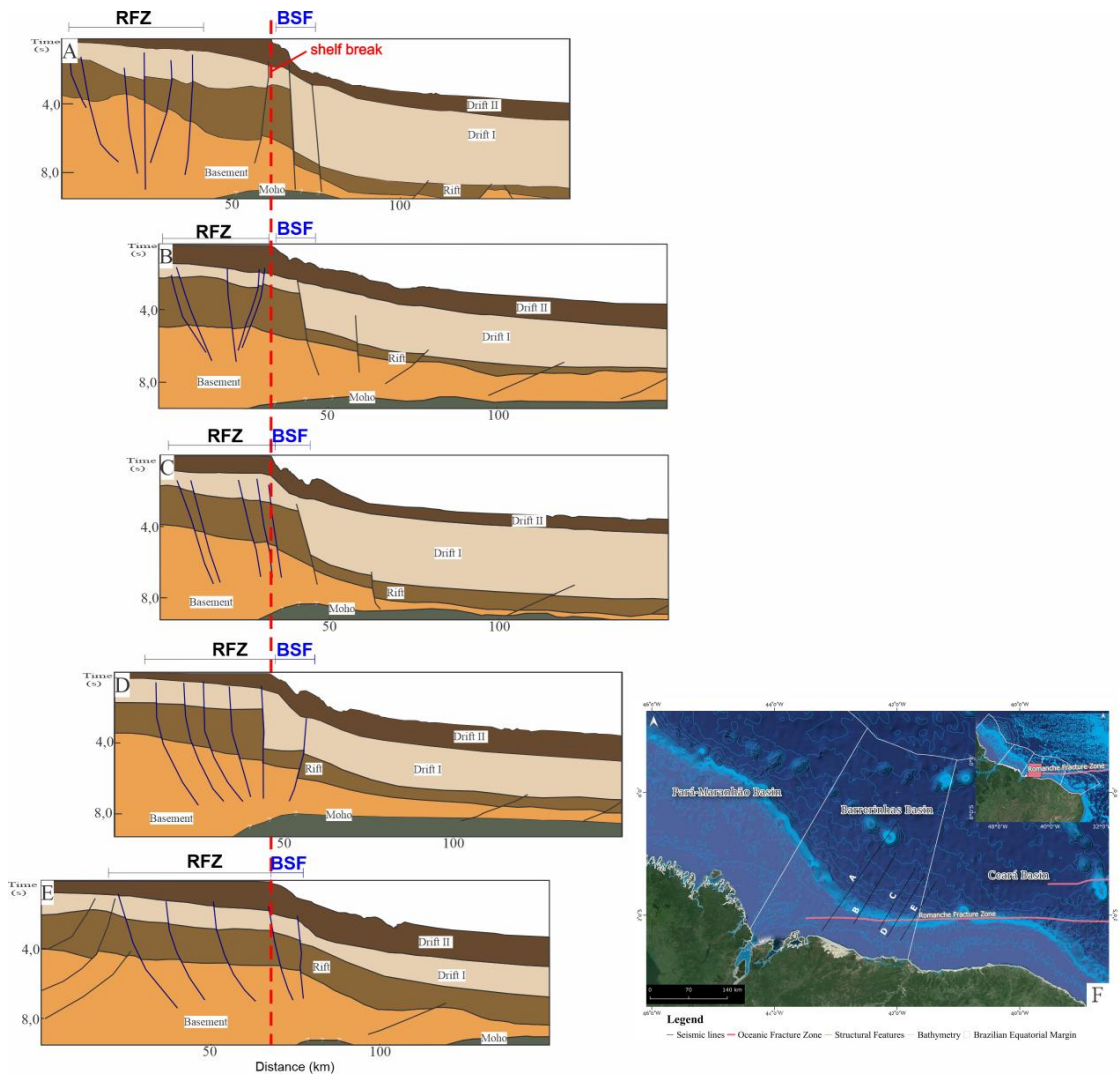


Figure 9. Interpreted seismic sections illustrating the variation in transform structural style within the Barreirinhas Basin along the RFZ, from west to east (A to E). Seismic line locations are shown in (F). BSF – *basin sidewall faults*.

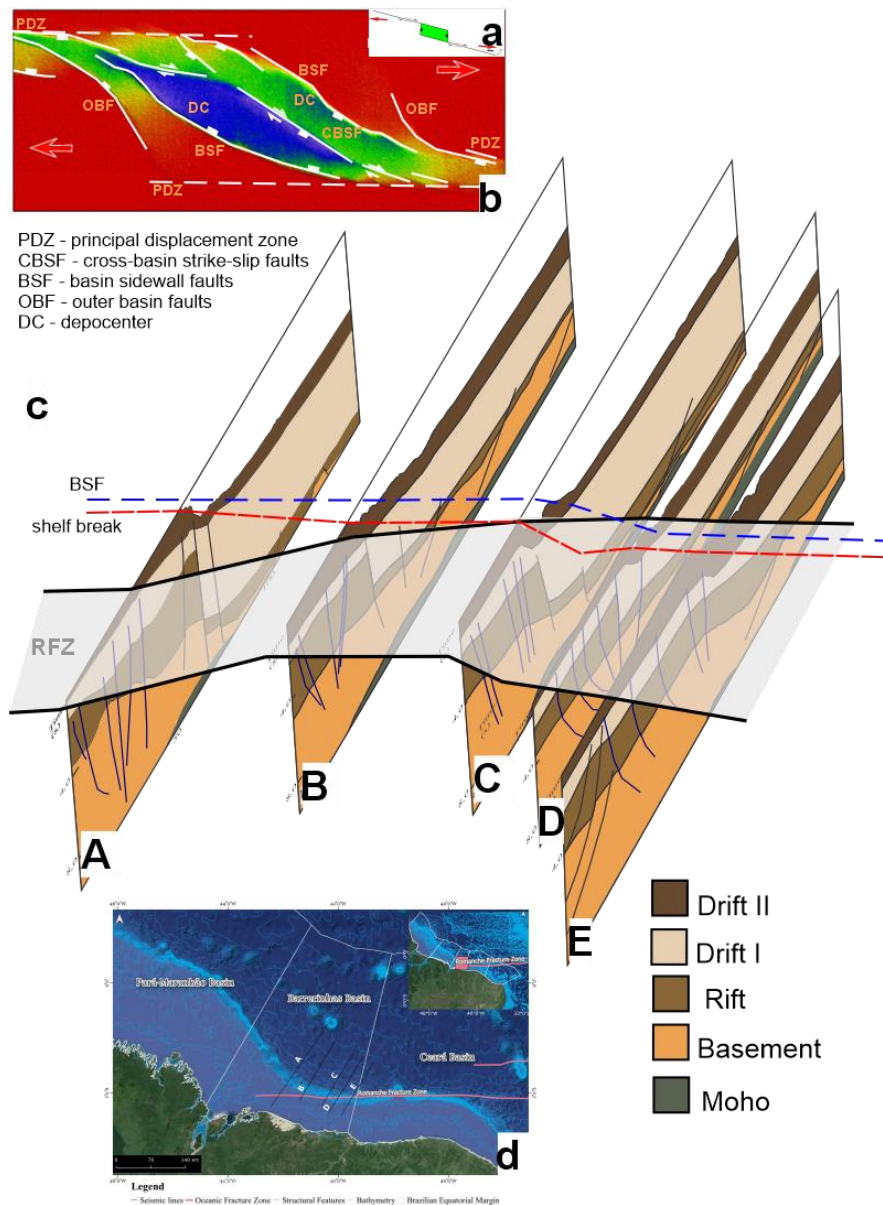


Figure 10. Model of a pull-apart basin and its structural elements, developed in response to an oblique transtensional regime (a and b) (adapted from Wu et al., 2009), analogous to the Barreirinhas Basin. The Romanche Fracture Zone (RFZ) represents the principal displacement zone (PDZ) on the south limit, while the basin sidewall faults (BSF) control the shelf break (c). Seismic sections demonstrate the crossing between the RFZ and the BSF faults at the southern limit of the pull-apart system (d).

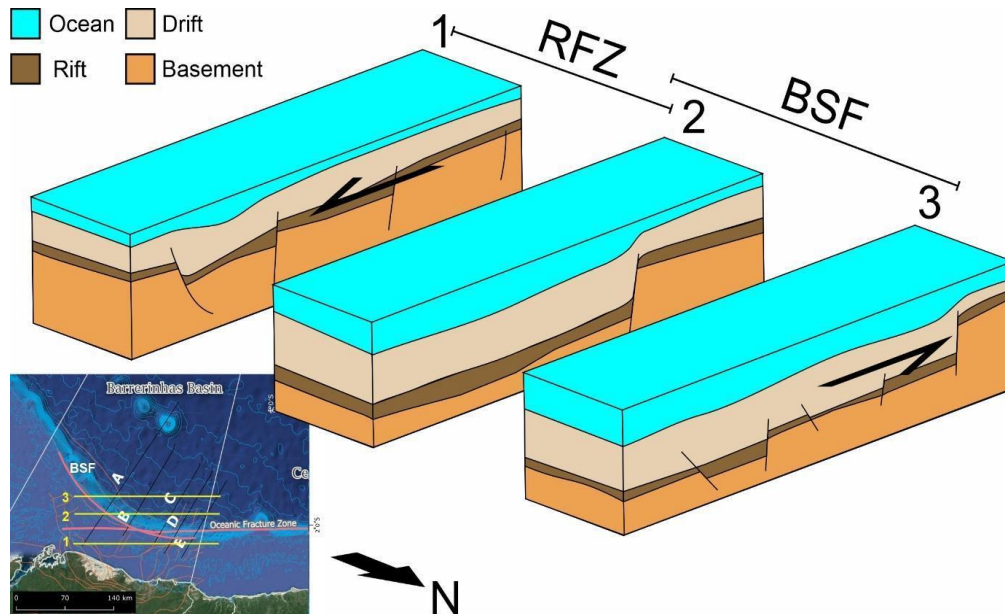


Figure 11. Schematic representation of the structural styles of the Barreirinhas Basin in the Romanche Fracture Zone – RFZ influence region (1), at the intersection with the basin sidewall faults (BSF) system's border fault zone (2), oceanic region affected by Rift phase II (3)

CONCLUSION

The present study demonstrated the significant influence of the RFZ on the tectono-sedimentary evolution of the Barreirinhas Basin, which lies in the central sector of the BEM. Through the integrated interpretation of seismic and exploratory well data, it was possible to identify structures related to transtensional regime, such as normal and listric faults, negative flower features, which extend from the crystalline basement to the most recent sedimentary sequences.

The analyzed seismic sections revealed that the RFZ controls the geometry of the continental margin segment along the Barreirinhas Basin, influencing the shelf break, slope morphology, and compartmentalization of the sedimentary sequences. The observed structures corroborate with analog models of pull-apart basins formed under an oblique shear regime. The presence of flower structures, growth faults, shallow rifting domains, and tectonic inversions supports the evolutionary model across the three compartments of the oceanic basin: proximal continental shelf, the interaction zone between the RFZ and basin sidewall faults (BSF), and the deep oceanic sector.

Therefore, the RFZ represents not only a transform margin structural limit, but also constitutes a fundamental element in the genesis, compartmentalization, and tectono-depositional evolution of the Barreirinhas Basin, directly influencing its current configuration and exploratory potential. Future studies focusing on 3D structural modeling and petroleum system characterization are essential for a better understanding of the role of fracture zones in the evolution of the BEM basins.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by Petrobras (Brazil) as part of the Barreirinhas and MECO projects (N. 2018/00087-2 and 2023/00272-2). We acknowledge the Brazilian Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), which provided borehole and seismic data used in the present study. DLC thanks Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for his research grants.

REFERENCES

- Almeida Jr, M. M. (2018). *Estudo tectonossedimentar da porção emersa da Bacia de Barreirinhas com base em dados geofísicos (RN/Brasil)*. Trabalho de Conclusão de Curso. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN.
- Antobreh, A. A., Faleide, JI., Tsikalas, F., Planke, S. (2009). Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data. *Marine and Petroleum Geology*, 26(3), 345–368. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.04.005>
- Azevedo, R. P., Rossetti, E. L., Nepomuceno Filho, F., Caputo, M. V. (1985). Modelamento Tectônico, origem e evolução da Bacia de Barreirinhas, Belém. // *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 208-221. Pará:SBG.
- Azevedo, P. R. (1991). *Tectonic evolution of Brazilian equatorial continental margin basins (London/England)*. Tese (doutorado). Londres: Imperial College, Universidade de Londres.
- Basile, C. (2015). Transform continental margins; part 1 concepts and model. *Tectonophysics*, 661, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.08.034>
- Bezerra, F. H., de Castro, D. L., Maia, R. P., Sousa, M. O. L., Moura-Lima, E. N., Rossetti, D. F., Bertotti, G., Souza, Z. S., Nogueira, F. C. C. (2020). Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil – Implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. *Geologia Marinha e Petrolífera*, 111, 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.001>
- Bezerra, F. H., Marques, F. O., Vasconcelos, D. L., Rossetti, D. F., Tavares, A. C., Maia, R. P., de Castro, D. L., Nogueira, F. C. C., Medeiros, W. E. (2023). Review of tectonic inversion of sedimentary basins in NE and N Brazil: analysis of mechanisms, timing and effects on structures and relief. *Journal of South American Earth Science*, 126, 104356. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104356>
- Bonatti, E. (1973). Origin and offsets of the Mid-Atlantic Ridge in Fracture Zones. *Journal of Geology*, 81, 144-156. <https://doi.org/10.1086/627831>
- Davison, Ian et al., (2016). Estruturas transpressionais e potencial de hidrocarbonetos ao longo da Zona de Fratura Romanche: uma revisão. *The Geological Society*, 431. <https://doi.org/10.1144/sp431>
- Da Silva, E. B., Ribeiro, H. J. P. S., De Souza, E. S. (2021). Exploration plays of the Potiguar Basin in deep and ultra-deep water, Brazilian Equatorial Margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103454. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103454>
- De Castro, D. L. et al., (2022). Crustal evolution of divergent and transform segments of the Brazilian Equatorial Margin derived from integrated

geophysical data: Insights from basement grain heritage. *Earth-Science Reviews*, 232, 104132. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104132>

De Lima, D. P. D. et al., (2023). Gravity inversion for crustal thickness investigation of the continental and oceanic crusts of Brazil incorporating a lithosphere thermal gravity anomaly correction. *Tectonophysics*, 846, 229663. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229663>

De Matos, R. M. D., Mohriak, W. U. (2000). *Atlantic Rifts and Continental Margins*. Nova Jersey: John Wiley & Sons.

Emery, K. O., Phillips, J., Bowin, C., Mascle, J. (1975). Continental Margin off western Africa: Angola to Sierre Leone. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 59, 2209-2265.

<https://doi.org/10.1306/83D92249-16C7-11D7-8645000102C1865D>

Gerya, T. V. (2013). Iniciação de falhas transformantes em margens continentais riftadas: 3D modelagem petrológico-termomecânica e comparação com a Bacia Woodlark. *Petrologia*, 21 (6), 550–560. <https://doi.org/10.1134/S0869591113060039>

Gonçalves, S. F. D. S. (2023). *Geophysical characterization of the Crustal structures from Equatorial to North-East Brazilian margins (Bretanha/France)*. Tese (Doutorado). Brest: Universidade da Bretanha Ocidental-Brest.

Gorini, M. (1977). *The Tectonic Fabric of the Equatorial Atlantic and Adjoining Continental Margins (New York/ USA)*. Tese (Doutorado), New York City: Columbia University.

Heine, C., Zoethout, J., Muller, R. D. (2013). Cinemática do rift do Atlântico Sul. *Solid Earth*, 4, 215–253. <https://doi.org/10.5194/se-4-215-2013>

Heezen, B. C., Gerard, S. L., Tharp, M. (1964). The Vema Fracture Zone in the Equatorial Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 69, 733-739. 1964. <https://doi.org/10.1029/JZ069i004p00733>

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2009). *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de textos.

Mascle, J., Blarez, E. (1987). Evidence for transform margin evolution from the Ivory Coast–Ghana continental margin. *Nature*, 326, 378-381. <https://doi.org/10.1038/326378a0>

Mcclay, K., Dooley, T. (1995). Analogue models of pull-apart basins. *Geology*, 23 (8), 711-714. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0711:AMOPAB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0711:AMOPAB>2.3.CO;2)

Montenegro, C. G. L. et al., (2021). Arquitetura interna da Bacia de Barreirinhas e evidências de movimentos de transformação ao longo da Zona de Fratura Romanche, Margem Equatorial Brasileira. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103049. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103049>

Nemcok, M. et al., (2016). Margens de transformação: desenvolvimento, controles e sistemas petrolíferos – uma introdução. *Geological Society*, 431, 385. <https://doi.org/10.1144/SP431.15>

Nery, G. G. (2013). *Perfilagem Geofísica em Poço Aberto – fundamentos básicos com ênfase em petróleo*. Rio de Janeiro: SBGF.

Nobrega I. I, M. (2011). *Mapeamento de Estruturas do Embasamento e seus Limites Crustais no Atlântico Equatorial, Adjacente à Margem Brasileira (RJ/Brasil)*. Dissertação (mestrado). Niterói: Universidade Federal Fluminense.

Oldenburg, D. W. (1974). The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39, 526–536. <https://doi.org/10.1190/1.1440444>

- Parker, R. L. (1972). O cálculo rápido de anomalias potenciais. *Geophysical Journal International*, 42, 315–334. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb06513.x>
- Ramos, A. Q. et al., (2021). *Zoneamento Nacional dos Recursos de Óleo e Gás (ZNMT)*. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/zoneamento-nacional-de-recursos-de-oleo-e-gas>. Acessado em 14 fev 2024.
- Ribeiro Filho, N., Martins, C. M. (2023). Efeito da profundidade de Moho na separação regional-residual: uma investigação na Bacia de Barreirinhas. *Papers SSRN*, 31, 4345344. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4345344>
- Soares Junior, A.V., Hasui, Y., Costa, J. B. S., Machado, F. B. (2011). Evolução do rifteamento e paleogeografia da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. *Geociências*, 30, 669-692.
- Tavares, A. C., De Castro, D. L., Bezerra, F. H. R., Oliveira, D. C., Vannucchi, P., Iacopini, D., Jovane, L., Vital, H., (2020). A zona de fratura Romanche influencia a segmentação da margem equatorial do Brasil. *Journal of South American Earth Sciences*, 103, 102738. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102738>
- Tavares, A. C. et al., (2022). Continental-scale structural heritage from rift extension to postrift inversion: Implications for the central Brazilian Equatorial Margin evolution. *Tectonophysics*, 837, 229446. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229446>
- Taylor, B., Goodliffe, A., Martinez, F., (2009). Iniciação de falhas transformantes em rifted margens continentais. *Comptes Rendus Geoscience*, 341, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.010>
- Thomas, J. E. (2021). *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência.
- Travassos, R. D. M., Freitas, I. D. A. (2021). Bacia da Foz do Amazonas: sumário geológico e setores em oferta. Brasil. Rio de Janeiro: Anp.
- Wu, J. E. et al., (2009). 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1608-1623. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.06.007>
- Zalan, P. V. (1983). *Stratigraphy and petroleum potential of the Acarau and Piauí-Camocim sub-basins, Ceará basin, offshore northeastern Brazil*. Dissertação(Mestrado). Colarado: Colorado School of Mines.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa concentrou-se na análise da influência da ZFR na compartimentação estrutural do segmento de margem continental transformante da MEB, particularmente na Bacia de Barreirinhas. A interpretação de linhas sísmicas e dados de poços revelou uma série de estruturas em flor negativa construídas por falhas normais e lítricas subverticais, cuja origem é diretamente atribuída a movimentos transcorrentes ao longo da ZFR. Estas estruturas afetam

não apenas camadas superficiais, como também as sequências tectono-deposicionais de rifte e drifte e penetram profundamente no embasamento, impactando a morfologia do talude continental.

Ao analisar de oeste para leste, foi possível observar que a ZFR afeta a plataforma continental no limite oeste da Bacia de Barreirinhas, migrando em direção ao talude continental e coalescendo com o sistema de falhas presente nesta região. Uma hipótese possível é que a estrutura em flor da ZFR e as falhas da região do talude eram sistemas de falhamentos distintos que coexistiram nas etapas iniciais da última fase rifte, que gerou o sistema pull-apart de Barreirinhas e culminou com a ruptura continental e depois coalesceram na medida que os segmentos crustais começaram a se deslocar lateralmente ao longo da ZFR, assumindo o controle da quebra do talude a leste da bacia.

Essa análise indica uma complexa interação entre a evolução da ZFR e a morfologia do talude continental na Bacia de Barreirinhas, evidenciando o regime transtensional oblíquo na fase decisiva para abertura do Atlântico Equatorial. Um outro aspecto destacado é a variação na profundidade da Moho (descontinuidade de Mohorovičić), que mostra elevações pronunciadas próximas à ZFR e declínios abruptos à medida que se afasta da zona de fratura em direção à crosta continental. Esse fenômeno é ilustrado nas seções sísmicas que evidenciam uma Moho mais rasa sob influência direta da ZFR.

Portanto, embora os estudos recentes ofereçam contribuições valiosas sobre o papel da ZFR na MEB, é crucial continuar a pesquisa para melhor entender não apenas os processos geodinâmicos em jogo, mas também as implicações práticas desses fenômenos para a exploração de recursos naturais e para a avaliação de riscos geológicos na região.

REFERÊNCIAS

Antobreh, AA, Faleide, JI, Tsikalas, F. e Planke, S. 2009. Arquitetura de cisalhamento de fenda e desenvolvimento tectônico da margem de Gana deduzido da reflexão sísmica multicanal e dados de campo potenciais. *Geologia Marinha e do Petróleo*, 26, 345–368.

Azevédo, PR 1991. Evolução Tectônica do Brasil Bacias da Margem Continental Equatorial. Tese de doutorado, Imperial College, Universidade de Londres.

BASILE, Christophe. Transformação das margens continentais — Parte 1: Conceitos e modelos. *Tectonophysics*, v. 661, p. 1-10, 2015.

BURBANK, Douglas W.; ANDERSON, Robert S. Marcadores geomórficos. Burbank, DW & Anderson, RS, *Geomorfologia Tectônica*. Malden: (ed.) Blackwell Publishing, p. 13-32, 2001.

CHANG, Hung Kiang et al. Tectônica e estratigrafia do sistema Rift do Leste do Brasil: uma visão geral. *Tectonophysics*, v. 213, n. 1-2, p. 97-138, 1992.

CROWELL, John C. Sedimentação ao longo da falha de San Andreas, Califórnia. 1974.

CROWELL, JOHN C. Origin of Late Cenozoic basins in southern California; in, *Wrench-fault Tectonics*, AG Sylvester, comp. American Association of Petroleum Geologists, Reprint Series, n. 28, p. 195-209, 1984.

Davison Ian, 2015. Estruturas transpressional e potencial de hidrocarbonetos ao longo da Zona de Fratura Romanche: uma revisão.

DE CASTRO, David L. et al. Crustal evolution of divergent and transform segments of the Brazilian Equatorial Margin derived from integrated geophysical data: Insights from basement grain heritage. *Earth-Science Reviews*, v. 232, p. 104132, 2022.

Fonseca, C. V. F., 2022. Caracterização tectono-deposicional do Alto de Tutóia na porção submersa da Bacia de Barreirinhas-Margem Equatorial do Brasil. ufrn.br

HENRY, Steven G.; BRUMBAUGH, WM; CAMERON, Nick. Desenvolvimento de rochas geradoras do pré-sal na margem conjugada do Brasil: exemplos da África

Ocidental. In: 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica . Associação Europeia de Geocientistas e Engenheiros, 1995. p. cp-313-00025.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. Geofísica de exploração. Oficina de textos, 2009.

MATOS, Renato M. Darros; MOHRIAK, W. U. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. Atlantic rifts and continental margins, v. 115, p. 331-354, 2000.

Masclé, J., Blarez, E., Marinho, M., 1988. A estrutura rasa da Guiné e Cote Margens de transformação d'Ivoire-Gana: sua influência na evolução equatorial do Atlântico Mesozóico. Tectonophysics 155, 193-209.[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90266-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90266-1).

Montenegro, C. G. L., 2020. Influência da Zona de Fratura Romanche no arcabouço tectonoestratigráfico da Bacia de Barreirinhas, NE, Brasil. ufrn.br

MITCHUM, Robert M.; VAIL, Peter R.; THOMPSON, SIII Estratigrafia sísmica e mudanças globais do nível do mar, parte 2: a sequência deposicional como unidade básica para análise estratigráfica. 1977.

MOHRIAK, Webster U. et al. Sedimentary basins in the central and south Atlantic conjugate margins: Deep structures and salt tectonics. CEP, v. 20, p. 031-912, 2008.

NERY, Geraldo Girão. Perfilagem Geofísica em Poço Aberto—fundamentos básicos com ênfase em petróleo. INCTGP/CNPq-SBGf, 2013.

Oliveira, J. P. S., . Influência da Zona de Fratura Romanche na evolução tectonosedimentar da Bacia do Ceará/Sub-Bacia de Mundaú. app.uff.br. uff.br

Tavares, A. C., 2022. Influência da reativação rúptil de zonas de cisalhamento continentais e da Zona de Fratura Romanche na evolução da Margem Equatorial do Brasil. ufrn.br

THOMAS, José Eduardo. Fundamentos de engenharia de petróleo. Interciência, 2001.

Paula, J. C., 2022. Arquitetura crustal da margem equatorial brasileira. uerj.br